



Agroindustria 4.0

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA

Juan Camilo Ovalle Másmela

Johanna Andrea Serna Jiménez

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural – MinAgricultura

Johnny Gómez

Actualización 2025

1. Antecedentes

El Plan Estratégico de Ciencia, Tecnología e Innovación Agropecuario Colombiano – PECTIA (2017–2027) fue construido de manera participativa con productores, academia, gremios y entidades públicas, bajo coordinación del MinAgricultura y Desarrollo Rural – MinAgricultura, Colciencias (hoy MinCiencias) y AGROSAVIA. La Ley 1876 de 2017 creó el SNIA y le dio carácter vinculante al PECTIA, además de establecer su actualización periódica cada cuatro años. Desde su adopción, el PECTIA se ha articulado con nuevos marcos de política orientados a la transformación digital y la agroindustria 4.0. Entre ellos destacan: el CONPES 3975 de 2019, que impulsa la digitalización y el uso de IA para generar valor público y privado; el CONPES 4069 de 2021, que actualiza la gobernanza de la CTI con enfoque territorial y diferencial; y la Ley 2294 de 2023 (PND 2022–2026), que promueve la transformación productiva basada en conocimiento, la conectividad rural y la gestión de datos como bienes públicos.

En el plano internacional, los marcos estratégicos recientes han consolidado la digitalización como vector de sostenibilidad y competitividad en los sistemas agroalimentarios. La FAO ubicó la innovación y lo digital en su Marco Estratégico 2022–2031 y su Plan de Acción 2022–2025, promoviendo alianzas y hojas de ruta digitales para el agro (FAO, 2022a; FAO, 2022b). Para Colombia, la OCDE (2022, 2023) ha recomendado profundizar la innovación y la infraestructura digital rural para cerrar brechas territoriales y potenciar productividad y resiliencia.

En términos tecnológicos, la maduración de la IA, el IoT/edge computing, la robótica/UAV, Cadena de Bloques (blockchain) y los gemelos digitales está reconfigurando la agroindustria global, acelerando la transición hacia sistemas ciber-físicos y ciber-biológicos que integran datos multiescala para decisiones en tiempo real. La literatura de 2023–2025 reporta avances sustantivos en: (i) gemelos digitales para modelar cultivos, invernaderos y acuicultura, con mejoras en eficiencia y toma de decisiones (Wang, 2024; Escribà-Gelonch et al., 2024); (ii) trazabilidad y gobernanza de

la cadena agroalimentaria con blockchain, con progresos en interoperabilidad y evaluación de desempeño (Zarbà et al., 2024; Pang et al., 2024); (iii) UAV/teledetección para predicción de rendimiento y eficiencia en uso de nitrógeno (Guebsi et al., 2024; Zhang et al., 2024); y (iv) integración IoT-Big Data-IA y edge-AI para monitoreo y diagnóstico *in situ*, con énfasis en despliegue en entornos con conectividad limitada (Duguma et al., 2024).

3

La producción en condiciones extremas: altas temperaturas y humedad, limitaciones de agua o energía, y exposición a eventos climáticos; se está trabajando con sensórica, control en el borde y gemelos digitales, habilitando unidades resilientes (invernaderos, acuicultura recirculada, cámaras de secado/curado) que optimizan uso hídrico y energético y anticipan fallas (Verdouw et al., 2021). En paralelo, la impresión 3D de alimentos emerge como plataforma de I+D para prototipado rápido, personalización nutricional y valorización de subproductos (harinas, pastas y geles funcionales), acelerando el desarrollo de formulaciones antes de su escalado en planta piloto (Yang et al., 2020; Dankar et al., 2022).

La tecnología de empaque y almacenamiento avanza hacia soluciones activas e inteligentes, barreras mejoradas, controladores de $O_2/CO_2/H_2O$, etiquetas tiempo-temperatura y códigos 2D enlazados a plataformas de trazabilidad; junto con monitoreo continuo de cadena de frío y modelos de vida útil basados en datos, lo que reduce mermas y fortalece la conformidad regulatoria (Heo et al., 2024; Li et al., 2024; Waldhans et al., 2024; Palanisamy et al., 2025).

El panorama global de la Agroindustria 4.0 evidencia una creciente integración de tecnologías disruptivas en los sistemas agroalimentarios, con fuerte énfasis en la sostenibilidad, resiliencia y trazabilidad. En primer lugar, la digitalización de la agricultura emerge no solo como una herramienta de eficiencia productiva, sino como un sujeto transformador que rediseña los modelos de negocio, las cadenas de suministro y las prácticas agrícolas (Vahdanjoo et al., 2025). Las tecnologías de la Revolución Industrial

4.0 están siendo utilizadas para innovar en sistemas de riego inteligente (*smart irrigation*), mitigación del cambio climático y reducción de emisiones, lo cual realiza su rol clave en la transición hacia una agricultura más sostenible (Vahdanjoo et al., 2025; Zhang et al., 2024). En función de lo anterior, conceptos asociados con la tecnología y desarrollo de alternativas altamente eficientes que permitan aumentar la capacidad productiva del sector rural, deben ir encadenadas necesariamente con la gestión inteligente del agua y sus impactos medibles a través de diferentes tecnologías tales como.

4

2. Marco conceptual

La Industria 4.0 se entiende como la convergencia de sistemas ciber-físicos, internet de las cosas (IoT), analítica de datos e inteligencia artificial (IA), junto con la automatización avanzada que integra dominios físicos, digitales y biológicos, optimizando procesos y habilitando la toma de decisiones en tiempo real. En el sector agropecuario, esta revolución tecnológica ha evolucionado hacia arquitecturas basadas en nube y edge computing, acompañadas de modelos de IA que permiten su aplicación en entornos rurales con limitaciones de conectividad (Miller et al., 2025; Ahmed et al., 2025).

Es así como, la Agroindustria 4.0 se concibe como la adopción integral de las tecnologías de la Industria 4.0 en las cadenas agroalimentarias, desde la producción hasta la comercialización, integrando datos multiescala con la automatización, para mejorar productividad, sostenibilidad y trazabilidad (Ovalle et al., 2023; Nettle et al., 2025). Esta definición amplía el concepto de agricultura de precisión, centrado en el manejo sitio-específico con sensores y teledetección, hacia la agricultura digital, que incorpora plataformas de datos, servicios digitales, inteligencia artificial y nuevas formas de organización sociotécnica, habilitando alertas, gemelos digitales y nuevos modelos de negocio basados en datos (Top et al., 2022).

La literatura reciente reconoce que los dominios tecnológicos centrales de la Agroindustria 4.0 abarcan el IoT y la IA (edge-AI), capaces de realizar monitoreo y diagnóstico en tiempo real (Ahmed et al., 2025); la robótica y los vehículos aéreos no

tripulados (UAV), utilizados para agricultura de precisión y recolección de datos multiespectrales (Guebsi et al., 2024); los gemelos digitales, que generan réplicas virtuales de cultivos, invernaderos y unidades pecuarias para optimizar el manejo en condiciones cambiantes (Escribà-Gelonch et al., 2024; Wang et al., 2024); los sistemas de soporte a decisiones alimentados por analítica avanzada y aprendizaje automático (Miller et al., 2025); y las tecnologías de trazabilidad digital, especialmente cadenas de bloques y tecnologías de registro distribuido (DLT), que fortalecen la confianza en las cadenas agroalimentarias y permiten mayor interoperabilidad (Pang et al., 2024; Zarbà et al., 2024; CAST-IFT, 2023).

5

El concepto contemporáneo de Agroindustria 4.0 también incluye la gobernanza de datos y la interoperabilidad como principios esenciales. En este sentido, los principios FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) se han adoptado en investigaciones recientes para garantizar la reutilización y accesibilidad de los datos agrícolas, con metodologías de “FAIRificación” que facilitan la integración de datos agroclimáticos y productivos (Krisnawijaya et al., 2025; Top et al., 2022).

Desde un enfoque territorial, la Agroindustria 4.0 debe implementarse bajo principios de inclusión y equidad, incorporando poblaciones campesinas, étnicas, mujeres rurales y juventudes, en línea con las recomendaciones de la OCDE y la FAO para cerrar brechas digitales y garantizar acceso equitativo a la innovación (OECD, 2022; FAO, 2022). En Colombia, este enfoque se articula con la Estrategia Nacional Digital 2023–2026, el CONPES 3975 de 2019 sobre transformación digital e inteligencia artificial, el CONPES 4069 de 2021 sobre ciencia, tecnología e innovación y la Ley 2294 de 2023 (PND 2022–2026), así como con el reciente CONPES 4144 de 2025, que actualiza los lineamientos de política en IA (DNP, 2019, 2021, 2025; MinTIC, 2023; Congreso de Colombia, 2023).

La literatura también señala riesgos que deben ser gestionados, como la persistencia de brechas digitales, los sesgos algorítmicos, la dependencia tecnológica (lock-in) y la vulnerabilidad en materia de ciberseguridad. Estos riesgos refuerzan la necesidad de

políticas robustas de gobernanza, programas de formación y esquemas de acompañamiento que aseguren un uso responsable de la Agroindustria 4.0 y garanticen su aporte real al valor público y privado (Miller et al., 2025; Pang et al., 2024).

6

3. Marco político y normativo

El marco que habilita la Agroindustria 4.0 en Colombia se estructura sobre tres pilares: i) la política sectorial agropecuaria y de innovación; ii) la política digital, de datos y conectividad; y iii) los estándares técnicos e iniciativas regulatorias externas que inciden en trazabilidad y sostenibilidad de exportaciones. En el pilar sectorial, la Ley 1876 de 2017 crea el Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria (SNIA) y reconoce al PECTIA como instrumento orientador (Congreso de Colombia, 2017). De igual manera se tiene en cuenta el Plan Nacional de Desarrollo 2022–2026 (Ley 2294 de 2023), que impulsa conectividad, transformación productiva basada en conocimiento y gobernanza de datos como bienes públicos, condiciones habilitantes para la digitalización del agro (Congreso de Colombia, 2023). De forma complementaria, el Decreto 1406 de 2023 organiza el Sistema Nacional de Reforma Agraria y Desarrollo Rural (SINRADR) y modifica el Decreto Único 1071 de 2015, priorizando actividades agrícolas y agroindustriales e institucionalizando instrumentos de planificación y coordinación territorial, con impactos en despliegue de infraestructura y servicios para adopción tecnológica (MinAgricultura, 2023). Frente a la variabilidad climática, la Resolución 355 de 2021 adopta el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático del Sector Agropecuario (PIGCCS), que referencia medidas de mitigación/adaptación donde los sistemas de monitoreo, información y trazabilidad digital son medios de implementación (MinAgricultura, 2021) (Tabla 1).

En el pilar de ciencia, tecnología e innovación, la Política Nacional de CTI 2022–2031 (CONPES 4069 de 2021) define objetivos, gobernanza y enfoque territorial/diferencial para incrementar la contribución de la CTI al desarrollo, lo cual facilita alinear el Factor de Agroindustria 4.0 con instrumentos, arreglos institucionales y métricas de desempeño (DNP, 2021). En lo digital y de datos, la Política de Transformación Digital e Inteligencia

Artificial (CONPES 3975 de 2019) orienta el uso estratégico de datos, IA y digitalización en el sector público y privado (DNP, 2019), y su actualización programática se consolida con los Lineamientos de política para IA (CONPES 4144 de 2025), donde se refuerzan principios de ética, seguridad y talento, así como aplicaciones sectoriales con enfoque diferencial (DNP, 2025). Estos instrumentos se conectan con la Estrategia Nacional Digital 2023–2026 del MinTIC, que operacionaliza metas en conectividad, datos abiertos, seguridad digital y servicios ciudadanos, e identifica la culminación de la Política de Confianza y Seguridad Digital (CONPES 3995 de 2020) y su legado en capacidades e institucionalidad (MinTIC, 2023; DNP, 2020; MinTIC, 2023b). En financiación, la Ley 2056 de 2020 (SGR) establece asignaciones y reglas para proyectos de CTI y conectividad, relevantes para cerrar brechas de infraestructura digital rural (Congreso de Colombia, 2020). En inclusión productiva y mercados, la Ley 2046 de 2020 fortalece compras públicas de alimentos a pequeños productores y ACFC, posibilitando la trazabilidad digital del origen y el cumplimiento de requisitos de calidad (Congreso de Colombia, 2020b).

El pilar de estándares técnicos y exigencias externas es determinante para competitividad, especialmente en cadenas exportadoras. En trazabilidad y cadena de custodia, ISO 22095:2020 define modelos y requisitos generales (identidad preservada, segregación, balance de masas, entre otros), útiles para diseñar sistemas interoperables “del predio al plato” (ISO, 2020). En visibilidad de cadena y eventos de trazabilidad, GS1 EPCIS 2.0 y GS1 Digital Link proveen vocabularios y estructuras para intercambiar eventos y enlazar identificadores a la web semántica, con guías de implementación actualizadas en 2022–2024 (GS1, 2022; GS1 US, 2024). En IoT agro, la OGC SensorThings API establece un marco abierto, geoespacial y unificado para interoperar dispositivos, datos y aplicaciones (OGC, 2016/2021). En metadatos geoespaciales para capas agroambientales, ISO 19115 especifica el *schema* para describir datos y servicios (ISO, 2014/2003). Finalmente, la regulación internacional EUDR—Reglamento (UE) 2023/1115 sobre productos libres de deforestación exige diligencia debida, geolocalización de parcelas y sistemas de trazabilidad robustos para café, cacao, bovino,

aceite de palma, caucho, soja y madera, incidiendo directamente en las cadenas colombianas y demandando interoperabilidad con estándares globales (UE, 2023; KPMG, 2024; Pacto Mundial, 2024; Comisión Europea, 2025).

Tabla 1. Marco político y normativo nacional relevante para Agroindustria 4.0 (síntesis operativa)

Norma (año)	Objeto/alcance	Disposiciones clave aplicables a Agroindustria 4.0	Entidad líder
Ley 1876 (2017) - SNIA	Crea y organiza el SNIA; planes y subsistemas (investigación, extensión)	Reconoce rol de CTI y actualización del PECTIA; habilita articulación investigación-extensión-adopción	MinAgricultura
Ley 2294 (2023) - PND 2022-2026	Ejes de transformación productiva basada en conocimiento, conectividad, datos	Impulsa conectividad rural, datos como bienes públicos, servicios digitales	DNP/Presidencia
Decreto 1406 (2023) - SINRADR	Organiza SINRADR; modifica y adiciona D. 1071/2015	Priorización de actividades agro/agroindustriales; coordinación territorial para inversión	MinAgricultura
Resolución 355 (2021) - PIGCCS	Adopta PIGCCS para mitigación/adaptación sectoriales	Medidas de monitoreo, información y gestión del conocimiento	MinAgricultura
CONPES 4069 (2021) - Política CTI	Gobernanza y metas CTI 2022-2031	Fortalece capacidades, agendas misionales y enfoque territorial	DNP/MinCiencias
CONPES 3975 (2019) - Transformación Digital e IA	Uso estratégico de datos, IA y digitalización	Bases para IA sectorial, datos abiertos/compartidos y servicios digitales	DNP/MinTIC
CONPES 4144 (2025) - Lineamientos de IA	Lineamientos actualizados para adopción/uso de IA	Principios éticos, seguridad, casos sectoriales, talento	DNP

Norma (año)	Objeto/alcance	Disposiciones clave aplicables a Agroindustria 4.0	Entidad líder
Ley 1978 (2019) - Modernización TIC	Moderniza sector TIC y regula espectro	Mejora condiciones institucionales para conectividad	MinTIC
Ley 1712 (2014) + Res. 1519 (2020)	Transparencia, acceso a la información; criterios de publicación y datos abiertos	Basamento para gobernanza de datos y datos abiertos en el Estado	MinTIC
Ley 2056 (2020) - SGR	Reglas de asignación y uso de regalías	Financiación de CTI, conectividad, infraestructura	DNP
Ley 2046 (2020) - Compras públicas locales	Promueve compras públicas a pequeños productores/ACFC	Incentiva trazabilidad, calidad y formalización digital de oferta	Congreso/Entidades compradoras

4. Institucionalidad

La institucionalidad que habilita la Agroindustria 4.0 en Colombia se estructura sobre el SNIA como andamiaje sectorial (Ley 1876 de 2017), complementado por la normatividad vigente y descrita en el apartado anterior. En tal sentido, este marco integra funciones de planificación (Unidad de Planificación Rural Agropecuaria - UPRA), información territorial (Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC), estadística oficial (Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE), sanidad e inocuidad (Instituto Colombiano Agropecuario - ICA, Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos - INVIMA), extensión (Agencia de Desarrollo Rural - ADR/Entidad Prestadora del Servicio de Extensión Agropecuaria - EPSEA), I+D+i y gestión del conocimiento (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA) y fomento/financiamiento (Finagro y Banco Agrario), además de internacionalización (MinCIT/ProColombia) (Congreso de Colombia, 2017; DNP, 2021; DNP, 2019; DNP, 2025; MinTIC, 2023; Función Pública, 2023; IGAC, 2023; DANE, s. f.; ICA, 2008; INVIMA, 2023; Banco Agrario, 2025).

En el SNIA, el MinAgricultura ejerce rectoría y coordina la extensión con la ADR; las EPSEA son el brazo operativo para la adopción de tecnologías 4.0 en territorio, apoyadas por

Siembra, Linkata y BAC como plataformas soporte al Subsistema Nacional de Extensión Agropecuaria (SSNEA) administradas por AGROSAVIA (AGROSAVIA, 2022; Linkata, 2025).

10

La planificación y los datos espaciales descansan en la UPRA, con SIPRA para planificación rural agropecuaria y SIGRA para riesgo agroclimático, y en el Catastro Multipropósito liderado por IGAC, que provee referencia predial interoperable esencial para trazabilidad y focalización de inversiones (UPRA, s. f.; IGAC, 2023).

La estadística oficial agropecuaria, a cargo del DANE, alimenta tableros, encuestas y otra serie de insumos para análisis productivo y de mercados; por su parte, el ICA regula y vigila la sanidad agropecuaria (MSF) y el INVIMA la IVC de alimentos (Plan 2021–2026), ambos con funciones clave para la trazabilidad e inocuidad digital (DANE, s. f.; INVIMA, 2023).

Como habilitadores digitales, MinTIC y DNP orientan la gobernanza y apertura de datos, seguridad digital y talento, a través del CONPES 3975, la Resolución 1519/2020 y la Estrategia Nacional Digital 2023–2026; el CONPES 4144/2025 fija los principios para IA confiable y sus aplicaciones sectoriales (DNP, 2019, 2025; MinTIC, 2020, 2023).

Finalmente, el fomento y la financiación a la modernización (automatización, sensórica, eficiencia energética y digitalización) se instrumentan mediante líneas especiales de crédito (LEC) y los fondos de garantía (FAG) de Finagro y líneas del Banco Agrario para maquinaria, equipos e infraestructura, con énfasis en modernización de plantas y activos 4.0 (Finagro, 2023/2025; Banco Agrario, 2024/2025).

Así mismo, las iniciativas relacionadas con la Agroindustria 4.0 en Colombia muestran una articulación entre entidades públicas y gremiales orientadas a la transformación digital, la sostenibilidad y la innovación tecnológica en cadenas productivas estratégicas. Desde el sector público, el MinAgricultura impulsa la gestión integrada de información y el fortalecimiento de la infraestructura digital rural mediante el Sistema Nacional Unificado

de Información Rural Agropecuaria (SNUIRA); el MinTIC definió lineamientos estratégicos para identificar brechas tecnológicas y priorizar la investigación agropecuaria; y el MinAmbiente promueve negocios verdes y proyectos agroindustriales sostenibles como parte de la adaptación al cambio climático. Estas acciones configuran un marco transversal para avanzar hacia una agricultura más competitiva, digitalizada y sostenible.

11

En el ámbito gremial, los esfuerzos se concentran en investigación, adopción tecnológica y servicios de valor agregado. Asocaña y Cenicaña avanzan en innovación aplicada a caña de azúcar con programas de I+D, transferencia tecnológica y servicios agroclimáticos. Fedearroz fortalece la competitividad arrocera con centros de investigación, plantas de semilla certificada y servicios de maquila, mientras que la Federación Nacional de Cafeteros (FNC) potencia la cadena cafetera a través de conectividad rural, infraestructura moderna y la Cédula Cafetera Inteligente. Finalmente, Fedepalma, con apoyo de Cenipalma y Tecnopalma, concentra inversión en desarrollo tecnológico y digitalización de procesos industriales, destacando la implementación de software especializado para el monitoreo en tiempo real. En conjunto, estas acciones reflejan la consolidación de un ecosistema agroindustrial que integra ciencia, tecnología y sostenibilidad.

Tabla 2. Actores y funciones en el marco de la agroindustria

Actor	Rol en Agroindustria 4.0	Anclaje normativo/político	Capacidades/activos relevantes
MinAgricultura	Rectoría sectorial y del SNIA; lineamientos del Factor	Ley 1876/2017; Normativa SNIA	Dirección SNIA; articulación con ADR y centros de investigación.
MinCiencias	Política de CTI e instrumentos de I+D+i	CONPES 4069/2021	Convocatorias y agendas misionales sectoriales.
DNP	Coordinación CONPES; lineamientos de IA	CONPES 4144/2025	Gobernanza intersectorial, métricas y seguimiento.
MinTIC	Gobierno Digital, datos y seguridad; conectividad	CONPES 3975/2019; Res. 1519/2020; END 2023-2026	Apertura/interoperabilidad de datos; talento y seguridad digital.

Actor	Rol en Agroindustria 4.0	Anclaje normativo/político	Capacidades/activos relevantes
UPRA	Planificación y geointeligencia	SIPRA; SIGRA	Aptitud, ordenamiento productivo y riesgo agroclimático.
IGAC	Catastro Multipropósito (referencia predial)	Política catastral	Integración predial para focalización e interoperabilidad.
DANE	Estadística oficial agropecuaria	Funciones misionales	Encuestas/operaciones agro; tableros y metadatos.
ICA	Sanidad agropecuaria (MSF)	D. 4765/2008	Vigilancia/regulación sanitaria vegetal y animal.
INVIMA	Inocuidad de alimentos (IVC)	PNIVC 2021–2026	Fiscalización sanitaria y guías técnicas.
ADR / EPSEA	Extensión y adopción tecnológica en territorio	Res. 0422/2019 y actos modificatorios	Habilitación EPSEA; operación PDEA/PIDARET.
AGROSAVIA	I+D+i y transferencia (Siembra, Linkata, BAC)	Funciones misionales	Plataformas de conocimiento y redes de práctica.
Finagro / FAG	Fomento y garantías	Manual/LEC; FAG	Subsidio a tasa, garantías y líneas verdes/digitales.
Banco Agrario	Crédito de primer piso	Portafolio 2024–2025	Maquinaria, equipos e infraestructura productiva.
MinCIT / ProColombia	Internacionalización y encadenamientos	D. 1074/2015; misión institucional	Promoción de exportaciones y capacidades para mercados.

Arreglos de gobernanza y coordinación

Se propone un Esquema de Gobernanza Agroindustria 4.0 con tres niveles: i) Dirección: MinAgricultura, MinCiencias, MinTIC y DNP (alineados con CONPES 4069, 3975 y 4144); ii) Gestión técnico-operativa: UPRA, IGAC, DANE, ICA, INVIMA, ADR, AGROSAVIA, MinCIT/ProColombia, Finagro/Banco Agrario; iii) Territorio y cadena: gobernaciones/secretarías, EPSEA habilitadas, gremios y centros de investigación por cadena. Este arreglo se ancla en el SNIA y se coordina con el SINRADR para articular inversiones y servicios a escala territorial (Congreso de Colombia, 2017; Función Pública, 2023).

5. Análisis de demandas

De las 8.069 demandas identificadas entre 2017–2024 de la Agenda I+D+i, 831 tienen relación con Agroindustria. La concentración temática se ubica en “Manejo de cosecha, poscosecha y transformación” (337 demandas) y “Socioeconomía, mercadeo y desarrollo empresarial” (127 demandas). Esto refleja que las prioridades del sector no solo están en la producción primaria, sino en garantizar la reducción de pérdidas poscosecha, el fortalecimiento de procesos de valor agregado y el acceso eficiente a mercados, lo cual resulta determinante para mejorar la competitividad nacional e internacional. En un segundo nivel, se destacan áreas como manejo ambiental y sostenibilidad (65 demandas), material de siembra y mejoramiento genético (59) y calidad e inocuidad de insumos y productos (53), que ponen de manifiesto la importancia de incorporar criterios de sostenibilidad, seguridad alimentaria y adaptación al cambio climático en las estrategias agroindustriales. De igual manera, las demandas en capacitación, transferencia de tecnología e innovación (49-53) muestran la necesidad de fortalecer el capital humano y la extensión tecnológica para garantizar la adopción de innovaciones en los territorios. Finalmente, áreas como fisiología animal y vegetal apenas registran una demanda, lo que indica que, si bien son relevantes en investigación básica, no constituyen necesidades inmediatas frente a los retos actuales de la agroindustria.

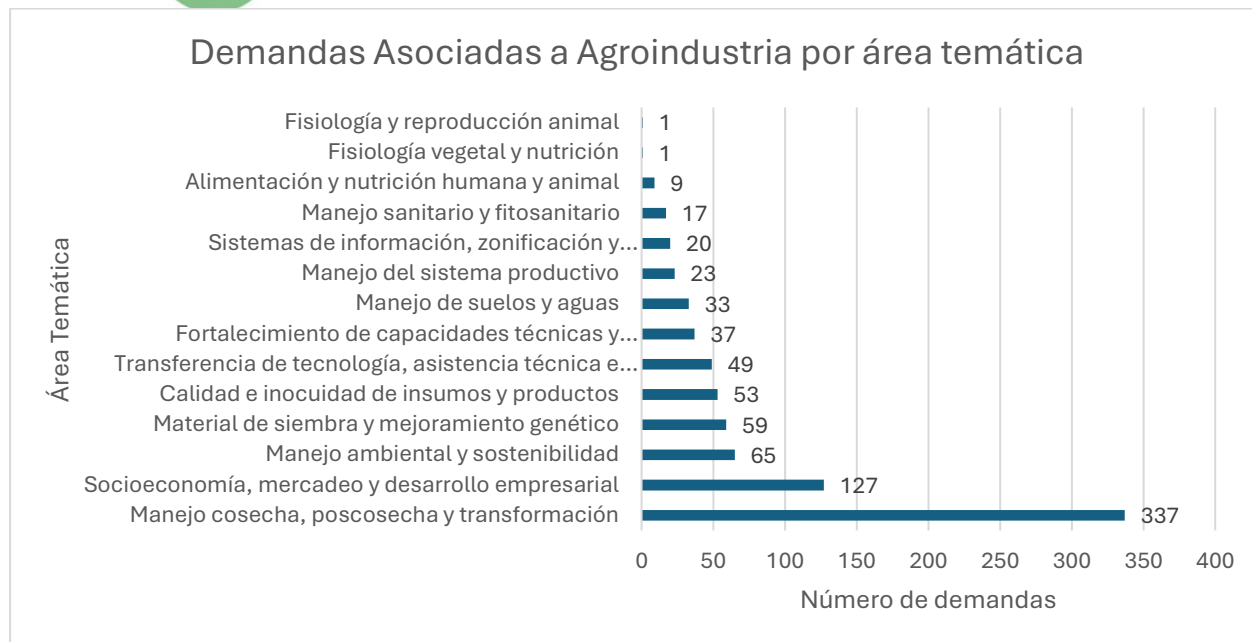


Figura 1. Distribución de demandas por área temática (2017–2024)

En función de la distribución de demandas por cadenas productivas asociadas con la agroindustria, se evidencia una concentración en los sistemas de frutales (88 demandas) y hortalizas (86 demandas), seguidos por acuicultura y pesca (51), café (49) y plátano (45). Este resultado indica que los sectores hortofrutícola, pesquero y cafetero concentran la mayor presión de innovación y atención tecnológica, lo cual es coherente con su relevancia económica, exportadora y de seguridad alimentaria en Colombia. En un segundo nivel aparecen cadenas como panela (40 demandas), cacao (38), palma de aceite (33) y aguacate (29), que se perfilan como productos estratégicos para la generación de valor agregado, diversificación de mercados y desarrollo de bioproductos. También destacan las plantas aromáticas y medicinales (28 demandas) y la yuca y ñame (28), que reflejan un interés en cultivos alternativos y de importancia regional con potencial agroindustrial y exportador.

Finalmente, en cuanto a la distribución territorial de las demandas asociadas con la agroindustria en Colombia, los departamentos con mayor número de demandas son Antioquia (80), Cundinamarca (61) y Córdoba (60), seguidos por Meta (55), Santander

(52) y Boyacá (44). Estos resultados reflejan la concentración de necesidades técnico-científicas en regiones con fuerte vocación agroindustrial y productiva, lo cual coincide con su peso económico y su rol estratégico en cadenas como café, frutas, hortalizas, cacao y ganadería. En un nivel intermedio aparecen departamentos como Chocó (43), Valle del Cauca (42), Tolima (40), Norte de Santander (39), Casanare (35) y Cauca (34). Este grupo incluye tanto regiones con amplia tradición agrícola como zonas con retos estructurales asociados con la conectividad, la transformación productiva y la inclusión de pequeños productores en la cadena de valor. La presencia de estas demandas indica la necesidad de enfoques diferenciados de política pública, con énfasis en cerrar brechas tecnológicas y logísticas.

6. Tendencias en el mundo y en Colombia

La transformación 4.0 de las agroindustrias se está acelerando por seis vectores globales: (i) analítica e IA en campo y planta, (ii) sensórica/IoT y gemelos digitales, (iii) automatización y robótica en procesamiento de alimentos, (iv) trazabilidad digital y gobernanza de datos, (v) servicios climáticos y gestión de riesgos con geointeligencia, y (vi) sostenibilidad regulatoria (p. ej., EUDR) que impulsa inversiones en trazabilidad y monitoreo. Estas tendencias, observadas en literatura científica reciente y en políticas internacionales, condicionan la competitividad y la inserción en mercados exigentes (Wang et al., 2024; Escribà-Gelonch et al., 2024; Guebsi et al., 2024; Pang et al., 2024; McKinsey, 2024).

6.1. Contexto internacional

En cuanto a las tendencias tecnológicas, diversas fuentes señalan la adopción acelerada de soluciones como precisión agronómica, agricultura vertical, agricultura regenerativa, biotecnología y robo-automatización como vectores de cambio en el sector (Kadence, 2024). Estas tecnologías permiten maximizar el uso del agua, optimizar insumos y apoyar modelos urbanos-productivos más eficientes (Kadence, 2024). Del mismo modo, una investigación global revisó la aplicabilidad de tecnologías de Industria 4.0—como IA, IoT, Cadena de bloques y robótica—en la agricultura y ganadería, constatando sus efectos

positivos en acceso a información, previsiones agronómicas, mercados y capacitación (Pletsch et al., 2024).

El valor de mercado de la Agroindustria 4.0 y la agricultura digital también registra un crecimiento notable. Se estima que en 2024 el mercado global de agricultura digital superó los USD 22 mil millones, con una tasa anual compuesta (CAGR) superior al 11 % entre 2024 y 2032 (GM Insights, 2023). Otras cifras proyectan que el mercado de agricultura digital podría alcanzar USD 39.8 mil millones para 2029 (MarketsandMarkets, 2024). En paralelo, las tecnologías IoT han crecido exponencialmente en el agro: el IoT agrícola alcanzó los USD 13.6 mil millones en 2022, proyectándose un valor de USD 33.6 mil millones para 2032 (Keenethics, 2024).

Desde la experiencia empírica directa, una encuesta global de McKinsey (2024) reveló que los agricultores dan prioridad creciente al uso de tecnologías para elevar la rentabilidad frente a eventos climáticos extremos, especialmente en Europa y América Latina. Estos hallazgos revelan que, aunque los riesgos climáticos se intensifican, también crece la disposición a incorporar innovación digital como respuesta estratégica.

La adaptación al cambio climático es otra dimensión donde la digitalización ha demostrado potencial: tecnologías como sensores IoT, sistemas de monitoreo remoto y algoritmos predictivos permiten anticipar y mitigar riesgos climáticos, contribuyendo tanto a la adaptación como a la mitigación. Así mismo, Australia se posiciona como uno de los laboratorios vivos de Agroindustria 4.0, con importantes inversiones en sensores y aplicaciones para monitoreo ganadero, tecnologías para captura de carbono en suelos (microbios), y polinizadores robóticos. Además, el país ha avanzado en infraestructura digital rural con incentivos y formación para productores, colocándose como referente global en innovación práctica (Financial Times, 2025).

La trazabilidad digital y la sostenibilidad también cobran relevancia global con esfuerzos regulatorios como la legislación emergente de la UE que exige geolocalización del origen

de productos para prevenir la deforestación, impulsando herramientas digitales de seguimiento desde el campo hasta el consumidor (Wired, 2024). Estas políticas catalizan soluciones como mapeo geoespacial abierto (*OneMap*), financiamiento climático digital y pagos móviles para productores, fortaleciendo cadenas de valor éticas y transparentes (Wired, 2024).

17

Finalmente, en materia de tecnologías emergentes, las tecnologías IoT avanzan con sensores biodegradables para monitoreo de nutrientes en hoja y suelo, combinados con robótica aérea y terrestre, que ofrecen data crítica en tiempo real. A pesar de los desafíos como conectividad rural, costos y análisis de datos, estas tecnologías prometen transformar la agricultura hacia un modelo más inteligente y sostenible (Business Insider, 2025).

6.2. Tendencias globales

- **IA aplicada y explicable (XAI) en agroindustrias y cadenas alimentarias.** En 2024–2025 se consolidan revisiones y estudios que muestran ganancias en monitoreo predictivo, control de calidad, y detección de peligros (p. ej., micotoxinas), con énfasis en interpretabilidad para adopción por parte de técnicos y productores. En planta, visión computacional y HSI integradas con IA muestran eficiencias de clasificación y aseguramiento de inocuidad; en campo, XAI mejora la comprensión de variables agroclimáticas críticas para el rendimiento (Zatsu et al., 2024).
- **Gemelos digitales, IoT y cómputo en el borde.** Se documentan gemelos digitales de cultivos, invernaderos y operaciones de riego/fertilización, con ahorros directos de agua, fertilizantes y fitosanitarios; el edge-AI reduce latencia y dependencia de la nube, habilitando control local y resiliencia operativa (Wang et al., 2024; Escribà-Gelonch et al., 2024).

- **UAV/teledetección y agricultura de precisión:** se ha observado madurez en aplicaciones con drones para monitoreo de vigor, sanidad y mapas de prescripción, con desafíos en estandarización y escalabilidad (Guebsi et al., 2024).
- **Automatización y robótica en procesamiento de alimentos.** Se reportan avances en manipulación, pick-and-place, inspección visual y trazabilidad en líneas cárnicas y de alimentos, con mejoras en productividad, inocuidad y bienestar laboral (Liberty et al., 2024; Lyu et al., 2025).
- **Trazabilidad y gobernanza de datos.** GS1 ratificó **EPCIS/CBV 2.0 (2023)**, base para interoperabilidad de eventos (KDE/CTE) a lo largo de cadenas; en paralelo, la UE despliega el Common European Agricultural Data Space (CEADS) desde 2025, con lineamientos técnicos y de gobernanza para intercambio seguro y confiable de datos agroalimentarios (GS1, 2023).
- **Sostenibilidad regulatoria y acceso a mercados (EUDR).** La Regulación de la UE sobre productos libres de deforestación postergó su entrada en aplicación hasta 30-dic-2025 (grandes/medianas empresas) y 30-jun-2026 (MyPEs).

6.3. Contexto nacional

Colombia ha consolidado un ecosistema de innovación agropecuaria que articula capacidades públicas y gremiales —AGROSAVIA, centros sectoriales como Cenicaña y Cenicafé, y organizaciones como Fedearroz— con plataformas de información y extensión del **SNIA** (BAC, Siembra, Linkata), que hoy operan como infraestructura de conocimiento para productores y extensionistas (AGROSAVIA, 2025; AGROSAVIA, 2025b). Estas iniciativas han migrado progresivamente hacia modelos de servicios digitales (boletines agroclimáticos, sistemas expertos, trazabilidad y capacitación virtual), habilitando decisiones sitio-específicas y un escalamiento más eficiente de la asistencia técnica (Cenicaña, 2025; Fedearroz, 2025; DANE, 2024).

En materia de conectividad, la base para la Agroindustria 4.0 muestra avances, pero con brechas urbano-rurales persistentes. Según la Encuesta de TIC en Hogares 2024, el 65,6 % de los hogares del país reportó conexión a Internet, con mayores tasas en cabeceras y rezagos en áreas rurales dispersas (DANE, 2025). En Internet móvil, el país cerró el 1T-2025 con 49,1 millones de accesos y cobertura poblacional del 92 %; 4G concentró el 83 % de las conexiones y 5G llegó al 9,6 % (MinTIC, 2025a). No obstante, a marzo de 2025 solo 2,46 % de los municipios reportaban cobertura 5G, lo que evidencia el carácter todavía incipiente del despliegue (MinTIC, 2025b). En paralelo, el Plan Nacional de Conectividad Rural prioriza inversión e infraestructuras comunitarias para cerrar brechas de última milla en zonas apartadas (MinTIC, 2024).

En adopción tecnológica sectorial, conviven experiencias maduras y pilotos. En caña de azúcar se reporta el uso de RTK/GNSS, servicios agroclimáticos y un Sistema Experto de Fertilización, integrados a aplicaciones y boletines digitales de alcance nacional (Cenicaña, 2025). Fedearroz, por su parte, ha institucionalizado herramientas de agricultura de precisión (estaciones RTK, piloto automático y nivelación), con impactos en eficiencia operativa y costos (Fedearroz, 2025). En café, se documentan prototipos de IoT/edge y modelos predictivos para variables agroambientales y manejo productivo, junto con revisiones recientes sobre IA en caficultura (Osimani, 2025; Hernández-Salazar et al., 2024). Además, desde el sector estadístico oficial, el DANE opera metodologías de teledetección e IA para estimar áreas cultivadas (arroz, papa, piña y maíz), reduciendo costos y tiempos de levantamiento (DANE, 2024). (Cenicaña, 2025; Fedearroz, 2025; Osimani, 2025; Hernández-Salazar et al., 2024; DANE, 2024).

A pesar de estos progresos, persisten desafíos estructurales para la masificación de la Agroindustria 4.0: i) brechas de conectividad rural de calidad (ancho de banda y latencia), visibles en la lenta expansión de 5G en municipios; ii) asimetrías de capacidades digitales en productores y extensionistas, que condicionan el retorno de inversión en IoT y analítica; iii) fragmentación de datos y baja interoperabilidad entre plataformas públicas y privadas; y iv) costos de adopción y sostenibilidad operativa de soluciones,

especialmente en micro y pequeños productores (DANE, 2025; MinTIC, 2025b; AGROSAVIA, 2025).

6.4. Tendencias en Colombia

20

- **Estadística e IA aplicada a áreas cultivadas.** El DANE incorporó IA y teledetección para estimación de áreas en arroz, papa, piña y maíz, reduciendo costos y riesgos operativos y mejorando calidad de datos oficiales (DANE, 2024).
- **Trazabilidad para acceso a la UE.** La Federación Nacional de Cafeteros (FNC) lanzó servicios/plataformas para georreferenciación de lotes cafeteros como requisito para EUDR, facilitando a exportadores la verificación de no-deforestación (FNC, 2024).
- **I+D y transferencia sectorial.** Cenicaña anunció SEF 3.0 (Sistema Experto de Fertilización) e integra herramientas de análisis de suelos/tejidos y servicios de agrometeorología (Meteoportal), habilitando decisiones de nutrición con soporte digital; DataCane y capacitación técnica fortalecen adopción (Cenicaña, 2024–2025).
- **Agricultura de precisión en gremios.** Fedearroz impulsa uso de RTK y piloto automático en lotes arroceros, complementando esfuerzos de teledetección y prescripciones (Fedearroz, 2022–2024).
- **Geointeligencia para riesgos y ordenamiento.** UPRA publica boletines agroclimáticos con señalización espacial de riesgos (SIGRA) y mantiene SIPRA como base para planificación productiva; IGAC reporta avances del Catastro Multipropósito, habilitando referencia predial para trazabilidad (UPRA, 2025; IGAC, 2025).
- **Brechas y adopción.** La literatura internacional muestra que la adopción de tecnologías 4.0 es sensible al tamaño de la empresa/escala, infraestructura y retorno esperado, patrón consistente con la heterogeneidad productiva del país; esto exige modelos de negocio y fomento diferenciados (McKinsey, 2024).

7. Análisis DOFA

El análisis DOFA enmarca la adopción de Agroindustria 4.0 en Colombia a partir de las tendencias tecnológicas y el marco institucional–normativo. Identifica como fortalezas las capacidades de I+D, extensión y formación, y la expansión de conectividad; como debilidades, brechas de interoperabilidad OT/IT, gestión de datos, talento especializado y disparidades territoriales. Entre las oportunidades resaltan la trazabilidad regulatoria y la madurez de estándares/soluciones digitales; y como amenazas, la ciberseguridad industrial, la variabilidad climática y los costos logísticos/regulatorios.

21

7.1. Fortalezas

- a) Marco público habilitante para digitalización y datos (p. ej., lineamientos para un SNUIRA y políticas TIC), que favorece colaboración interinstitucional e integración de tecnologías de trazabilidad y control de procesos en planta.
- b) Infraestructura de conocimiento del SNIA: Siembra y la vigilancia/IC como soporte de contenidos técnicos, estándares y buenas prácticas para operaciones de agroindustria.
- c) Conectividad móvil en expansión (4G/5G) que habilita edge-analytics e IoT industrial en clústeres agroindustriales (MinTIC, 2025).
- d) Estadística oficial con IA (estimación de áreas cultivadas) que mejora planeación de abastecimiento y gestión de capacidad de planta (DANE, 2024).
- e) La diversa capacidad productiva que puede adoptar tecnologías 4.0 para responder las necesidades de mercados internacionales.
- f) Fortalecimiento de la ética frente al uso y gestión de los datos en el marco del desarrollo 4.0 para el sector agropecuario, acuícola y pesquero.

7.2. Debilidades

- a) Fragmentación e interoperabilidad insuficiente: “poca disponibilidad de plataformas unificadas” y compatibilidad limitada de equipos/datos para integrar.

- b) Baja oferta y adaptación de soluciones 4.0 para agroindustrias y déficit de desarrollos de software para manejo de datos (predicción, geomática, vigilancia fitosanitaria) con impacto en control de procesos e inocuidad.
- c) Desactualización de programas académicos del sector agro en función de la agricultura 4.0 y 5.0
- d) Continuidad Frente a los procesos de Gestión del Conocimiento y Gestión de la información
- e) Fragmentación e interoperabilidad insuficiente: “poca disponibilidad de plataformas unificadas” y compatibilidad limitada de equipos/datos para integrar.
- f) Desarticulación institucional en territorio que dificulta seguimiento, evaluación y generación de indicadores para modernización agroindustrial.
- g) Brechas de capacidades y ausencia de pilotos demostrativos (formación, alfabetización digital, redes de I+D y EPSEA) con foco en requerimientos de planta.
- h) Conectividad y acceso a información insuficientes para monitoreo en tiempo real (calidad, inventarios, mantenimiento) en varios territorios.
- i) Limitadas capacidades sectoriales de I+D y servicios tecnológicos aplicados a procesos con potencial de transferencia hacia control el control del sistema productivo.
- j) No existe un monitoreo o vigilancia recurrente de los datos ni de la infraestructura generada por las organizaciones públicas y privadas del sector.
- k) Limitadas fuentes de financiación para tecnologías 4.0 y 5.0 en el sector agropecuario.
- l) Escasas empresas nacionales con capacidades para la producción y comercialización de tecnologías 4.0 para el agro.

- m) Alta tendencia al uso restrictivo de datos de interés sectorial por baja cultura, confianza y ética.
- n) Modelos de negocio poco accesibles para el fortalecimiento de la implementación de tecnologías 4.0 para el sector agropecuario, acuícola y pesquero.

7.3. Oportunidades

- a) Desarrollo/implementación de tecnologías Agroindustria 4.0 (automatización, analítica, trazabilidad, interoperabilidad) para innovar procesos de transformación.
- b) Democratización del conocimiento vía TIC (formación, contenidos, redes) para acelerar adopción en plantas y encadenamientos proveedor-industria.
- c) Ventana regulatoria para alistamiento EUDR: exigibilidad general inicialmente para grandes/medianas y posterior en MyPiMEs, habilitando tiempo para desplegar georreferenciación y trazabilidad en agroindustrias exportadoras.
- d) Conectividad 5G creciente que facilita telemetría de alta frecuencia y control en el borde (MinTIC, 2025).
- e) Rol del extensionista como facilitador de la transformación digital, a través de las experiencias previas desde la FNC y las EPSEA que son clave para articular proveedores de materia prima con requerimientos de planta (Acevedo-Silva, 2021).
- f) Aprovechar las plataformas e infraestructura, como también las capacidades instaladas de los proyectos o iniciativas realizadas.
- g) Aprovechar las capacidades técnicas científicas de la masa de investigadores, docentes y profesionales para fortalecer la extensión. Fortalecer las capacidades institucionales centradas en nuevas tecnologías con impacto en la generación de valor para el sector agropecuario.

- h) Promoción y uso de todas las bandas del espectro para implementar tecnologías 4.0 para el agro.
- i) Promover la participación de públicos diferenciados en la formulación de política pública en tecnologías 4.0 para el agro y la implementación de nuevas tecnologías.
- j) Fortalecer y promover experiencias exitosas para la generación de emprendimientos en el desarrollo de tecnologías 4.0 para el agro.
- k) Fortalecimiento de incentivos para la implementación de tecnologías 4.0 por parte de los diferentes actores de la cadena de valor en el sector agropecuario, acuícola y pesquero.

7.4. Amenazas

- a) Riesgo de pérdida de mercado por incumplimiento del EUDR en cadenas expuestas (café, cacao, palma, caucho, madera), dada la debida diligencia con geolocalización predial y reportes anuales.
- b) Ciberseguridad OT/IT: aumento documentado de incidentes con impactos en abastecimiento, inventarios y operación en alimentos (Campoverde-Molina et al., 2024)
- c) Volatilidad en adopción tecnológica por heterogeneidad empresarial y retorno esperado, que exige modelos de negocio y fomento diferenciados (McKinsey, 2024).
- d) Alto costo de plataformas, licencias e infraestructura para el desarrollo de procesos agroindustriales en el marco de tecnologías 4.0
- e) Generación de políticas internacionales que afecten la agroindustria y la implementación de tecnologías 4.0 para el agro (volatilidad de enfoques de políticas).

8. Avances en la implementación

En la versión 2017 del PECTIA no existía el capítulo de agroecología por lo que no hay avances relacionados con la implementación.

9. Propuesta de estrategias y Líneas de Acción

Estrategia 1 – Agroindustria

E1. Fortalecimiento de la infraestructura tecnológica y digital asociada con el sector agroindustrial, acuícola y pesquero

Líneas de acción	Meta	Indicador	Responsables	Fecha cumplimiento
A1.1. Ampliar cobertura y acceso de internet rural y plataformas digitales aplicadas a agroindustria	Cobertura de internet del 100% en cabeceras municipales y disponibilidad de red 5G en ciudades con clústeres agroindustriales priorizados en 2027	% de municipios con cobertura de internet	MinTIC, DNP, Gobernaciones, Alcaldías	2027
A1.2. Fortalecer sistemas de información integrados (trazabilidad, mercados, clima, sanidad, bioeconomía)	Fortalecimiento de la estrategia nacional de interoperabilidad con plataformas de datos del sector (SNUIRA)	Número de sistemas interoperables implementados	MinAgricultura, AGROSAVIA, UPRA, MinTIC, ICA, Gremios, Campo Innova, Instituciones de Educación Superior	2027
A1.3. Impulsar uso de IA, big data e IoT en cosecha, poscosecha, transformación y logística	Generación de 1 convocatoria para el desarrollo y fortalecimiento de aplicaciones en tecnologías 4.0 sectorial y al menos 1 piloto de automatización, sensórica y analítica en plantas de alimentos	Número de pilotos de soluciones digitales incluyendo sensórica, monitoreo en línea y analítica aplicada	MinAgricultura, AGROSAVIA, MinCiencias, Instituciones de Educación Superior, Empresas AgroTECH, MinTIC	2029

Líneas de acción	Meta	Indicador	Responsables	Fecha cumplimiento
A1.4. Fortalecer la publicación, difusión, uso y apropiación de datos abiertos agroindustriales	Datos abiertos disponible y actualizada con información del sector agropecuario, acuícola y pesquero	Número de datasets abiertos y consultas realizadas	DNP, MinAgricultura, MinCiencias, AGROSAVIA, MinTIC	2029
A1.5. Desarrollo de Lineamientos de ciberseguridad en información empresarial y tecnología operacional (OT/IT) en sistemas productivos agroindustriales	Desarrollo de una línea base para orientar un sistema de gestión de ciberseguridad agroindustrial.	Número de Línea base	MinAgricultura, MinTIC, MinDefensa, Gremios y empresas.	2029
A1.6. Fortalecer los sistemas de monitoreo para la toma de decisiones (usos de suelos, ambiente) con la adopción de tecnologías 4.0.	Una (1) estrategia de monitoreo	Número de estrategias	UPRA, AGROSAVIA, MinAgricultura, MinAmbiente	2027

Estrategia 2 - Agroindustria

E2. Desarrollo de capacidades científicas y tecnológicas de los actores asociados con el SNIA

Líneas de acción	Meta	Indicador	Responsables	Fecha cumplimiento
A2.1. Incrementar programas de formación multimodal en temáticas asociadas con agroindustria 4.0 y otras de interés agroindustrial como biotecnología, bioinformática y análisis de datos que integren a comunidades campesinas, étnicas y familiares, con enfoque diferencial e intersectorial, de género y generacional.	Implementación de al menos un programa de formación multimodal para el fortalecimiento de capacidades en tecnologías 4.0 con productores y extensionistas	Número de programas creados	MinEducación, Instituciones de Educación Superior, SENA, AGROSAVIA	2027

Líneas de acción	Meta	Indicador	Responsables	Fecha cumplimiento
A2.2. Fortalecer centros de investigación y laboratorios regionales	Fortalecimiento de 5 laboratorios de investigación, desarrollo e innovación relacionados con el sector agroindustrial, acuícola y pesquero.	Número de laboratorios con equipos especializados	MinCiencias, AGROSAVIA, SENA, Centro de investigación, Instituciones de Educación Superior, AUNAP	2027
A2.3. Consolidar programas de innovación abierta	Consolidación de 5 soluciones aplicadas a cadenas y líneas temáticas priorizadas	Número de proyectos de innovación desarrollados	MinCiencias, Instituciones de Educación Superior, Empresas, AGROSAVIA	2029
A2.4. Crear Red Nacional de Centros de Innovación Agroindustrial 4.0 y 5.0	Creación de 5 centros operativos para 2029	Número de centros activos	MinCiencias, Instituciones de Educación Superior, SENA, Gobernaciones, AGROSAVIA	2029
A2.5. Fortalecer la transferencia tecnológica de tecnologías 4.0 mediante la implementación de hojas de ruta sectoriales de I+D+i en agroindustria y la articulación con plataformas de información sectorial	Diseñar e implementar al menos 1 hoja de ruta sectoriales de I+D+i para organizaciones campesinas, cooperativas y asociaciones productivas en la implementación de tecnologías 4.0	Número de hojas de ruta diseñadas e implementadas	MinCiencias, MinAgricultura, SENA, AGROSAVIA, Instituciones de Educación Superior, DNP	2030

Estrategia 3 – Agroindustria

E3. Innovación en procesos de transformación de materias primas y generación de valor agregado

Líneas de acción	Meta	Indicador	Responsables	Fecha cumplimiento
A3.1. Aplicar I+D+i en empaques biodegradables, empaques inteligentes y nanotecnología para mejorar la conservación de productos en sistemas productivos priorizados	Desarrollo de 5 nuevos sistemas de empaque, conservación y transporte de productos agroalimentarios	Número de tecnologías de empaque y conservación desarrolladas	MinCiencias, AGROSAVIA, Empresas privadas	2029
A3.2. Desarrollar y aplicar tecnologías para reducir pérdidas poscosecha	Reducción del 20% de pérdidas en sistemas productivos priorizados	% de reducción de pérdidas	MinAgricultura, AGROSAVIA, ICA, Empresas, Cooperativas	2029
A3.3. Diseñar un Programa nacional de bioeconomía aplicada a agroindustria	Diseño de un programa de bioeconomía aplicada a la agroindustria con un mínimo de 5 líneas de desarrollo de bioproductos	Número de líneas tecnológicas activas	MinCiencias, MinAmbiente, AGROSAVIA	2029
A3.4. Desarrollar estrategias para transformación de materias primas que generen productos de alto valor agregado integrando innovación en sanidad e inocuidad, gestión de riesgos de la cadena, y tecnologías de diagnóstico rápido	Diseño y aplicación de 5 estrategias para transformación de materias primas que incluyan tecnologías de diagnóstico rápido	Número de estrategias desarrolladas	MinCiencias, Invima, Empresas privadas, AGROSAVIA	2029

Estrategia 4 - Agroindustria

E4. Desarrollo e implementación de Mercados inteligentes y comercio sostenible

Líneas de acción	Meta	Indicador	Responsables	Fecha cumplimiento
A4.1. Promover la formación en comercio electrónico agroindustrial	Desarrollo e implementación de al menos 1 curso de comercio electrónico para productores agropecuarios.	Número de productores formados	MinAgricultura, MinCIT, ProColombia, UPRA	2027

Líneas de acción	Meta	Indicador	Responsables	Fecha cumplimiento
A4.2. Establecer certificación digital en trazabilidad, inocuidad, sostenibilidad y huella de carbono	Establecimiento de un sistema certificado en cadenas exportadoras	Número de certificaciones digitales activas	ICA, Invima, ProColombia	2029
A4.3. Desarrollar programas piloto de mercados inteligentes basados en Cadena de bloques	Desarrollo e implementación de 1 piloto en mercados inteligentes basados en Cadena de bloques	Número de pilotos activos	MinAgricultura, MinTIC, MinCiencias, Empresas tecnológicas	2029
A4.4. Fortalecer y articular los sistemas y observatorios agroindustriales en mercados, inteligencia competitiva y vigilancia tecnológica	Creación de un Observatorio con énfasis en agroindustria 4.0, inteligencia competitiva y vigilancia tecnológica	Número de observatorios creados	MinAgricultura, AGROSAVIA	2027

Estrategia 5 – Agroindustria

E5. Promoción de la Sostenibilidad y resiliencia de la agroindustria con tecnologías 4.0

Líneas de acción	Meta	Indicador	Responsables	Fecha cumplimiento
A5.1. Implementar Tecnologías limpias en procesos agroindustriales	10 empresas con tecnologías limpias certificadas	Número de empresas certificadas	MinAmbiente, MinAgricultura, Cámaras de Comercio	2029
A5.2. Desarrollar modelos de negocio circulares y carbono neutro en sistemas productivos priorizados y de alto impacto ambiental	Desarrollo e implementación de 5 modelos operativos en sistemas productivos priorizados en regiones de interés	Número de modelos implementados	MinAgricultura, MinAmbiente, Gobernaciones, Empresas privadas, AGROSAVIA	2029
A5.3. implementar pago por servicios ecosistémicos vinculados a agroindustria	Desarrollo y aplicación de un esquema regional activo	Número de esquemas PSA aplicados	MinAmbiente, MinAgricultura, Gobernaciones	2029

Líneas de acción	Meta	Indicador	Responsables	Fecha cumplimiento
A5.4. Desarrollar un Programa nacional de adaptación agroindustrial al cambio climático	Desarrollo de 5 planes regionales de adaptación	Número de planes en ejecución	MinAmbiente, IDEAM, Gobernaciones, Empresas	2029
A5.5. Garantizar la financiación sostenible de acciones en Agroindustria 4.0.	Una (1) línea de financiación específica	Número de líneas financiadas	MinAgricultura, Minciencias, MinTIC, MinHacienda, MinCIT, MinAmbiente	2029

10. Agradecimientos:

Los autores de este capítulo expresan su reconocimiento a Alfonso Cubillos Varela de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria por sus aportes en el proceso de co-construcción. Adicionalmente, a Francisco Armando Salazar Alonso, Yehismi Lorena Perdomo Villamil, Diana Maritza García González, Adriana del Pilar Zambrano Muñoz y Rubiela Rincón Novoa por su participación en la elaboración de la versión anterior del documento. Sus contribuciones constituyeron un insumo valioso que sirvió de base para la presente actualización. Dicho trabajo previo permitió dar continuidad al proceso, integrar nuevas perspectivas y enriquecer la reflexión sobre los retos y oportunidades del sector.

32

11. Referencias

- Acevedo-Silva, F. A. S. (2021). Linkeando - Boletín del Extensionista Agropecuario (4.a ed.). AGROSAVIA.
- ADR. (2023). *Extensión agropecuaria – Cómo acceder al SPEA*. <https://www.adr.gov.co/>
- AGROSAVIA. (2022). AGROSAVIA y ADR capacitan en plataformas Siembra, Linkata y BAC. <https://www.AGROSAVIA.co/noticias/AGROSAVIA-y-adr-capacitan-en-plataformas-siembra-linkata-y-bac>
- AGROSAVIA. (2025a, agosto). *Encuentro Linkata Amazonas 2025: Extensión agropecuaria en la Amazonía*. <https://www.AGROSAVIA.co/noticias/encuentro-linkata-amazonas-2025-extensi%C3%B3n-agropecuaria-en-la-amazon%C3%ADa>
- AGROSAVIA. (2025b). *Academia AGROSAVIA – Oferta de cursos*.
- Ahmed, N., Khang, N. D., & Yuan, X. (2025). Advancing agriculture through IoT, Big Data, and AI: A review. *Discover Artificial Intelligence*, 5, 1000814. <https://doi.org/10.1016/j.dai.2025.1000814>

Banco Agrario de Colombia. (2025). Informe de gestión y sostenibilidad 2024; (2024–2025) Crédito para maquinaria y equipos agrícolas. <https://www.bancoagrario.gov.co/>

Business Insider. (2025). Farmers are using IoT to take the guesswork out of growing.

Campoverde-Molina, M., et al. (2024). *Cybersecurity in smart agriculture: A systematic literature review*. *Computers & Security*.

CAST-IFT. (2023). *Food Traceability: Current Status and Future Opportunities (Issue Paper 71)*.

Cenicana. (2025). *Boletín informativo julio 2025; Sistema Experto de Fertilización; estación RTK y servicios agroclimáticos*. <https://www.cenicana.org/>

Cenicana. (s. f.). *Meteoportal – Red Meteorológica Automatizada (RMA)*. <https://www.cenicana.org/meteoportal/>

Colombia Productiva. (2025, enero 28). *Accede a códigos de barras y plataformas de autogestión, entregados por GS1 Colombia*. <https://www.colombiaproductiva.com/>

Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC). (2025, 27 de junio). *Análisis de infraestructura y cobertura móvil en Colombia*. <https://www.crc.com.gov.co/>

Comisión Europea. (2025). Documento de orientación del Reglamento (UE) 2023/1115 (EUDR). DG ENV/DG AGRI.

Congreso de Colombia. (2017). Ley 1876 de 2017 (Crea el SNIA). https://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1876_2017.html

Congreso de Colombia. (2020). Ley 2056 de 2020 (Sistema General de Regalías). https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Desarrollo%20Territorial/Portal%20Territorial/opdt/Ley_2056_de_2020.pdf

Congreso de Colombia. (2020b). Ley 2046 de 2020 (Compras públicas de alimentos a pequeños productores y ACFC). https://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_2046_2020.html

Congreso de Colombia. (2023). Ley 2294 de 2023. Plan Nacional de Desarrollo 2022–2026 “Colombia Potencia Mundial de la Vida”. https://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_2294_2023.html

Consejo Nacional de Política Económica y Social (2018). CONPES 3920. Política Nacional de Explotación de Datos (BIG DATA). Disponible en: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3920.pdf>

Consortia. (2025). *Consortio Colombia – portafolio de editoriales (Oxford, SAGE, T&F)*. <https://www.consortia.com.co/>

DANE. (2024, agosto 20). *Con IA el DANE identifica y estima áreas cultivadas en arroz, papa, piña y maíz*. <https://www.dane.gov.co/index.php/actualidad-dane/5799-con-ia-el-dane-identifica-y-estima-areas-cultivadas-en-arroz-papa-pina-y-maiz>

DANE. (s. f.). Estadísticas agropecuarias. <https://www.dane.gov.co>

Dankar, I., et al. (2022). 3D printing of food: Safety, materials and process control — A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(2), 1176–1200. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12900>

Departamento Administrativo de la Función Pública. (2021). *Decreto 248 de 2021*. <https://www.funcionpublica.gov.co/>

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2020). CONPES 3995: Política Nacional de Confianza y Seguridad Digital. <https://colaboracion.dnp.gov.co/cdt/Conpes/Econ%C3%B3micos/3995.pdf>

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2021). CONPES 4069: Política Nacional de CTI 2022–2031.

<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4069.pdf>

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2025). CONPES 4144: Lineamientos de política para el desarrollo, adopción y uso de la IA. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4144.pdf>

35

DNP. (2019). *CONPES 3975: Política Nacional para la Transformación Digital y la Inteligencia Artificial*.

https://normograma.MinTIC.gov.co/MinTIC/compilacion/docs/CONPES_DNP_3975_2019.htm

Duguma, A. L., et al. (2024). *How the Internet of Things technology improves agricultural production: A review*. *Artificial Intelligence Review*. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-11046-0>

Escribà-Gelonch, M., et al. (2024). *Digital Twins in Agriculture: Orchestration and Applications*. *Electronics*, 13(11), 2209. <https://doi.org/10.3390/electronics13112209>

FAO. (2022). *FAO Strategic Framework 2022–31*. FAO. (2022b). *Action Plan 2022–2025 for the implementation of the Strategic Framework*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/e47a387c-d8c6-4cd6-9cfb-9d78bd784ec1/content>

Fedearroz. (2025). *Herramientas de agricultura de precisión para el cultivo de arroz (RTK, piloto automático, drenajes y siembra de precisión)*. <https://fedearroz.com.co/es/servicios-al-arrocero/eventos-tecnicos-fedearroz-fna/herramientas-de-agricultura-de-precisi%C3%B3n-utilizaci%C3%B3n-de-estaci%C3%B3n-rtk-y-equipo-con-piloto-autom%C3%A1tico/herramientas-de-agricultura-de-precisi%C3%B3n-para-el-cultivo-de-arroz/> (fedearroz.com.co)

Federación nacional de cafeteros de Colombia, 2021 21 de agosto. Servicio de Extensión rural. <https://federaciondefeteros.org/wp/cedula-cafetera/>

- Fernandez Porras. 2021. Pronósticos del estado del tiempo. Nuevos productos de Cenicaña. *Revista Tenicaña*. 50,10-11
- Financial Times. (2025, Enero). How Australia became a test bed for the future of farming.
- Función Pública. (2023). Decreto 1406 de 2023 (organiza el SINRADR). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo>
- GM Insights. (2023). Digital Agriculture Market Size, Growth Outlook 2024–2032.
- GS1 Colombia. (2024). *Curso: Códigos 2D, una nueva dimensión de los códigos de barras*.
- GS1 Colombia. (s. f.). *Formación en estándares (RFID/EPC, códigos de barras, trazabilidad)*.
- GS1 US. (2024). Guías de implementación EPCIS/CBV. <https://ref.gs1.org/guidelines/epcis-cbv/>
- GS1. (2022). EPCIS 2.0 (estándar). <https://www.gs1.org/standards/epcis>
- GS1. (2023). *EPCIS & CBV Implementation Guideline (Release 2.0)*. <https://ref.gs1.org/>
- GS1. (2024). *2D Barcodes at Retail Point-of-Sale – Implementation Guideline*. <https://ref.gs1.org/>
- Guebsi, R., et al. (2024). *Drones in Precision Agriculture: A Comprehensive Review (2020–2024)*. *Drones*, 8(11), 686. <https://doi.org/10.3390/drones8110686>
- Heo, W., Kim, D., Kim, N., & Lee, D. (2024). A review on gas indicators and sensors for smart food packaging. *Foods*, 13(19), 3047. <https://doi.org/10.3390/foods13193047>
- Hernández-Salazar, C. A., Valencia-Rincón, J. A., & Barrera-González, M. I. (2024). Integración de la inteligencia artificial y la agricultura de precisión en la cadena del

café: Revisión sistemática. *Revista UIS Ingenierías*, 23(1), 1–29.
<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/15810>

IDEAM. (2025). *Anteproyecto/Planificación - modernización de la red hidrometeorológica*.

IGAC. (2023). Catastro Multipropósito. <https://igac.gov.co/catastro-multiproposito>

Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2008). Decreto 4765 de 2008 (Funciones).
<https://www.secretariassenado.gov.co>

INVIMA. (2023). Plan Nacional de IVC de Alimentos 2021–2026.
<https://www.invima.gov.co>

ISO. (2020). *ISO 22095:2020—Chain of custody—General terminology and models*.
<https://www.iso.org/standard/72532.html>

Kadence. (2024). 10 Trends to Watch in Agriculture in 2024 and Beyond.

Keenethics. (2024). Agriculture Technology Trends for 2024 and Beyond.

KPMG (2024). Actualización EUDR.

<https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmgsites/es/pdf/2024/11/tax-alert-actualizacion-eudr-reglamento-ue-deforestacion.pdf.coredownload.inline.pdf>

Krisnawijaya, N. N. K., et al. (2025). Implementing FAIR principles in data management systems in agriculture and food science. *Computers and Electronics in Agriculture*, 227, 109855. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109855>

Li, P., Yang, T., Liu, B., et al. (2024). Applications of food-packaging QR codes in information transmission toward food supply chains. *Trends in Food Science & Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104384> Liberty, J. T., et al. (2024). Advancing food manufacturing: Robotic. *Journal of Food Engineering*.
<https://sciencedirect.com/>

- Linkata. (2025). Red de extensionistas y asistentes técnicos. <https://linkata.co>
- Loaiza Gómez, L. F. (2020). Tecnopalma al servicio de los palmicultores colombianos. Boletín El Palmicultor, 581(Julio), 22. Recuperado a partir de <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmicultor/article/view/13196>
- Lyu, Y., et al. (2025). *Robotic and automated systems in meat processing. Frontiers in Robotics and AI.* <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/>
- MarketsandMarkets. (2024). Digital Agriculture Market Emerging Trends & New
- McKinsey & Company. (2024, 16 octubre). Global Farmer Insights 2024. <https://mckinsey.com/>
- MEN – Ministerio de Educación Nacional. (s. f.). *Contacto Maestro | Colombia Aprende.* (contactomaestro.colombiaaprende.edu.co)
- Miller, T., et al. (2025). The IoT and AI in agriculture: The time is now—A systematic review. *Sensors*, 25(9), 4123. <https://doi.org/10.3390/s25094123>
- Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación. (2021). *Plan estratégico del Programa Nacional de Ciencia y Tecnología Agropecuaria (2005–2015).*
- MinAgricultura. 2019. Plan Estratégico Sectorial 2019 -2022. Disponible en <https://bit.ly/3gAvCua>
- MinAgricultura. (2023). Decreto 1406 de 2023 (organiza el SINRADR; modifica y adiciona el D. 1071/2015). <https://faolex.fao.org/docs/pdf/col221438.pdf>
- MinCiencias. (s. f.). *Vigilancia tecnológica y/o inteligencia competitiva* (glosario). <https://minciencias.gov.co/> (minciencias.gov.co)
- MinCIT. (2020, septiembre 4). *Mipymes del país han ahorrado en códigos de barras gracias a Compra lo Nuestro.* <https://www.mincit.gov.co/> (Mincomercio)

- MinTIC – Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (2023). Estrategia Nacional Digital 2023–2026. https://www.MinTIC.gov.co/portal/715/articles-334120_recurso_1.pdf
- MinTIC. (2020). Resolución 1519 de 2020 (estándares para publicación de información y datos abiertos). https://normograma.MinTIC.gov.co/MinTIC/compilacion/docs/resolucion_MinTIC_1519_2020.htm
- MinTIC. (2023). *Estrategia Nacional Digital 2023–2026*. https://www.MinTIC.gov.co/portal/715/articles-334120_recurso_1.pdf
- MinTIC. (2023b). Política de Gobierno Digital (sitio informativo). <https://gobiernodigital.MinTIC.gov.co/692/w3-propertyvalue-47245.html>
- MinTIC. (2025). Banda Ancha Social – Plan de Conectividad Digital (documento técnico).
- Moreno, Y., Mantilla, E., Pretelt, Tatiana., Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite., Fedepalma., Bedoya, J., Sociedad de Agricultores de Colombia., Moreno, A., INALDE Business School., Montes, Peter., Quintero, C., Franco, R., González, A., Sereny, Ladislao., Franco, E. y Mendoza, M. (2020). *El agro y la agroindustria en Colombia*. Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. <https://sac.org.co/wp-content/uploads/2020/12/Libro-El-Agro-2020.pdf>
- Nettle, R., et al. (2025). Digiwork: How agriculture 4.0 is changing work for farm advisers and farmers. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1542007. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1542007>
- OCDE. (2022). *Rural Policy Review of Colombia 2022*. https://www.oecd.org/en/publications/rural-policy-review-of-colombia-2022_c26abeb4-en.html

- OECD. (2023). *Agricultural Policy Monitoring and Evaluation 2023—Colombia*. https://www.oecd.org/.../agricultural-policy-monitoring-and-evaluation-2023_b14de474-en/full-report/colombia_230d783a.html
- Open Geospatial Consortium (OGC). (2016/2021). SensorThings API—Part 1: Sensing. <https://docs.ogc.org/is/15-078r6/15-078r6.html> (docs.ogc.org)
- Organización Internacional de Normalización (ISO). (2014/2003). ISO 19115 – *Geographic information—Metadata*. <https://www.iso.org/standard/53798.html>; <https://www.iso.org/standard/26020.html> (ISO)
- Osimani, C. (2025). *Caficultor digital: Tecnologías 4.0 para producción de café mediante modelos predictivos*. *Tecnura*, 29(77), e22161. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/download/22161/20931/150555> (Revistas UDistrital)
- Ovalle Másmela, J., Romero-Perdomo, F., Ramírez-Beltrán, A. M., Moreno-Valderrama M. N., Jiménez-Guzmán A. M., Castillo-Galindo N. T., Santana-Medina J. J., Molano-Bernal L. C., Zambrano Muñoz A. P., Garavito-Arcos H. C., Yepes-Vargas L. A., Zambrano Muñoz A. P., Perdomo-Villamil Y. L., Salazar Alonso F. A., Rincón Novoa R., García González D. M., & Uribe Galvis, C. (2023). *Focos de ciencia, tecnología e innovación para el sector agropecuario colombiano*. Observatorio de Ciencia, Tecnología e Innovación del sector agropecuario colombiano (OCTIAGRO). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12324/39018>
- Pacto Mundial (2024). *Modificación de la fecha de aplicación del EUDR*. <https://www.pactomundial.org/.../reglamento-2023-115-.../> (Pacto Mundial)
- Palanisamy, Y., Kadirvel, V., & Ganesan, N. (2025). *Recent technological advances in food packaging: Sensors, indicators and AIDC*. *Food & Function*. <https://doi.org/10.1039/D4FB00296B>
- Pang, S., et al. (2024). *A survey on evaluation*

of blockchain-based agricultural traceability. Computers and Electronics in Agriculture.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108121>

Pletsch, A. L. B., Stenger, E. A. F., & Sehnem, S. (2024). The potential of Industry 4.0 technologies in transforming agricultural and livestock practices: A systematic review. *International Journal of Production Research*, December 2024.

ProColombia. (2025, marzo 27). *¿Qué es la VUCE en Colombia y cómo aprovecharla?*
<https://procolombia.co/>

RAP-E Región Central. (2025). *Sumercé.tienda*.

Ruta N Medellín. (s. f.). *Observatorio CTI – estudios de vigilancia e inteligencia.*
<https://info.rutanmedellin.org/observatorioci> (info.rutanmedellin.org)

SENA – Sofía Plus. (2025). *Oferta de programas – Inocuidad de alimentos y agroindustria (modalidad virtual).* <https://oferta.senasofiaplus.edu.co/>

Top, J., et al. (2022). Cultivating FAIR principles for agri-food data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 197, 106909.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106909>

Unión Europea. (2023). Reglamento (UE) 2023/1115 (EUDR, productos libres de deforestación). <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1115/oj/eng>

UPRA. (2025). *Boletín agroclimático – SIGRA 2025.* (upra.gov.co)

UPRA (s.f.). Avanza implementación de Sistema Nacional Unificado de Información Rural y Agropecuaria (SNUIRA). Disponible en:
<https://www.upra.gov.co/web/guest/sistema-nacional-unificado-para-la-informacion-rural-agropecuaria>

Vahdanjoo, M., et al. (2025). Digital transformation of the agri-food system. *Journal of Cleaner Production*. [https://doi.org/10.1016/S2214-7993\(25\)00017-7](https://doi.org/10.1016/S2214-7993(25)00017-7)

Verdouw, C. N., Tekinerdogan, B., Beulens, A., & Wolfert, S. (2021). Digital twins in smart farming. *Agricultural Systems*, 189, 103046. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2020.103046>

VUCE. (s. f.). *Servicios VUCE 2.0*. <https://www.vuce.gov.co/> ([vuce.gov.co](https://www.vuce.gov.co/))

Waldhans, C., Albrecht, A., Ibal, R., & Speck, M. (2024). App-based time-temperature indicator system for real-time shelf-life prediction in a pork sausage supply chain. *Food Control*, 168, 110935. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110935>

Wang, L., et al. (2024). *Digital Twins in Agriculture: A Review of Recent Progress*. *Electronics*, 13(11), 2209. <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/11/2209>

WIPO. (2025). *Technology and Innovation Support Centers (TISC) – Annual Report 2024*. <https://www.wipo.int/> ([WIPO](https://www.wipo.int/))

Wired. (2024). Digitization Beats Deforestation.

Yang, F., Zhang, M., Bhandari, B., & Liu, Y. (2020). Recent development in 3D food printing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*.

Zarbà, C., et al. (2024). *The innovative role of blockchain in agri-food systems*. *Trends in Food Science & Technology*, 144, 103271. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.103271>

Zatsu, V., et al. (2024). AI in the food industry. *npj Science of Food*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/> ([PMC](https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/))

Zhang, J., et al. (2024). *Meta-analysis assessing potential of drone remote sensing for NUE in crops*. *Remote Sensing*, 16(5), 838. <https://doi.org/10.3390/rs16050838>