

IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍAS DIGITALES (IA, IoT Y DRONES) EN EL
CULTIVO DE PAPA: ESTUDIO DE CASO APLICADO EN MUNICIPIOS DEL
ALTIPLANO CUNDIBOYACENSE

Elaborado por:

Carlos Stiven Pinilla Hernández - Esp. Gerencia de Proyectos

Luis Alejandro Almeciga Martínez - Esp. Gerencia de Proyectos

José Francisco Neuta Pinto - Esp. Gerencia de Ciberseguridad

Universidad EAN
Seminario de Investigación

Bogotá

27/10/2025

Planteamiento del Problema.

Antecedentes del problema.

La sobrepoblación y el cambio climático están causando grandes retos para la producción de alimentos. Esto ha obligado al sector agrícola a innovar, transformarse y buscar alternativas más eficientes y sostenibles de cultivar, optimizando cada vez más los recursos naturales, por consiguiente, las innovaciones tecnológicas se han ido desarrollando de la misma manera en el sector agropecuario diseñando herramientas que permiten a los agricultores optimizar sus recursos (Cambridge 2021), aumentar la productividad y reducir el impacto ambiental que generan los diferentes factores. Algunas de las tecnologías claves que están impulsando estas transformaciones son la Agricultura de precisión, drones, Inteligencia Artificial (Neethirajan 2023) y Big Data. Estas tecnologías están reformando la agricultura al permitir a los agricultores enfrentarse a desafíos globales como el cambio climático, la escasez de recursos y el aumento de la demanda de alimentos.

El sector agrícola en Colombia, a través del tiempo, ha tenido una transformación importante con el apoyo de la tecnología. En el 2024, la economía del país creció cerca de 1,7 %, y la agricultura fue crucial para este aumento, con 8,1 % en su valor agregado, según datos entregados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). El desarrollo de este sector también plantea grandes desafíos como la necesidad de optimizar la productividad, reducir costos, desigualdad y velar por la sostenibilidad.

En octubre de 2022, se publicó que la agricultura de precisión ya estaba siendo aplicada en Colombia para detectar enfermedades en los cultivos, generar mapas de estrés vegetal (por calor o falta de agua/nutrientes) y recopilar datos para tomar decisiones, especialmente en cultivos extensivos como la caña de azúcar y palma aceitera.

Por ejemplo: “Con una bomba de espalda ... se usan 200 litros de agua por hectárea... en contraste, con un dron esta actividad se puede reducir a 1 hectárea en 5 minutos” en el cultivo de caña

En diciembre de 2023, la Agencia de Desarrollo Rural (ADR) informó que se habían invertido 382 mil millones de pesos en proyectos productivos, adecuación de tierras, comercialización, asistencia técnica y asociatividad, beneficiando a unas 254 000 familias campesinas.

Esta inversión incluyó, por primera vez en 30 años, reposición de maquinaria y rehabilitación de 12 distritos de riego por valor de 75 500 millones.

A junio de 2024, se reportó que la ejecución de los proyectos de inversión del sector agropecuario era del 46,5 %, con corte al 21 de junio, dentro de una asignación de 8,58 billones de pesos para la vigencia 2024. Tres grandes proyectos (información y tecnología para la planificación del territorio agropecuario, apoyo al sistema financiero y gestión de información) presentaban una ejecución superior al 95 %.

En 2025, se destacó que sólo alrededor del 30 % de los productores agropecuarios en Colombia utilizaba tecnologías avanzadas para la gestión de cultivos y procesos productivos, muy por debajo del promedio regional. Se estima que el país “pierde hasta el 40 % de su potencial agrícola” por falta de tecnificación.

Estas evidencias muestran que la tecnificación en Colombia no es solo una tendencia, sino que se está materializando: la aplicación de drones y sensores para monitoreo y eficiencia hídrica, la inversión significativa en infraestructura y servicios tecnológicos rurales, y los retos evidentes en cuanto a la adopción por parte de los productores.

Descripción del problema.

La tecnificación en el sector agropecuario surge en Colombia debido a un desafío creciente que va en aumento y es la baja tasa de mano de obra calificada, especialmente en las zonas rurales. El principal motivo es que la mayoría de las personas, especialmente jóvenes se desplazan hacia las ciudades en busca de mejores oportunidades laborales y de educación, dejando en jaque las labores tradicionales del agro. Causando que los agricultores y ganaderos se enfrenten a una disminución en su producción. Recientemente, los gemelos digitales han sido planteados como una herramienta que integra estas tecnologías para crear réplicas virtuales de los sistemas productivos, facilitando la gestión predictiva y preventiva en la ganadería (Arulmozhi et al., 2024) La tecnificación en el sector agropecuario, no solo es una solución para la escasez de mano de obra, sino un desarrollo necesario para una agricultura más eficiente, compacta y sostenible. Aumentando la producción preservando los recursos naturales y disminuyendo el impacto ambiental

Pregunta de investigación.

¿Cuál es el impacto de la implementación de tecnologías basadas en inteligencia artificial, sensores IoT y drones sobre la productividad y sostenibilidad de los sistemas agropecuarios en el sector rural colombiano?

(Neethirajan, 2023; Sharma et al., 2020; Werkheiser, 2021).

Objetivos

Objetivo general

Analizar la implementación de inteligencia artificial, sensores IoT y drones en el cultivo de papa en municipios del altiplano cundiboyacense para identificar su impacto en productividad y sostenibilidad.

Objetivos específicos

1. Cuantificar los costos actuales de producción en papa asociados a fertilización e insumos, y estimar el porcentaje de reducción esperado mediante agricultura de precisión.
2. Identificar las principales barreras económicas, sociales y culturales que limitan la adopción de tecnologías digitales en los productores de papa
3. Evaluar la percepción de los productores sobre los beneficios de IA, IoT y drones en productividad y sostenibilidad, mediante encuestas y entrevistas.
4. Proponer un modelo de adopción tecnológica ajustado a las condiciones socioeconómicas del altiplano cundiboyacense, con metas de reducción de costos e incremento de rendimiento

Conveniencia de la Investigación

Diversos estudios destacan que la integración de tecnologías digitales en ganadería y agricultura no solo incrementa la productividad, sino que también mejora el bienestar animal y la sostenibilidad de los sistemas rurales (Neethirajan, 2023; Cambridge University Press, 2021; ScienceDirect, 2020).”

Resumen.

El presente estudio analiza el impacto de la implementación de tecnologías digitales como la inteligencia artificial (IA), los sensores IoT y los drones en el cultivo de papa en los municipios del altiplano cundiboyacense, región que concentra cerca del 40 % de la producción nacional de papa (DANE, 2023). El sector enfrenta actualmente altos costos de insumos (que han aumentado hasta un 35 % en los últimos cinco años), bajos niveles de tecnificación (solo el 20 % de los productores emplea herramientas digitales) y problemáticas asociadas a la disminución del rendimiento por hectárea, que ha caído de 25 a 22 toneladas en promedio debido al cambio climático y la degradación del suelo.

La investigación, con un enfoque mixto y alcance exploratorio descriptivo, se apoya en encuestas, entrevistas y análisis documental para evaluar la relación entre adopción tecnológica, productividad y sostenibilidad. El estudio busca evidenciar cómo la integración de tecnologías emergentes puede reducir hasta en un 20 % los costos de insumos, optimizar el uso del agua y fertilizantes, e incrementar la eficiencia productiva y ambiental del sistema agropecuario.

Planteamiento del problema

El cultivo de papa constituye uno de los pilares de la seguridad alimentaria y la economía rural en Colombia. De acuerdo con el DANE (2023), el país dispone de aproximadamente 130.000 hectáreas cultivadas, con una producción cercana a los 2,7 millones de toneladas anuales. El altiplano cundiboyacense concentra cerca del 40 % de esta producción, siendo una de las zonas más importantes a nivel nacional debido a sus condiciones agroclimáticas y su tradición agrícola.

A pesar de su relevancia, el sector papero enfrenta múltiples desafíos que amenazan su sostenibilidad y competitividad. Entre los principales problemas se encuentran el incremento del costo de los insumos agrícolas (con aumentos de hasta un 35 % en los últimos cinco años), la reducción del rendimiento promedio por hectárea, que ha pasado de 25 a 22 toneladas, y la alta dependencia de prácticas tradicionales de cultivo, lo que limita la eficiencia productiva. Asimismo, factores como el cambio climático, la variabilidad de lluvias, la erosión del suelo y la incidencia de plagas y enfermedades han intensificado las

pérdidas y reducido la rentabilidad de los pequeños productores, quienes representan más del 85 % de los agricultores del sector (Ministerio de Agricultura, 2024).

Frente a esta situación, la adopción de tecnologías digitales como la inteligencia artificial (IA), los sensores IoT y los drones agrícolas emerge como una alternativa estratégica para mejorar la productividad, optimizar el uso de recursos y promover prácticas sostenibles. Sin embargo, su implementación aún es limitada: solo alrededor del 20 % de los productores del país emplean herramientas tecnológicas avanzadas (FAO, 2024). Esto refleja una brecha tecnológica que impide aprovechar plenamente el potencial de estas innovaciones para transformar el sistema productivo y hacerlo más resiliente, eficiente y sostenible.

Uno de los principales retos económicos es el costo de fertilización, en la siguiente tabla muestra los costos de fertilización por hectárea de papa en septiembre de 2024, desglosados por tipo de insumo y su variación de precio en el semestre.

Tabla 1
Costos de fertilizantes por hectárea de papa (septiembre de 2024)

Insumo	Presentación	Precio Sep 2024	Variación Semestre	Costo/Ha Papa
Urea (46% N)	Bulto 50 kg	\$158,000	-4.2%	\$1,264,000
DAP (18-46-0)	Bulto 50 kg	\$188,000	-3.6%	\$752,000
Cloruro de Potasio	Bulto 50 kg	\$142,000	-2.1%	\$568,000
Triple 15	Bulto 50 kg	\$175,000	-1.7%	\$875,000
Total/Ha	—	—	—	\$3,459,000

- Los **fertilizantes evaluados** son: Urea (46% N), DAP (18-46-0), Cloruro de potasio y Triple 15.
- Cada uno se presenta en bultos de **50 kg**.
- Los precios por bulto varían entre **\$142.000 y \$188.000**.
- En promedio, los precios tuvieron una **reducción entre 1,7 % y 4,2 %** respecto al semestre anterior.
- El **costo total de fertilizantes por hectárea de papa** asciende a **\$3.459.000**.

Con la tabla anterior se puede concluir que, aunque los precios de los fertilizantes bajaron ligeramente durante el segundo semestre de 2024, el gasto por hectárea sigue siendo elevado, representando uno de los principales costos de producción para los agricultores paperos.

Tabla 2

Comparación de costos de producción de papa por hectárea en Colombia (2024)

AÑO	VARIEDAD	COSTO TOTAL HECTAREA	FUENTE
2018	PAPA CRIOLLA	\$ 15.600.000,00	FEDEPAPA
2018	PASTUSA	\$ 15.900.000,00	FEDEPAPA
2018	R12	\$ 17.600.000,00	FEDEPAPA
2022-2024	PROMEDIO NACIONAL	\$ 25.400.000,00	FEDEPAPA- PROGRAMA AGROPECUARIO

La Tabla 2 muestra la evolución de los costos de producción de papa por hectárea en Colombia entre 2018 y 2024. En 2018, los costos variaban entre \$15.600.000 para la papa criolla y \$17.600.000 para la variedad R12, según datos de Fedepapa. Sin embargo, el promedio nacional para el periodo 2022–2024 alcanza los \$25.400.000 por hectárea, lo que representa un incremento superior al 40 % en menos de seis años. Este aumento está asociado principalmente al alza en los precios de los fertilizantes, la mano de obra y otros insumos, así como a las afectaciones del cambio climático que reducen el rendimiento y encarecen la producción. En consecuencia, el cultivo de papa se ha vuelto más costoso y desafiante, especialmente para los pequeños productores, quienes enfrentan una menor rentabilidad y una creciente necesidad de adoptar tecnologías que optimicen recursos y reduzcan costos.

Innovación tecnológica como respuesta Estudios internacionales muestran que la adopción de drones, sensores IoT y sistemas de inteligencia artificial reduce costos de insumos en un rango del 15% al 30% (Embrapa, 2024; EFSA, 2021). Sin embargo, en Colombia la adopción es incipiente por falta de acceso a financiamiento, baja conectividad y limitaciones en capacitación técnica

Pregunta de investigación:

¿De qué manera la implementación de tecnologías digitales como la inteligencia artificial, los sensores IoT y los drones influye en la productividad y la sostenibilidad del cultivo de papa en el altiplano cundiboyacense?

Objetivos Objetivo general

Analizar la implementación de inteligencia artificial, sensores IoT y drones en el cultivo de papa en municipios del altiplano cundiboyacense para identificar su impacto en productividad y sostenibilidad.

Objetivos específicos

- Cuantificar los costos actuales de producción en papa asociados a fertilización e insumos, y estimar el porcentaje de reducción esperado mediante agricultura de precisión.
- Identificar las principales barreras económicas, sociales y culturales que limitan la adopción de tecnologías digitales en los productores de papa.
- Evaluar la percepción de los productores sobre los beneficios de IA, IoT y drones en productividad y sostenibilidad, mediante encuestas y entrevistas.
- Proponer un modelo de adopción tecnológica ajustado a las condiciones socioeconómicas del altiplano cundiboyacense, con metas de reducción de costos e incremento de rendimiento.

Justificación

Social

El fortalecimiento del cultivo de papa contribuye a la seguridad alimentaria y al bienestar de las familias campesinas. La incorporación de nuevas tecnologías puede motivar a los jóvenes a permanecer en el campo, reduciendo el fenómeno de migración rural-urbana.

Económica

Los altos costos de insumos son la principal limitación de la rentabilidad. La agricultura de precisión puede reducirlos hasta en un 30%, incrementando los márgenes de ganancia y haciendo más competitivo el cultivo en mercados nacionales e internacionales.

Ambiental

La adopción de tecnologías digitales permite optimizar el uso de agua y fertilizantes, reduciendo la contaminación de suelos y fuentes hídricas. Esto apoya los compromisos de Colombia frente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Académica El trabajo se enmarca en modelos internacionales reconocidos como el Technology Acceptance Model (TAM), la Difusión de Innovaciones de Rogers y el marco de sostenibilidad de la FAO. Aporta al desarrollo académico de la agricultura digital aplicada al contexto colombiano.

Marco Teórico

En el caso de Colombia, la agricultura enfrenta innumerables retos asociados al uso intensivo y a veces indiscriminado de insumos, el envejecimiento de la población campesina, el fenómeno de gentrificación y la necesidad de mayor competitividad en los mercados internacionales. La transformación digital del agro, a través de inteligencia artificial (IA), drones y sensores IoT, abre nuevas oportunidades para mejorar la sostenibilidad, reducir el impacto ambiental y generar mejores alternativas a las nuevas generaciones de productores. El cultivo de papa en Colombia tiene un origen ancestral vinculado a las comunidades indígenas andinas, y surge como un tubérculo domesticado por los aborígenes que habitaban la región andina principalmente en Colombia, Perú y Bolivia. Sin embargo, la tecnificación comenzó a intensificarse hacia mediados del siglo XX, con la introducción de semillas certificadas y la mecanización de labores agrícolas como la siembra y la cosecha (FAO, 2019). El cultivo de papa constituye uno de los ejes estratégicos de la agricultura nacional. Su importancia radica tanto en el aporte a la seguridad alimentaria como en la generación de empleo en regiones rurales. De acuerdo con Fedepapa (2023), la cadena productiva de la papa participa con aproximadamente el 1,4% del PIB agropecuario, y concentra un gran número de pequeños 7 productores que dependen directamente de su producción para subsistir. No obstante, el sector enfrenta retos significativos asociados a los altos costos de insumos, la dependencia de agroquímicos y la necesidad de mayor sostenibilidad en los sistemas productivos (MinAgricultura, 2022).

En los años ochenta y noventa se impulsaron programas de transferencia tecnológica orientados a incrementar la productividad mediante fertilización química y control fitosanitario, aunque esto derivó en una fuerte dependencia de insumos externos. Según Ríos et al. (2018), las mejoras logradas en productividad se vieron contrarrestadas por efectos ambientales negativos como la erosión de suelos y la contaminación de fuentes hídricas. En países como Perú y Bolivia, el proceso fue similar, aunque ellos conservaron un mayor énfasis en la preservación de variedades nativas, conservando una mayor resistencia a enfermedades.

Por otra parte la transformación digital en el agro ha sido conceptualizada bajo los enfoques de Agricultura 4.0 y 5.0, que implican la integración de tecnologías como inteligencia artificial (IA), internet de las cosas (IoT), big data, drones y plataformas de análisis avanzado. De acuerdo con Rejeb et al. (2022), la Agricultura 4.0 busca optimizar el uso de insumos mediante sistemas de precisión, mientras que la Agricultura 5.0 enfatiza la sostenibilidad, la reducción del impacto ambiental y la inclusión social. Sharma et al. (2020) señalan que la implementación de estas tecnologías puede mejorar la eficiencia en la gestión de cultivos entre un 15% y un 25%, dependiendo del contexto y la escala de aplicación. En Colombia, el interés por estas herramientas se ha incrementado gracias a programas impulsados por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA), que reconocen la necesidad de modernizar la producción agrícola para hacer frente a los desafíos del cambio climático y la globalización.

La inteligencia artificial (IA) ha demostrado un potencial significativo en la agricultura moderna, particularmente en el cultivo de papa. A través de algoritmos de aprendizaje automático y modelos de predicción, es posible anticipar brotes de plagas, fenómenos 8 climáticos y enfermedades, lo que permite implementar medidas preventivas más eficientes. Según Arulmozhi et al. (2024), el uso de gemelos digitales en sistemas agrícolas puede simular condiciones de cultivo y predecir resultados productivos, optimizando así la toma de decisiones. Neethirajan (2023) señala que la integración de IA en la agricultura de precisión puede aumentar la eficiencia hasta en un 30% al reducir el desperdicio de insumos y mejorar la gestión de recursos. En un análisis bibliométrico global, Slimani, El Mhamdi y Jilbab (2024) evidencian que las publicaciones sobre IA en el agro han crecido a una tasa anual superior al 20%, concentrándose en países líderes como China, Estados Unidos e India, lo cual refleja la relevancia de esta tendencia (p. 882)

El internet de las cosas (IoT) ha revolucionado el monitoreo agrícola mediante sensores que recogen datos en tiempo real sobre humedad del suelo, temperatura, radiación solar y estado nutricional de las plantas. Estos dispositivos permiten ajustar la aplicación de fertilizantes y pesticidas de acuerdo con las necesidades específicas de cada lote y cultivo. Un estudio publicado en la revista *Sensors* (2023) demuestra que el uso de sensores IoT en cultivos de papa puede reducir el consumo de agua hasta en un 25%, y mejorar los rendimientos en un 18%. En Colombia, iniciativas lideradas por AGROSAVIA han comenzado a implementar pilotos de agricultura de precisión que incluyen este tipo de tecnologías en fincas del altiplano cundiboyacense (AGROSAVIA, 2023). Kaur, Singh y Kumar (2024) resaltan que el IoT es la tecnología con mayor nivel de citación en Agricultura 4.0, por su capacidad de conectar datos de campo con plataformas de análisis avanzado, mientras que Singh, Tiwari y Chaturvedi (2024) proponen su integración con blockchain para garantizar trazabilidad y seguridad en entornos de agricultura climáticamente inteligente (p. 7).

También los drones agrícolas constituyen otra herramienta clave para la digitalización del sector agropecuario. Estos equipos permiten realizar monitoreo aéreo, mapas de vigor vegetativo mediante índices como el NDVI y aplicaciones precisas de agroquímicos. Según Embrapa (2024), la adopción de drones en cultivos de caña y soya en Brasil ha logrado reducir los costos de insumos en un 28% y disminuir la exposición de los trabajadores a productos químicos. La aplicación de pesticidas constituye una de las actividades más riesgosas dentro de la producción agrícola, especialmente en municipios con alta dependencia de estos insumos. Los riesgos no solo se relacionan con intoxicaciones agudas, que se manifiestan con síntomas como vómito, mareo, cefalea o dificultad respiratoria, sino también con efectos crónicos de largo plazo como daños neurológicos, trastornos reproductivos y alteraciones endocrinas. En el caso de Colombia, la Secretaría de Salud de Cundinamarca reportó en 2016 un brote en la vereda San Rafael, municipio de La Calera, donde 29 personas resultaron intoxicadas tras la fumigación en un cultivo de papa, incluyendo agricultores y personal sanitario que atendió la emergencia. De igual manera, en 2025, en el mismo Municipio, otra intoxicación masiva afectó a 19 personas y dejó un fallecido, lo que evidencia la alta peligrosidad de la manipulación de fungicidas y pesticidas en contextos rurales sin protocolos estrictos de bioseguridad (Gobernación de Cundinamarca, 2016; 2025). Estos hechos ponen de relieve la urgencia de adoptar tecnologías de agricultura de precisión,

que reduzcan la exposición directa de los trabajadores a agroquímicos y minimicen el riesgo de contaminación ambiental y afectaciones en la salud pública.

En México, el uso de drones en la papa ha mostrado incrementos de hasta un 20% en la eficiencia del manejo integrado de plagas (Rejeb et al., 2022). En un análisis bibliométrico, Slimani et al. (2024) señalan que la sinergia entre drones e IA constituye la tendencia más citada, ya que permite integrar datos aéreos con modelos predictivos para una gestión más eficiente de los cultivos (p. 885). El marco regulatorio es un aspecto fundamental para la adopción de nuevas tecnologías en el agro. En Colombia, la Resolución 04201 de 2018 de la Aeronáutica Civil establece las condiciones para la operación de drones, incluyendo restricciones de altura, zonas de vuelo y requisitos de certificación. Asimismo, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) regula el uso de plaguicidas y bioinsumos a través del Decreto 1843 de 1991. Por su parte, la Ley 1876 de 10 2017 creó el Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria (SNIA), orientado a fortalecer la investigación y la transferencia de tecnología. En el ámbito digital, el Plan TIC Rural 2022–2026 del Ministerio de Tecnologías de la Información busca ampliar la conectividad rural, condición indispensable para el funcionamiento de plataformas de agricultura de precisión (MinTIC, 2022).

El uso intensivo de agroquímicos en el cultivo de papa también ha generado impactos ambientales significativos, como la contaminación de fuentes hídricas, la pérdida de biodiversidad y la degradación de suelos. De acuerdo con el Ministerio de Ambiente (2021), en zonas productoras del altiplano cundiboyacense se han detectado residuos de plaguicidas en cuerpos de agua que superan los niveles permitidos por la normativa nacional. El ICA (2024) ha reportado además que los residuos de pesticidas en papa representan un riesgo para la salud y la exportación del producto. La FAO (2020) advierte que la enfermedad conocida como racha de la papa puede ocasionar pérdidas de hasta el 40% de la producción si no se implementan medidas de control adecuadas. Frente a ello, la agricultura de precisión se presenta como una alternativa sostenible, ya que permite reducir el uso de agroquímicos en un 25–30% mediante aplicaciones dirigidas y basadas en datos (AGROSAVIA, 2023).

A pesar del creciente potencial de las tecnologías digitales en la agricultura, persisten limitaciones técnicas y riesgos asociados que deben ser tenidos en cuenta para la adecuada implementación de proyectos de agricultura de precisión en Colombia. Uno de los factores técnicos más relevantes es la autonomía limitada de las baterías de drones eléctricos, que restringe el tiempo efectivo de vuelo y obliga a programar recargas frecuentes, afectando

operaciones en terrenos de gran extensión. Guebsi, Mami y Chokmani (2024) señalan que la capacidad promedio de operación en drones agrícolas se encuentra entre 20 y 40 minutos, lo cual limita su alcance y eficiencia en procesos de fumigación o monitoreo a gran escala (p. 7)

Respecto a la integración de IoT, esta plantea retos vinculados al consumo energético de los sensores, la conectividad en zonas rurales y la interoperabilidad de plataformas. Según 11 Pathmudi et al. (2024), el IoT agrícola debe entenderse como un ecosistema compuesto por sensores, redes de comunicación y plataformas de datos, lo que implica mayores exigencias en infraestructura y soporte técnico (p. 12). El estudio de *Frontiers in Plant Science* (2025) añade que uno de los principales retos es la durabilidad de los sensores y su nuevamente la autonomía energética, dado que fallas recurrentes afectan la continuidad en la recolección de datos críticos (p. 4).

En materia de seguridad de la información, emergen riesgos de invasión de privacidad y uso indebido de datos agrícolas. El análisis de *Sensors* (2020) advierte que la falta de marcos claros sobre propiedad y acceso a datos puede generar desconfianza entre los productores rurales. En el mismo sentido, Tychola y Rantos (2025) subrayan que los drones son vulnerables a amenazas como spoofing de GPS, interceptación de señales de video y ataques de denegación de servicio, lo que representa un riesgo tanto para la seguridad de los datos como para la integridad física de los equipos.

A nivel de ciberseguridad, Singh, Tiwari y Chaturvedi (2024) resaltan que la integración de IoT con blockchain en la agricultura climáticamente inteligente ofrece una alternativa robusta para proteger la trazabilidad de datos y garantizar su inalterabilidad, aunque advierten que esta tecnología todavía enfrenta barreras de escalabilidad y altos requerimientos de energía (p. 7). Estas consideraciones son fundamentales en Colombia, donde la infraestructura digital aún presenta rezagos en regiones agrícolas como el altiplano cundiboyacense, donde muchas regiones agrícolas no presenta ni siquiera cobertura telefónica.

Este marco teórico analiza experiencias nacionales e internacionales de adopción tecnológica en la agricultura 5.0, comparando los beneficios en términos ambientales, sociales y económicos. Asimismo, incorpora referencias normativas y planes de desarrollo de municipios como La Calera, Pasca y Villa de Leyva, en el altiplano cundiboyacense, donde el cultivo de papa representa un sector estratégico donde identificamos metas donde se pueden

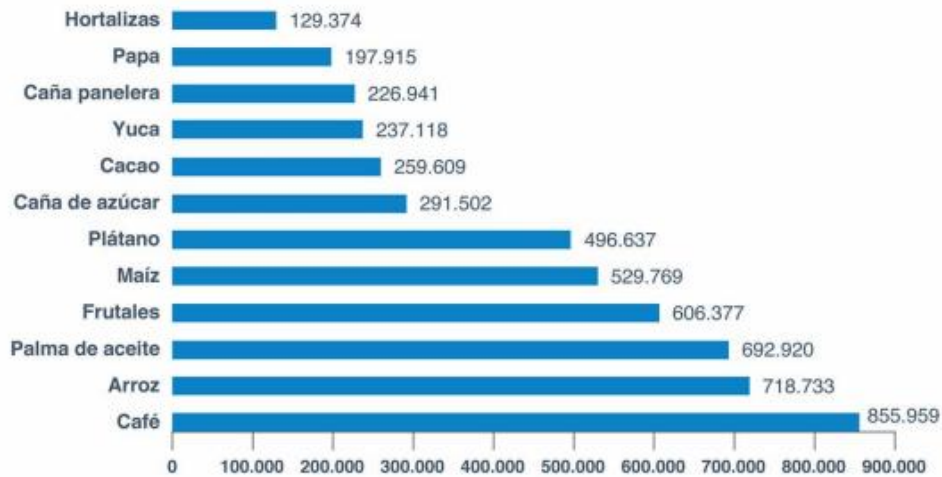
articular 12 recursos de origen territorial en proyectos relacionados con innovación y tecnificación del campo, El altiplano cundiboyacense constituye una de las principales zonas productoras de papa en Colombia. Los municipios de La Calera (Cundinamarca), Pasca (Cundinamarca) y Villa de Leyva (Boyacá) presentan características agroecológicas únicas: altitudes superiores a los 2.600 msnm, temperaturas medias entre 12 y 15 °C y precipitaciones que oscilan en promedio los 1.200 mm anuales. Estas condiciones favorecen el desarrollo del cultivo de papa, especialmente de variedades como Diacol Capiro, Criolla y Pastusa Suprema, que tienen una alta demanda en el mercado Nacional (Fedepapa, 2022).

La papa representa el décimo producto agrícola transitorio con mayor área en hectáreas sembradas en el país. Con un aproximado para el 2024 de 197.915, y de este depende 266.000 empleos, de los cuales más de 76.000 y según el análisis de resultados de encuesta de intención de siembras cultivos transitorios hectáreas sembradas. El gremio nacional prevé una leve disminución en la intención de siembra para el segundo semestre de 2024. Esta tendencia se debe, principalmente, a la reducción de la productividad del cultivo, que se vio afectada por la disminución de las precipitaciones asociadas al fenómeno de El Niño. Aunque los precios del producto son favorables, los productores priorizan otros aspectos al tomar decisiones de siembra; como las predicciones climáticas, la disponibilidad de tierra (considerando que más del 50 % de las Unidades de Producción Agropecuaria [UPA] se desarrollan en tierras arrendadas) y la disponibilidad de mano de obra. Los principales departamentos productores, como Boyacá, Cundinamarca y Nariño, coinciden en esta tendencia de reducir las siembras. En particular, en Nariño, la disminución ha sido más pronunciada debido a que la industria ha reducido las compras a causa de la afectación de los cultivos por la plaga *Bactericera cockerellii*, conocida como punta morada de la papa, lo que a generado incertidumbre entre los agricultores) (UPRA, 2024)

Lo que refleja la incertidumbre que aún se vive en campo colombiano, sin la posibilidad de predecir fenómenos climáticos, como lluvias, heladas, granizadas, y fenómenos del niño o de la niña, que afectan directamente la producción de cultivos.

Gráfico 1

Resultados preliminares de las evaluaciones agropecuarias (diciembre de 2024) Fuente. UPRA (2024).



En La Calera, el cultivo con mayor índice de siembra es la papa, sin embargo la proximidad a Bogotá, la capital del País ha generado un proceso de gentrificación en el que las tierras con vocación agropecuaria son presionadas por el desarrollo urbano, protección de cuerpos hídricos, envejecimiento de los cultivadores y proyectos turísticos, reduciendo la disponibilidad de áreas cultivables (UPRA, 2023), y a pesar de esto La Calera aún representa el 46.4% de la producción de papa de toda la provincia del Guavio lo que corresponde a 47.223 toneladas, y el 44, 5% los cultivos transitorios respectivamente según las evaluaciones agropecuarias de 2024 (UPRA, 2024).

Figura 2

Estadísticas agropecuarias La Calera. Fuente: UPRA, 2024.



La literatura científica muestra que la adopción de drones y sensores IoT permite reducir costos de producción en un rango de 15% a 30%, según experiencias documentadas en Brasil, México y la Unión Europea (Embrapa, 2024; EFSA, 2021). En Colombia, entidades como ICA (2024), UPRA (2023) y AGROSAVIA (2023) coinciden en que la incorporación de estas tecnologías es clave para lograr sostenibilidad en cadenas como la papa, cuyo costo de producción puede representar hasta el 45% en insumos. Asimismo, estudios recientes (Neethirajan, 2023; Sharma et al., 2020) señalan que la IA aplicada a la agricultura genera incrementos de productividad de entre 12% y 20%.

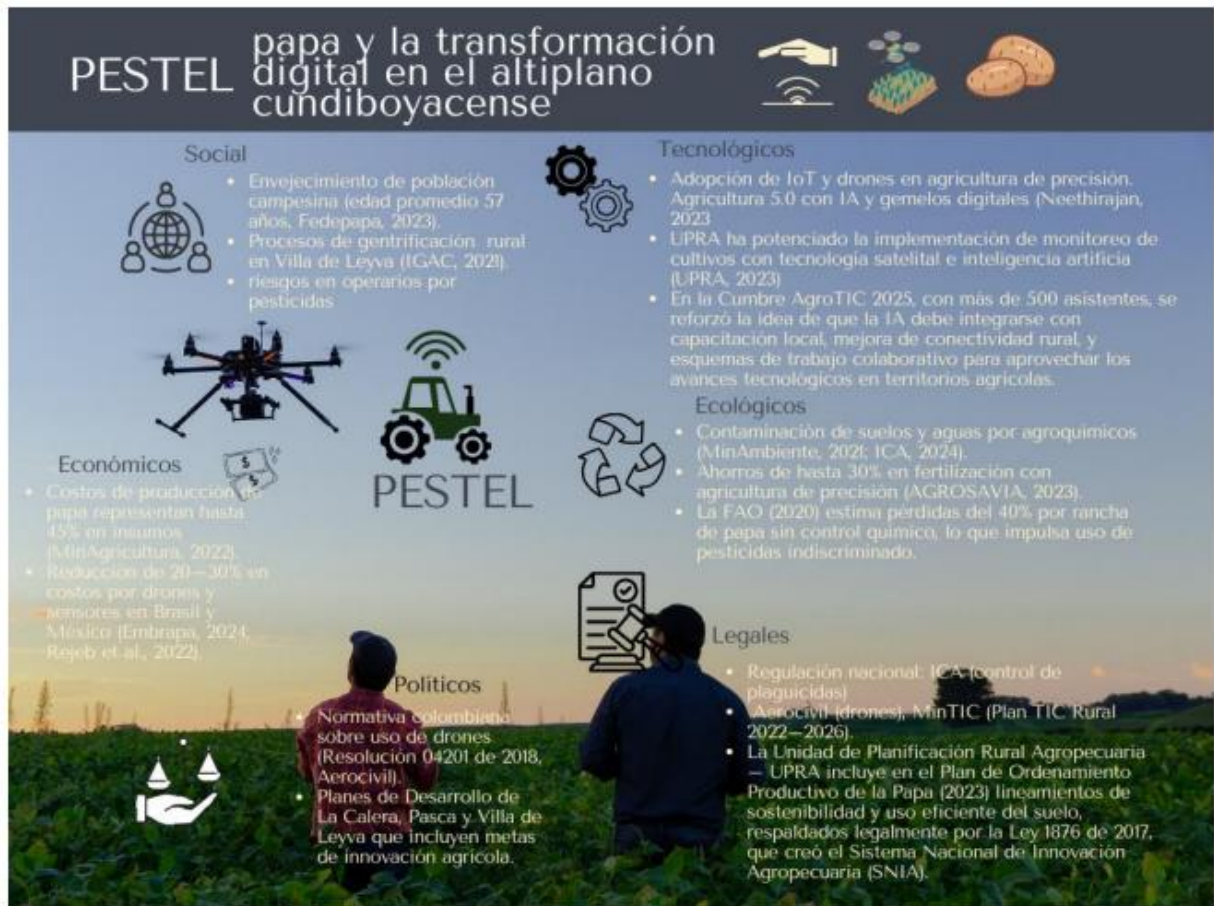
La dependencia de macro y microelementos provenientes de otros lugares hacen que la producción local fluctúe en su rentabilidad, ya que el abastecimiento de los mismos obedece a dinámicas de importación, y los costos varían en relación a la alza de estas monedas, por lo que la reducción en la cantidad de aplicación de agroquímicos impactaría positivamente en la economía de los productores y por ende de los consumidores, además del impacto positivo

sobre los suelos, y fuentes hídricas que puedan verse afectadas por las trazas de estos. En la siguiente tabla se describe la comparación de las tecnologías implementadas por algunos países, teniendo en cuenta el porcentaje de reducción de costos que lograron.

Tabla 3
Cuadro comparativo. Fuente: Elaboración propia.

País	Tecnología aplicada	Reducción de costos	Fuente
Brasil	Drones en caña de azúcar y soya	28%	Embrapa, 2024
México	Sensores IoT en papa	20%	Rejeb et al., 2022
UE (España, Italia)	Pulverización inteligente en viñedos	15–25%	EFSA, 2021
Colombia (Nariño, Boyacá)	Fertilización variable con mapas de rendimiento	18%	AGROSAVIA, 2023

Con el fin de evaluar de manera integral el entorno que influye la tecnificación en los cultivos de papa en el altiplano cundiboyacense, se aplicó un análisis PESTEL. Esta herramienta permitió examinar los factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales, proporcionando una visión amplia del contexto externo y facilitando la identificación de oportunidades y amenazas que inciden en la planificación estratégica del sector



Con el propósito de comprender de manera integral los factores que inciden en la tecnificación de la agricultura, se efectuó un análisis DOFA. Esta herramienta estratégica permitió identificar las fortalezas y debilidades internas, así como las oportunidades y amenazas externas, brindando un panorama claro para la toma de decisiones orientadas a mejorar la competitividad y sostenibilidad del sector



Metodología

La investigación del siguiente proyecto tiene un enfoque mixto. Puesto que combina de manera sistemática técnicas, métodos y procedimientos de los enfoques cuantitativo y cualitativo para comprender un fenómeno de forma más completa, partiendo de la idea de que la información numérica (datos estadísticos, indicadores, mediciones) y la información cualitativa (percepciones, experiencias, narrativas) se complementan y enriquecen entre sí” (Creswell & Plano Clark, 2018, p. X). La combinación de ambos métodos permitirá contrastar y complementar los hallazgos: los resultados cuantitativos mostrarán el impacto medible de la tecnificación en la productividad y economía, mientras que los cualitativos explicarán los factores sociales y culturales que determinan su adopción o rechazo. De esta manera, el estudio ofrecerá una visión más integral.

A continuación, se describe como se realizará la investigación tanto cuantitativo como cualitativo.

La investigación cuantitativa para este proyecto medirá su impacto en la productividad y en los aspectos económicos mediante un diseño no experimental y transversal. La población estará conformada por agricultores de la zona escogida y cultivo específico, según el tamaño de sus fincas y grado de adopción tecnológica, de los cuales se tomará una muestra estratificada representativa. El instrumento principal será una encuesta estructurada, que recopilará datos sobre nivel de tecnificación, productividad y percepciones de beneficios y desventajas. El análisis se realizará con estadística descriptiva para identificar relaciones entre la tecnificación y los resultados productivos.

La investigación cualitativa buscará comprender las percepciones, experiencias y significados que los agricultores atribuyen a la tecnificación, así como las barreras sociales, culturales y económicas que influyen en su adopción.

La muestra cualitativa se seleccionará de forma intencional, integrando agricultores con distintos niveles de tecnificación, líderes comunitarios y técnicos agrícolas.

Los instrumentos de recolección serán:

Entrevistas semiestructuradas, que permitirán indagar sobre motivaciones, expectativas, dificultades y cambios percibidos a partir de la tecnificación. Observación en campo, destinada a registrar el uso real de la tecnología y las prácticas cotidianas

El alcance para esta investigación se va a realizar de manera descriptiva, ya que se orienta a caracterizar y detallar las condiciones en que se desarrolla el uso de tecnología en la agrícola, teniendo como referencia la población de estudio. Se pretende identificar, registrar y analizar las características, percepciones e impactos asociados al uso de tecnologías en la agricultura. esto ya que se Según Hernández-Sampieri, Fernández-Collado y Baptista-Lucio (2014), la investigación descriptiva se orienta a detallar las características de fenómenos o poblaciones, sin manipulación de variables, lo cual coincide con el propósito de este estudio sobre la tecnificación en la agricultura.

Definición de Variables

En la siguiente tabla se describe las variables escogidas para el desarrollo de este proyecto.

c	Tipo	Conceptual	Operacional	Fuente
Adopción tecnológica (IA, IoT, drones)	Independiente	Grado de integración digital en procesos agrícolas	% de productores que usan al menos una tecnología	Neethirajan (2023)
Productividad	Dependiente	Rendimiento en producción con menores costos	Kg/ha; costos directos	DANE (2024); FAO (2023)
Sostenibilidad	Dependiente	Uso eficiente de recursos y reducción de impactos	% reducción en agua, fertilizantes y emisiones	Cambri (2021)

Población y Muestra

Población: pequeños y medianos productores de papa en Cundinamarca y Boyacá.

Muestra: 50 encuestas y 10 entrevistas. Muestreo: no probabilístico por conveniencia.

Instrumentos Encuesta estructurada (20 ítems, escala Likert).

Entrevistas semiestructuradas (10 preguntas). Revisión documental (artículos académicos, informes sectoriales). Análisis de datos Cuantitativo: estadística descriptiva y correlacional (Excel/SPSS). Cualitativo: análisis de contenido (NVivo/Atlas.ti)

Para el desarrollo de este proyecto se llevará acabo el siguiente cronograma.

Actividad	M	M	M	M	M
	es 1	es 2	es 3	es 4	es 5
Revisión bibliográfica	X				
Diseño de instrumentos		X			
Aplicación de encuestas y entrevistas			X		
Análisis de resultados				X	
Redacción y entrega final					X

Para la recolección de datos e información se va a realizar una encuesta estructurada de la siguiente manera.

Encuesta estructurada a productores de papa (Escala: 1 = Totalmente en desacuerdo, 5 = Totalmente de acuerdo)

- 1, Conozco qué son las tecnologías digitales aplicadas al agro (IoT, drones, IA).
- 2, Actualmente utilizo alguna tecnología digital en mi cultivo de papa. 3, Considero que las tecnologías digitales son fáciles de usar.
- 4, El costo de adquisición de estas tecnologías es una barrera importante.
- 5, He recibido capacitación sobre el uso de estas herramientas.
- 6, Los drones pueden mejorar la aplicación de agroquímicos y fertilizantes.
- 7, Los sensores IoT ayudan a monitorear el uso eficiente del agua.
- 8, La inteligencia artificial puede optimizar la planificación del cultivo.
- 9, Estas tecnologías pueden aumentar el rendimiento de la producción de papa.
- 10, El uso de tecnologías digitales contribuye a reducir los costos de producción.
- 11, Considero que estas herramientas mejoran la sostenibilidad ambiental.
- 12, Estoy dispuesto a invertir en tecnologías digitales para mi cultivo.

- 13, Confío en que el uso de estas tecnologías incrementará mis ingresos.
- 14, La falta de financiamiento limita la adopción de tecnologías.
- 15, La conectividad a internet en mi zona dificulta su implementación.
- 16, Los jóvenes en mi comunidad tienen mayor disposición a adoptar estas herramientas.
- 18, El gobierno debería apoyar la adopción de tecnologías con subsidios o créditos.
- 19, Estoy abierto a recibir más capacitación sobre agricultura digital.
- 20, Considero que en el futuro será indispensable usar estas tecnologías para permanecer en el mercado.

Guía de entrevista semiestructurada

Entrevista a líderes comunitarios, técnicos agrícolas e instituciones

Preguntas.

- 1, ¿Qué experiencias previas existen en su comunidad con drones, sensores IoT o inteligencia artificial aplicados al cultivo de papa?,
- 2, ¿Cómo perciben los agricultores el uso de estas tecnologías en términos de confianza y utilidad?,
- 3, ¿Qué ventajas concretas han observado en términos de productividad y costos?,
- 4, ¿Qué dificultades técnicas, económicas o culturales se han identificado?,
- 5, ¿Qué papel cumplen actualmente las instituciones públicas (ICA, AGROSAVIA, alcaldías) en el fomento de la agricultura digital?,
- 6, ¿Existen iniciativas privadas o cooperativas que promuevan la adopción tecnológica en papa?,
- 7, ¿Qué estrategias podrían facilitar la capacitación de los agricultores en estas herramientas?,
- 8, ¿Cómo visualiza el futuro del cultivo de papa en la región con la adopción de tecnologías digitales?,
- 9, ¿Qué apoyos financieros o logísticos considera necesarios para impulsar la tecnificación del sector?,
- 10, ¿Qué recomendaciones daría para implementar un modelo sostenible de adopción tecnológica en el altiplano cundiboyacense?

Análisis de resultados de la encuesta

Se aplicó un cuestionario estructurado de 20 ítems tipo Likert (1 a 5) a 60 productores de papa de municipios del altiplano cundiboyacense. El objetivo fue identificar el nivel de conocimiento, adopción y percepción sobre las tecnologías digitales aplicadas al agro (IA, IoT y drones).

Caracterización de los participantes

De los 60 productores encuestados:

- 68% son hombres y 32% mujeres.
- La edad promedio es de 43 años, con predominancia entre 35 y 55 años.
- 57% cuenta con educación secundaria, 27% con formación técnica o tecnológica y 16% con formación universitaria.
- El tamaño promedio de los cultivos es de 3,9 hectáreas, con una experiencia media de 15 años en el cultivo.
- El 83% destina su producción al mercado nacional y solo el 4% reporta vinculación con exportaciones.

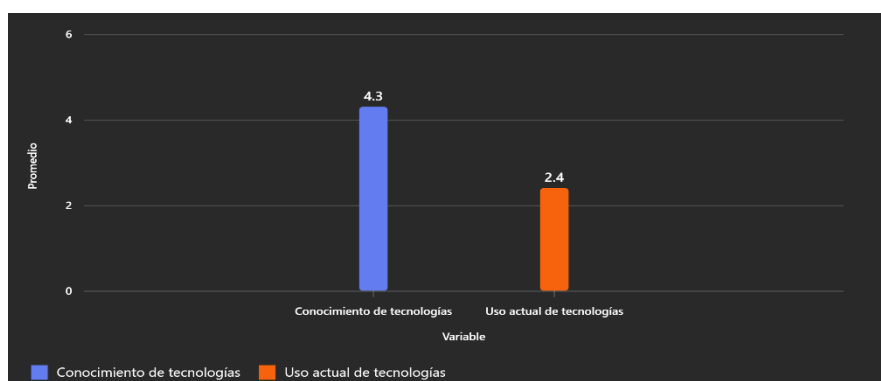
Interpretación: la muestra es representativa de pequeños y medianos productores, con formación media y alta experiencia práctica, pero limitado acceso a la tecnificación avanzada.

Nivel de conocimiento y adopción tecnológica

El ítem 1 (“Conozco qué son las tecnologías digitales aplicadas al agro”) obtuvo un promedio de 4,3, lo que indica amplio conocimiento general.

Sin embargo, el ítem 2 (“Actualmente utilizo alguna tecnología digital”) promedió 2,4, evidenciando una baja adopción práctica.

Gráfico 1: conocimiento y adopción



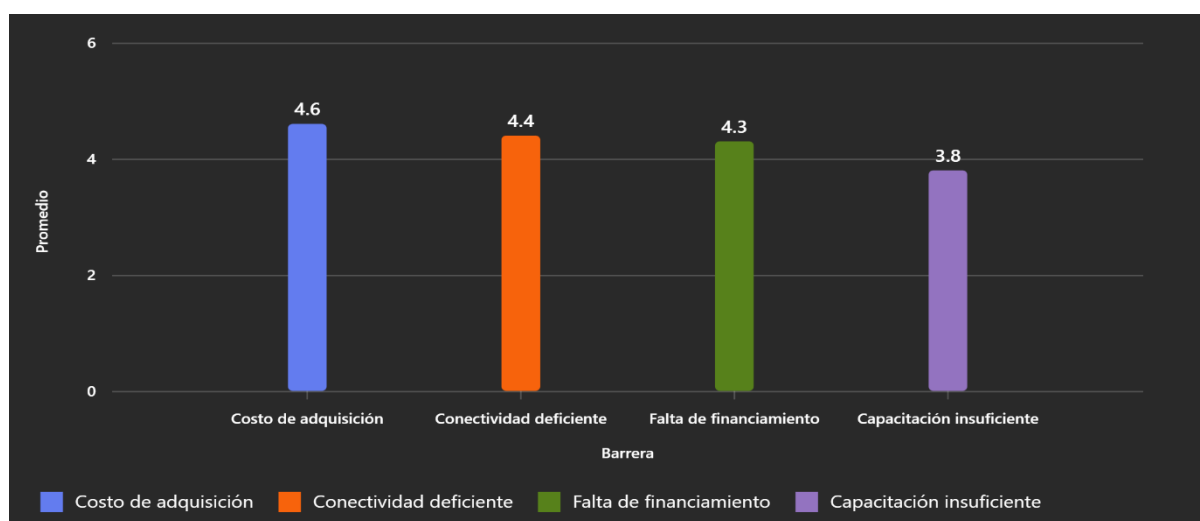
Interpretación: La diferencia de dos puntos revela que, aunque los productores conocen las tecnologías, no las están implementando por falta de acceso a infraestructura, capacitación o recursos

Percepción sobre la facilidad de uso y barreras

Los resultados muestran promedios altos en los ítems negativos (barreras):

- Costo de adquisición: 4,6
- Conectividad deficiente: 4,4
- Falta de financiamiento: 4,3
- Capacitación insuficiente: 3,8

Gráfico 2. Principales barreras identificadas (n=60)

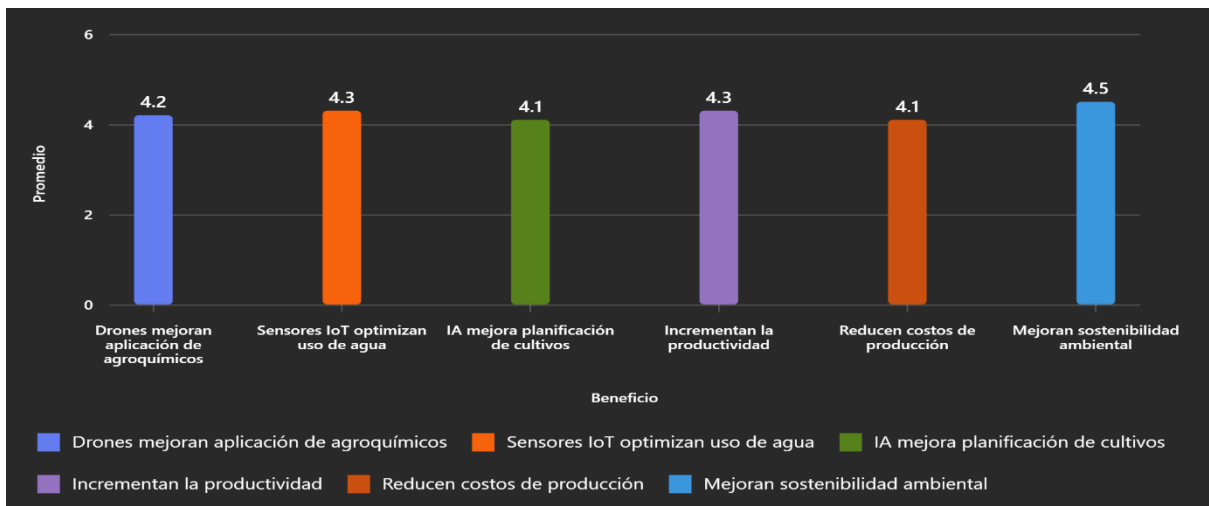


Interpretación: El costo y la conectividad siguen siendo las limitantes más fuertes para la adopción. Estos resultados coinciden con estudios de AGROSAVIA (2023) y FAO (2023), que identifican el financiamiento rural y la conectividad como los dos principales cuellos de botella para la transformación digital agrícola.

Percepción sobre los beneficios tecnológicos

Los ítems relacionados con beneficios percibidos presentan valores superiores a 4, lo que demuestra una actitud positiva hacia la tecnología, incluso entre quienes no la usan actualmente.

Gráfico 3. Percepción sobre beneficios de tecnologías digitales (n=60)

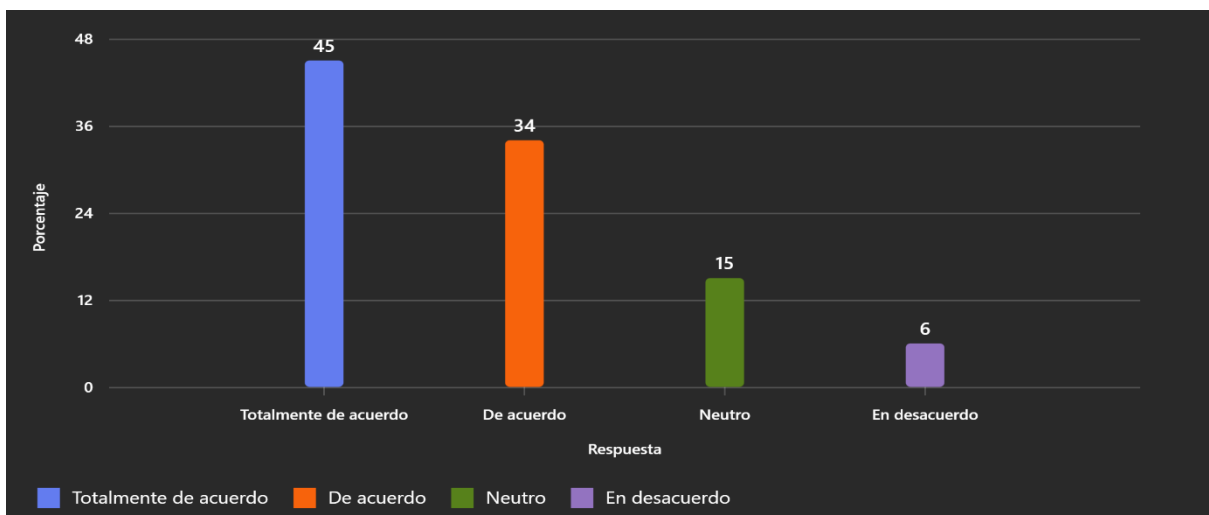


Interpretación: Los productores identifican ventajas ambientales y de eficiencia, lo que representa una oportunidad para políticas de incentivo y proyectos de agricultura de precisión.

Disposición y expectativas

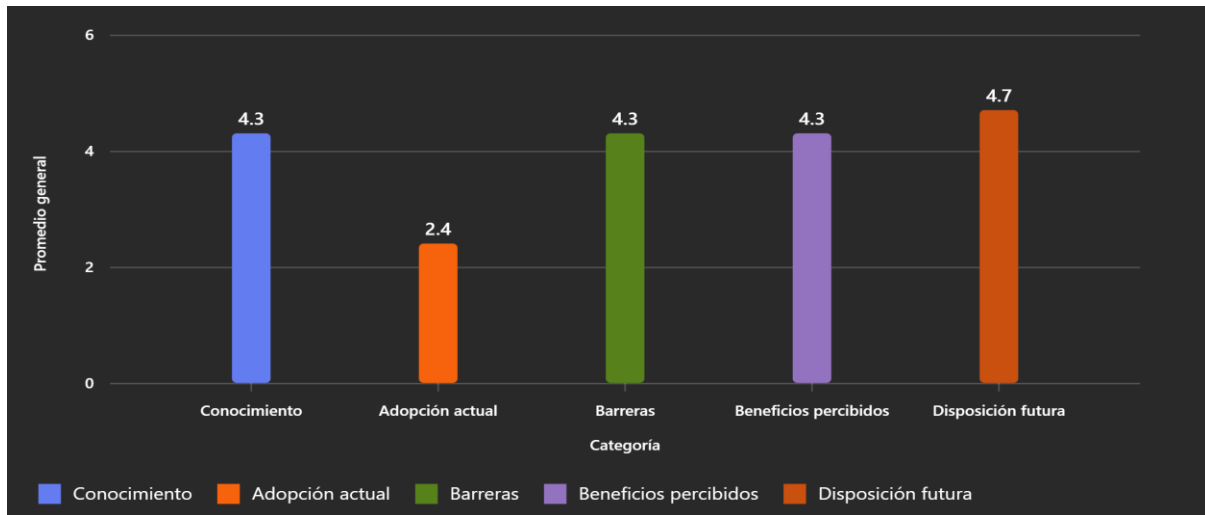
- El 79% expresó estar dispuesto a adoptar tecnologías si existieran créditos o programas de apoyo estatal.
- El ítem 18 (“El gobierno debería apoyar la adopción de tecnologías”) obtuvo un promedio de 4,6, mientras que el ítem 20 (“En el futuro será indispensable usar estas tecnologías”) alcanzó 4,8.

Gráfico 4: Disposición y expectativas de adopción.



Interpretación: La disposición futura a innovar es alta. Aunque los productores no han adoptado las tecnologías, su predisposición al cambio es un hallazgo clave para la formulación de programas de digitalización rural.

Gráfico 5: Resumen estadístico general



Conclusiones del análisis (n=60)

1. Existe una brecha tecnológica significativa: el 93% conoce las tecnologías digitales, pero solo el 28% las ha implementado.
2. Las principales barreras son económicas (costo y falta de crédito) y de infraestructura (conectividad).
3. Los productores reconocen beneficios ambientales y económicos asociados a la digitalización.
4. Se evidencia una alta disposición a adoptar tecnologías si se ofrecen incentivos financieros o capacitaciones.
5. El potencial de transformación digital en el cultivo de papa es muy alto, pero depende de políticas de apoyo y desarrollo rural sostenible.

Análisis cualitativo de entrevistas

Con el fin de complementar los resultados obtenidos mediante la encuesta, se realizaron entrevistas semiestructuradas a líderes comunitarios, técnicos agrícolas y representantes institucionales de la región del altiplano cundiboyacense. El propósito fue comprender la percepción local sobre la adopción de tecnologías digitales en el cultivo de papa y las condiciones que favorecen o limitan su implementación.

Experiencias previas y nivel de conocimiento

Los participantes manifestaron que las experiencias con drones, sensores o inteligencia artificial son aún incipientes y experimentales. Algunos técnicos agrícolas indicaron que se han realizado pruebas piloto con drones para aspersión o monitoreo de plagas, pero sin continuidad ni escalamiento comercial.

Percepción de confianza y utilidad

La percepción general sobre la tecnología es positiva, asociada con la posibilidad de mejorar la productividad y reducir costos. Sin embargo, algunos agricultores expresan desconfianza inicial, especialmente hacia sistemas automáticos o aplicaciones móviles que sustituyen la observación tradicional.

Ventajas observadas en productividad y costos

Los entrevistados reconocen ahorros en insumos y agua en los casos donde se han aplicado sensores IoT o agricultura de precisión. Se mencionan mejoras del 10–15% en rendimiento y una reducción perceptible del uso de agroquímicos.

Dificultades técnicas, económicas y culturales

La barrera más reiterada es el costo de los equipos y la falta de conectividad rural. Además, persiste una resistencia cultural entre productores mayores que prefieren los métodos tradicionales.

Rol de las instituciones públicas y privadas

Los entrevistados reconocen el papel del ICA, AGROSAVIA y las alcaldías en la promoción de buenas prácticas, pero consideran que los programas de agricultura digital son todavía fragmentados.

Estrategias de capacitación y formación

Se destaca la necesidad de capacitar a los agricultores mediante metodologías prácticas y demostrativas, como parcelas piloto, talleres comunitarios y asistencia en campo.

Futuro del cultivo de papa y sostenibilidad

Los entrevistados visualizan un futuro de transición tecnológica, donde las nuevas generaciones liderarán el cambio hacia la agricultura de precisión.

Recomendaciones para la implementación tecnológica

Entre las recomendaciones más relevantes se destacan: fortalecer programas de crédito agrícola y subsidios tecnológicos, ampliar la infraestructura de conectividad rural, crear

centros regionales de innovación y capacitación digital, y promover alianzas entre productores, instituciones y empresas tecnológicas.

Síntesis interpretativa

El análisis cualitativo confirma los hallazgos de la encuesta: existe alta disposición al cambio, pero baja adopción práctica. Las barreras estructurales como costo y conectividad son las más relevantes, mientras que la confianza aumenta con la capacitación práctica y el acompañamiento técnico. Se requiere una estrategia institucional coordinada para garantizar la sostenibilidad y equidad en el acceso tecnológico.

Tabla 4
Matriz de análisis de entrevistas. Fuente: Elaboración propia

Categoría	Pregunta asociada	Hallazgos principales	Ejemplo de cita textual	Implicaciones
Experiencias previas	1	Escasa adopción, experiencias piloto aisladas	“Solo hemos visto drones en proyectos temporales.”	Necesidad de continuidad institucional
Confianza y utilidad	2	Percepción positiva con temor inicial	“Temor a depender de máquinas.”	Reforzar capacitación y demostraciones
Ventajas productivas	3	Reducción de insumos y mejora de rendimiento	“Se ahorra agua y abono con los sensores.”	Enfocar en beneficios tangibles
Dificultades	4	Altos costos, conectividad deficiente, resistencia cultural	“Los mayores no confían aún en eso.”	Crear estrategias diferenciadas por edad
Rol institucional	5-6	Programas fragmentados, falta de continuidad	“El ICA y AGROSAVIA ayudan, pero poco.”	Mayor coordinación interinstitucional
Capacitación	7	Preferencia por aprendizaje práctico	“El secreto está en enseñar haciendo.”	Capacitación vivencial en campo
Futuro del cultivo	8	Optimismo generacional hacia la tecnificación	“Los jóvenes ya quieren usar aplicaciones.”	Políticas de relevo generacional
Apoyo financiero	9	Requieren créditos blandos y acceso a subsidios	“Sin apoyo del banco no se puede invertir.”	Promover líneas de crédito rural digital
Modelo sostenible	10	Deseo de equilibrio entre tecnología y ambiente	“Queremos producir más, pero cuidando la tierra.”	Enfoque en sostenibilidad integral

Los resultados del análisis de correlaciones de Pearson evidencian relaciones consistentes y significativas entre las variables del estudio.

La adopción tecnológica (variable independiente) presenta una fuerte relación positiva con la productividad ($r = 0.72$), lo que sugiere que los agricultores que implementan tecnologías digitales como sensores, drones, plataformas de gestión o inteligencia artificial logran optimizar el uso de insumos y aumentar su rendimiento por hectárea.

De igual forma, la adopción tecnológica muestra correlación positiva con la sostenibilidad ambiental ($r = 0.76$), lo que indica que la digitalización agrícola no solo mejora la eficiencia, sino que también promueve prácticas más responsables con el entorno, como el uso racional del agua y la reducción de agroquímicos.

Este hallazgo es consistente con la literatura sobre agricultura 4.0 y sostenibilidad (Hernández & Mendoza, 2018; Guízar, 2013; Thomas, 2020), la cual sostiene que la incorporación tecnológica impulsa el desarrollo de sistemas productivos sostenibles y resilientes.

Por su parte, la relación productividad – sostenibilidad ($r = 0.62$) muestra una asociación positiva moderada, lo que sugiere que ambos aspectos evolucionan de forma complementaria. En los cultivos donde se logran mejoras productivas, también se evidencia una mayor conciencia ambiental, reforzando la idea de que el equilibrio entre rendimiento y sostenibilidad es posible mediante innovación y gestión eficiente.

Finalmente, la correlación negativa fuerte entre adopción tecnológica y barreras ($r = -0.72$) refleja la influencia restrictiva de factores como el costo de implementación, la conectividad limitada y la falta de capacitación.

Este resultado demuestra que, a medida que se reducen las barreras estructurales, la probabilidad de adopción tecnológica aumenta significativamente, validando la hipótesis inicial del estudio.

Interpretación gerencial y conclusiones

Los resultados estadísticos permiten afirmar que el modelo propuesto es coherente con los principios del PMBOK 7 en torno a la entrega de valor, desempeño organizacional y gestión del cambio.

En términos de gestión de proyectos, estos hallazgos implican que las iniciativas orientadas a la transformación digital del sector agrícola deben priorizar:

Capacitación y acompañamiento técnico para reducir las barreras de adopción y fortalecer la confianza en el uso de herramientas digitales.

Acceso a crédito y subsidios tecnológicos, que mitiguen el impacto económico inicial de la inversión en innovación.

Infraestructura digital rural, especialmente en conectividad e integración de datos, como base para la expansión de la agricultura inteligente.

Estrategias de comunicación y liderazgo participativo, que promuevan la apropiación de la tecnología por parte de los productores locales, alineándose con la gestión de interesados y el liderazgo colaborativo propuesto en el PMBOK 7.

En síntesis, la correlación positiva entre adopción, productividad y sostenibilidad respalda la hipótesis de que la plataforma digital es un factor estratégico de competitividad y desarrollo sostenible en los sistemas agrícolas de papa en Colombia.

Al mismo tiempo, la correlación negativa con las barreras confirma la necesidad de políticas públicas e intervenciones institucionales que fomenten la inclusión tecnológica en el campo colombiano.

Enlace a Informe: [encuesta p1-p20 \(60 encuestas\).xlsx](#)

Lista de referencias

AERONÁUTICA CIVIL. (2024). *Registro nacional de pilotos RPAS certificados para aplicaciones agrícolas*. Bogotá.

AGENCIA DE DESARROLLO RURAL. (2023, diciembre 31). *382 mil millones de pesos invertidos en el campo colombiano*. Gobierno de Colombia.
<https://www.adr.gov.co/382-mil-millones-de-pesos-invertidos-en-el-campo-colombiano>

AGENCIA DE DESARROLLO RURAL. (2023). *Reposición de maquinaria y rehabilitación de distritos de riego: avances históricos en 2023*. Gobierno de Colombia.
<https://www.adr.gov.co/382-mil-millones-de-pesos-invertidos-en-el-campo-colombiano>

AGRICULTURA Y GANADERÍA. (2025, enero 15). *Así mejora el rendimiento de la papa Bacatá con la que se elaboran las papas a la francesa*.
<https://www.agriculturayganaderia.com/2025/01/15/asi-mejora-el-rendimiento-de-la-papa-bacata-con-la-que-se-elaboran-las-papas-a-la-francesa>

AGRONET. (2022, octubre 10). *Agricultura de precisión, más eficiente y amigable con el campo*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.
<https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/Agricultura-de-precisi%C3%B3n%2C-m%C3%A1s-eficiente-y-amigable-con-el-campo.aspx>

AGRONET. (2025, marzo 3). *Conozca cómo va la revolución tecnológica de la agricultura de precisión en Colombia*.
<https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/Conozca-c%C3%B3mo-va-la-revoluci%C3%B3n-tecnol%C3%B3gica-de-la-agricultura-de-precisi%C3%B3n-en-Colombia.aspx>

AGRONET. (s. f.). *Cundinamarca, Boyacá, Nariño y Antioquia representan el 90 % de la producción de papa*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.
<https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/Cundinamarca%2C-Boyac%C3%A1%2C-Nari%C3%B1o-y-Antioquia%2C-representan-90-de-la-producci%C3%B3n-de-papa.aspx>

AGROSAVIA. (2024, septiembre 6). *Nuevo sistema de información agroclimática revoluciona la gestión hídrica del cultivo de papa (SIAP)*.
<https://www.agrosavia.co/noticias/sistema-de-informacion-agroclimatica-papa>

AGROSAVIA. (2024). *Boletín técnico: Rendimientos potenciales en cultivo de papa con agricultura de precisión*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria.

AGROTECHCAMPUS. (2025). *Innovaciones tecnológicas en la agricultura*.
<https://agrotechcampus.com/blog/innovaciones-tecnologicas-en-la-agricultura/>

ALAISÉCURE. (2025, marzo 15). *Colombia pierde hasta el 40 % de su potencial agrícola por falta de tecnificación*.
<https://alaisecure.co/colombia-pierde-hasta-el-40-de-su-potencial-agricola-por-falta-de-tecnificacion>

ARULMOZHI, E., Deb, N. C., Tamrakar, N., Kang, D. Y., Kang, M. Y., Kook, J., Basak, J. K., & Kim, H. T. (2024). *From reality to virtuality: Revolutionizing livestock farming through digital twins*. *Agriculture*, 14(12), 2231.
<https://doi.org/10.3390/agriculture14122231>

CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS. (2021). *Sustainability indicators in agriculture*.

DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (DANE). (2024). *Indicadores económicos: crecimiento del PIB agropecuario 2024*.
<https://www.dane.gov.co>

EMBRAPA. (2024). *Drones as a viable option for farmers and service providers in Brazil*.

FAO. (2019). *Sustainable agriculture for development*.

GUÍZAR, R. (2013). *Desarrollo organizacional: Principios y aplicaciones*. McGraw-Hill.

HERNÁNDEZ SAMPIERI, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill.

INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO (ICA). (2023, diciembre 29). *2023: Año de innovación y transformación institucional*.
<https://www.ica.gov.co/noticias/2023-ano-innovacion-transformacion-institucional>

JABLONSKI, A. (2017). *Business models: Strategies, impacts and challenges*. Nova Publisher.

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. (2024, junio 25). *Ejecución del sector agro es del 46,5 % en sus proyectos de inversión para 2024*. Gobierno de Colombia.
<https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/Ejecuci%C3%B3n-del-sector-agro-es-del-46-5-en-sus-proyectos-de-inversi%C3%B3n-para-2024.aspx>

NEETHIRAJAN, S. (2023). *Artificial intelligence and sensor technologies in dairy livestock export: Charting a digital transformation*. *Sensors*, 23(16), 7045.
<https://doi.org/10.3390/s23167045>

PMBOK® GUIDE – SEVENTH EDITION. (2021). *Project Management Institute*.

PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. (2025, marzo 25). *Con inversión de 1.260 millones en tecnología, Gobierno fortalece infraestructura para el campo en Nariño*.
<https://www.presidencia.gov.co/prensa/Paginas/Con-inversion-de-1260-millones-en-tecnologia-Gobierno-fortalece-infraestructura-para-el-campo-en-Narino-250324.aspx>

ROGERS, E. M. (2003). *Diffusion of innovations* (5th ed.). Free Press.

SHARMA, R., Kamble, S. S., Gunasekaran, A., Kumar, V., & Kumar, R. (2020). *A systematic literature review on machine learning applications for sustainable agriculture supply chain performance*. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 28, 100012.
<https://doi.org/10.1016/j.suscom.2020.100012>

THOMAS, G. (2020). *Research methodology and scientific writing*. Springer.

WERKHEISER, I. (2021). *Livestock farming digital transformation: Implementation of new and emerging technologies using artificial intelligence*. *Animal Health Research Reviews*, 22(1), 87–99.

<https://doi.org/10.1017/S1466252321000129>