

Recibido 21/08/2024 Aceptado 16/06/2025

Escalamiento Tecnológico de CertiAgro: De TRL 4 a TRL 7 para Potenciar la Competitividad y Sostenibilidad Agrícola en el Departamento del Cauca

Technological Scaling of CertiAgro: From TRL 4 to TRL 7 to Enhance Agricultural Competitiveness and Sustainability in the Department of Cauca

Paula Andrea Mora Pedreros ¹

Andrés Fabián Arias Noreña ²

Javier Hoyos García ³

Michael López Cepeda ⁴

Diego Alfonso Aguilar Cardona ⁵

Como citar:

Mora Pedreros, P. A., Arias Noreña, A. F., Hoyos García, J., López Cepeda, M., & Aguilar Cardona, D. A. (s. f.). Escalamiento tecnológico de CertiAgro: De TRL 4 a TRL 7 para potenciar la competitividad y sostenibilidad agrícola en el departamento del Cauca. *Vía Innova*, 12(1), 161–187. <https://revistas.sena.edu.co/index.php/RVI/>

¹ Paula Andrea Mora Pedreros, Doctora en Filosofía. Fundación Universitaria de Popayán

paula.mora@docente.fup.edu.co.

Cvlab: https://scienti.minciencias.gov.co/cvlab/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000533980

Orcid <https://orcid.org/0000-0001-8070-9885>

² Andrés Fabián Arias Noreña, Cvlab:

https://scienti.minciencias.gov.co/cvlab/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000158804

³ Javier Hoyos García, Tecnicafé. Cvlab:

https://scienti.minciencias.gov.co/cvlab/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001542680

⁴ Michael López Cepeda. Tecnicafé. Cvlab:

https://scienti.minciencias.gov.co/cvlab/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001324098

⁵ Diego Alfonso Aguilar Cardona

https://scienti.minciencias.gov.co/cvlab/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000389960

Resumen

El presente artículo analiza el escalamiento tecnológico de la plataforma AgriTech CertiAgro, una iniciativa diseñada para superar las barreras de acceso a certificaciones agrícolas sostenibles para productores en el departamento del Cauca, Colombia. El proyecto aborda la problemática de la brecha tecnológica en el sector rural, que limita la competitividad y el acceso a mercados de mayor valor. El objetivo central fue elevar la madurez de la plataforma desde un Nivel de Madurez Tecnológica (TRL) 4, correspondiente a una validación en entorno de laboratorio, hasta un TRL 7, que implica la demostración de un prototipo de sistema en un entorno operativo real. Para lograrlo, se implementó una metodología de desarrollo ágil y de innovación abierta, identificando características prioritarias mediante la cocreación con productores y validando la plataforma escalada en entornos agrícolas reales. Los resultados demuestran la consecución de un prototipo tecnológico avanzado, validado funcionalmente con usuarios finales, y un plan de transferencia de conocimiento ejecutado con actores clave del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SNCTeI). La discusión contrasta estos hallazgos con la literatura sobre adopción tecnológica y el ecosistema AgriTech en Colombia, argumentando que el enfoque centrado en el usuario y la gamificación de CertiAgro constituyen una respuesta efectiva a las barreras tradicionales de la extensión agrícola. Se concluye que el proyecto no solo valida un producto tecnológico, sino también un modelo metodológico para el desarrollo de soluciones AgriTech pertinentes y adoptables en contextos rurales latinoamericanos.

Palabras Clave: CertiAgro, agricultura sostenible, innovación abierta, escalamiento tecnológico, certificación agrícola, AgriTech

Abstract

This article analyzes the technological scaling of the AgriTech platform CertiAgro, an initiative designed to overcome barriers to accessing sustainable agricultural certifications for producers in the department of Cauca, Colombia. The project addresses the technological gap in the rural sector, which limits competitiveness and access to higher-value markets. The central objective was to raise the platform's maturity from a Technology Readiness Level (TRL) 4, corresponding to validation in a laboratory environment, to a TRL 7, which involves the demonstration of a system prototype in a real operational environment. To achieve this, an agile development and open innovation methodology was implemented, identifying priority features through co-creation with producers and validating the scaled platform in real agricultural settings. The results demonstrate the achievement of an advanced technological prototype, functionally validated with end-users, and a knowledge transfer plan executed with key stakeholders of the National Science, Technology, and Innovation System (SNCTeI). The discussion contrasts these findings with literature on technology adoption and the AgriTech ecosystem in Colombia, arguing that CertiAgro's user-centered approach and gamification provide an effective response to traditional barriers in agricultural extension. It is concluded that the project not only validates a technological product but also a methodological model for developing relevant and adoptable AgriTech solutions in Latin American rural contexts.

Keywords: CertiAgro, sustainable agriculture, open innovation, technological scaling, agricultural certification

1. Introducción

El proyecto titulado "Escalamiento tecnológico de la plataforma cloud y móvil CertiAgro para la implementación de certificaciones agropecuarias que fortalezcan las actividades comerciales y productivas rurales sostenibles" se enmarca dentro de la convocatoria "Bioeconomía para una Colombia potencia viva y diversa: Hacia una sociedad impulsada por el conocimiento," específicamente en la línea temática de Agro Productivo y Sostenible. La agricultura en Colombia constituye un pilar fundamental para el desarrollo socioeconómico, especialmente en las zonas rurales donde representa la principal fuente de ingresos. Su contribución al Producto Interno Bruto (PIB) nacional fue del 6.8% en 2020, con exportaciones agropecuarias que alcanzaron los \$3,784 millones de dólares en 2021, un crecimiento del 19.2% respecto al año anterior. La relevancia de este sector trasciende lo económico; la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) sostiene que el crecimiento del PIB derivado de la agricultura es al menos dos veces más eficaz en la reducción de la pobreza que el crecimiento en otros sectores. Este potencial se alinea con las directrices del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026, que posiciona la economía campesina y el desarrollo rural como ejes de transformación hacia una "potencia mundial de la vida". A pesar de su importancia estratégica, el sector agrícola colombiano enfrenta desafíos estructurales que limitan su potencial. Persisten prácticas agropecuarias inadecuadas, a menudo exacerbadas por una marcada brecha tecnológica que restringe el acceso a herramientas para la optimización de procesos productivos y la gestión sostenible de los recursos. Esta brecha se manifiesta en una alarmante falta de asistencia técnica; según el Censo Nacional Agropecuario, el 85% de los productores en áreas rurales dispersas no reciben acompañamiento técnico, lo que evidencia un atraso significativo en la adopción de innovaciones. Adicionalmente, la conectividad a internet en las zonas rurales sigue siendo un obstáculo crítico, limitando el acceso a información, mercados y servicios digitales que son cruciales para la modernización del campo.⁴ Esta conjunción de factores merma la competitividad del sector y dificulta su inserción en cadenas de valor más sofisticadas y rentables.

A pesar de su importancia estratégica, el sector agrícola colombiano enfrenta desafíos estructurales que limitan su potencial. Persisten prácticas agropecuarias inadecuadas, a menudo exacerbadas por una marcada brecha tecnológica que restringe el acceso a herramientas para la optimización de procesos productivos y la gestión sostenible de los recursos. Esta brecha se manifiesta en una alarmante falta de asistencia técnica; según el Censo Nacional Agropecuario, el 85% de los productores en áreas rurales dispersas no reciben acompañamiento técnico, lo que evidencia un atraso significativo en la adopción de innovaciones. Adicionalmente, la conectividad a internet en las zonas rurales sigue siendo un obstáculo crítico, limitando el acceso a información, mercados y servicios digitales que son cruciales para la modernización del campo.⁴ Esta conjunción de factores merma la competitividad del sector y dificulta su inserción en cadenas de valor más sofisticadas y rentables. De ahí la importancia de la implementación de buenas prácticas de producción biosostenible, en concordancia con la sostenibilidad agropecuaria, garantiza un aumento en la competitividad de las organizaciones que adoptan CertiAgro. Este incremento se logra a través de la obtención de certificaciones agroindustriales reconocidas por entidades oficiales locales e internacionales (Gambaudo, 2014). Estas certificaciones

proporcionan garantías a los compradores, generando confianza y demanda. Como resultado, los productores pueden acceder a un mercado más amplio, recibir una remuneración justa por su labor, obtener un mayor reconocimiento en el sector agropecuario regional y nacional, y explorar oportunidades de exportación hacia mercados de mayor valor. No obstante, el camino hacia la certificación está lleno de obstáculos para la mayoría de los agricultores colombianos, especialmente para los pequeños y medianos. Los altos costos de implementación y auditoría, la complejidad de los requisitos normativos y la escasez de laboratorios especializados y asistencia técnica adecuada, actúan como barreras significativas. Por ejemplo, a pesar del enorme potencial del país, solo el 0.08% de las hectáreas de cultivos orgánicos a nivel mundial se producen en Colombia, en gran parte debido a las dificultades asociadas a la certificación. Esta situación crea una "brecha de competitividad": los mercados exigen productos certificados, pero las condiciones estructurales y tecnológicas del campo colombiano impiden que la mayoría de los productores cumplan con esta demanda. Se genera así un ciclo en el que la falta de acceso a tecnología perpetúa la exclusión de los mercados más rentables, limitando el desarrollo rural. La superación de esta brecha requiere, por tanto, de soluciones innovadoras que democratizen el acceso al conocimiento y las herramientas necesarias para la certificación.

El escalamiento de la plataforma CertiAgro no solo responde a las necesidades específicas del proyecto, sino que también alinea con la misión de "Bioeconomía para una Colombia potencia viva y diversa: Hacia una sociedad impulsada por el conocimiento" presentada por el Gobierno Nacional. Este proyecto contribuye significativamente a incentivar un país con mayor productividad verde y mayor responsabilidad ambiental. Sus contribuciones se alinean con las líneas estratégicas y de acción delineadas, que incluyen la producción agropecuaria 4.0 (inteligente, digital y de precisión), la educación para la implementación de actividades productivas rurales sostenibles (Artaraz, 2002), y el impulso de la producción limpia, consumo consciente y alimentación saludable.

La relevancia de la agricultura como motor económico se refleja en datos proporcionados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2022). Según la FAO, el crecimiento del PIB derivado de la agricultura es al menos dos veces más eficaz en la reducción de la pobreza que el crecimiento en sectores no agrícolas y hasta cinco veces más eficaz en países de escasos recursos e ingresos bajos. Por lo tanto, fortalecer el sector agrícola se convierte en una necesidad vital desde la perspectiva de reducción de la pobreza y el impulso económico. Sin embargo, a pesar de la importancia del sector agrícola, persisten desafíos relacionados con prácticas agropecuarias inadecuadas en Colombia, a menudo exacerbadas por la falta de herramientas tecnológicas que faciliten y contribuyan al mejoramiento del sector. La ausencia de alternativas efectivas ha contribuido a que el sector se vea limitado en su acceso a nuevos mercados. En este contexto, se ha identificado que la implementación de sellos de certificación de alcance mundial para cultivos de producción puede ofrecer soluciones valiosas para minimizar el impacto de las malas prácticas en los sectores agropecuarios. Estos sellos buscan promover las buenas prácticas de producción, añadiendo valores como la sostenibilidad social y ambiental, así como beneficios económicos al obtener productos de mayor calidad y facilidad de comercialización.

Este enfoque no solo responde a la necesidad de superar los desafíos actuales del sector agrícola en Colombia, sino que también se alinea con las demandas cambiantes de los mercados. En la actualidad, los consumidores son cada vez más exigentes, y la calidad tanto del producto final como del proceso de obtención se erige como un factor fundamental para una comercialización más justa y sostenible (Lachman et al., 2022).

Para dar continuidad al proceso expositivo del artículo, cabe mencionar que el proyecto en cuestión tiene como objetivo principal escalar, mediante el desarrollo tecnológico, la plataforma cloud y móvil CertiAgro. Este ambicioso propósito se enmarca en la promoción de la competitividad, tanto propia como de los productores agrícolas priorizados en el Departamento del Cauca. La esencia del proyecto reside en respaldar los procesos productivos de estos agricultores, orientándolos hacia la obtención de certificaciones que posibiliten un agro más competitivo y biosostenible. La meta general del proyecto implica un avance significativo en el desarrollo tecnológico de CertiAgro, llevando la plataforma de un nivel Tecnológico de Preparación (TRL) 4 a un nivel TRL 7. Este proceso de escalamiento se abordará mediante la implementación de metodologías iterativas, ágiles y de innovación abierta. Estas estrategias no solo aseguran un desarrollo eficiente, sino que también fomentan la adaptabilidad de la plataforma a los desafíos cambiantes del entorno agrícola y tecnológico (Lachman et al., 2022).

El propósito del proyecto es desarrollar y validar una herramienta tecnológica que simplifique y democratice el acceso a procesos de certificación de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) para los productores del departamento del Cauca.¹

El objetivo general del proyecto se centra en escalar la plataforma CertiAgro, llevándola de un nivel de madurez TRL 4 a un TRL 7. De acuerdo con el marco conceptual establecido, esto implica una transición fundamental:

- Punto de Partida (TRL 4): La plataforma existía como un prototipo funcional validado en un entorno de laboratorio o controlado, donde sus componentes básicos habían sido probados de manera aislada o en condiciones simuladas.¹⁶
- Meta del Proyecto (TRL 7): El objetivo era alcanzar un prototipo de sistema completo, cuya funcionalidad se demostrara de manera integral en un entorno operativo real, es decir, en las fincas de los productores beneficiarios, enfrentando las condiciones y variables del mundo real.¹⁶

Para lograr este avance significativo, el proyecto se estructuró en torno a tres objetivos específicos:

O1: Escalar tecnológicamente la plataforma CertiAgro, basándose en metodologías iterativas, ágiles y de innovación abierta para avanzar de TRL 4 a TRL 7.

O2: Validar y probar la plataforma escalada en los entornos reales de producción agrícola de las organizaciones productivas priorizadas en el departamento del Cauca.

O3: Contribuir al fortalecimiento del sector productivo y otros actores del Sistema Nacional de Ciencia,

Tecnología e Innovación (SNCTel) a través de la transferencia de conocimiento y la divulgación de los resultados obtenidos.

En conjunto, estos objetivos delinean una ruta estratégica que no solo busca el desarrollo de un producto tecnológico, sino también su validación práctica y su integración en el ecosistema de innovación agrícola regional y nacional.

Para gestionar y mitigar los riesgos inherentes al desarrollo de nuevas tecnologías, diversas organizaciones a nivel global han adoptado el marco de los Niveles de Madurez Tecnológica o Technology Readiness Levels (TRL). Originada en la NASA en la década de 1970 para evaluar la madurez de las tecnologías espaciales, la escala TRL es un sistema de medición estandarizado que clasifica una tecnología en una escala de nueve niveles, desde la investigación básica (TRL 1) hasta un sistema completamente probado y operativo en su entorno final (TRL 9). Su utilidad para proporcionar un lenguaje común sobre el estado de desarrollo tecnológico ha llevado a su adopción por parte de entidades como el Departamento de Defensa de Estados Unidos y la Comisión Europea en sus programas de financiamiento para la investigación y la innovación.

En Colombia, el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias) ha incorporado la escala TRL como una metodología fundamental para la evaluación, financiación y seguimiento de proyectos de I+D+i. Esta adopción posiciona a los TRL como el estándar oficial dentro del cual se enmarcan las iniciativas de innovación tecnológica en el país, proporcionando un marco para medir el progreso y justificar la inversión pública y privada en el desarrollo tecnológico.

La aplicación del marco TRL genérico al sector agrícola requiere una contextualización, dado que los sistemas biológicos y los entornos de producción abiertos presentan variables distintas a las de los entornos de ingeniería controlados. Por ello, han surgido adaptaciones sectoriales que reinterpretan los niveles en función de los hitos del desarrollo agropecuario. Un ejemplo destacado es el Crop Research TRL del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), que traduce los niveles a etapas como "experimentos de prueba de concepto", "ensayos de campo" y "validación de la aceptación comercial". De manera similar, la Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria (Embrapa), un referente en la región ha desarrollado una escala dual TRL/MRL (Manufacturing Readiness Levels), que evalúa no solo la madurez del producto tecnológico (TRL), sino también la del proceso de producción o manufactura asociado (MRL), reconociendo que la capacidad de escalar un proceso es tan crítica como la funcionalidad del producto en sí. La Tabla 1 presenta una síntesis comparativa de estas definiciones.

Tabla 1. Definiciones de los Niveles de Madurez Tecnológica (TRL) y su Aplicación en el Sector Agrícola

Nivel	Definición Genérica (Basada en Minciencias/NASA)	Aplicación Específica en Agricultura (Basada en USDA Crop Research TRL)
TRL 1	Principios básicos observados y reportados.	Desafío u oportunidad identificado.
TRL 2	Concepto tecnológico y/o aplicación formulada.	Solución o enfoque formulado.
TRL 3	Prueba de concepto analítica y experimental.	Experimentos de prueba de concepto.
TRL 4	Validación de componente en entorno de laboratorio.	Ensayos de campo o experimentos de validación.
TRL 5	Validación de componente en entorno relevante.	Validación de la aceptación comercial.
TRL 6	Demostración de prototipo en entorno relevante.	Inicio de la producción a gran escala.
TRL 7	Demostración de prototipo en entorno operativo.	Disponibilidad en el mercado.
TRL 8	Sistema completo y calificado mediante pruebas.	Uso comercial establecido.
TRL 9	Sistema real probado con éxito en operaciones.	Capacidad de producción sostenida alcanzada.

Fuente: construcción esta investigación

En el contexto latinoamericano, el análisis de proyectos financiados por FONTAGRO revela que la mayoría de las iniciativas de innovación agrícola comienzan en un TRL 3 (prueba de concepto) y concluyen en un TRL 6 (demostración de prototipo en entorno relevante), con un salto tecnológico promedio de 2.7 niveles. Esta data sirve como un punto de referencia para evaluar la ambición y el progreso de nuevos proyectos. Adicionalmente, experiencias como el Premio Nacional de Innovación en Guatemala han evidenciado las limitaciones de una evaluación puramente técnica en contextos de impacto social, subrayando la necesidad de complementar la

escala TRL con criterios de "idoneidad" y adecuación al usuario final, lo que refuerza la importancia de los enfoques de diseño centrado en el ser humano.

2. Desarrollo

La evolución de la agricultura ha experimentado un cambio significativo gracias a la introducción de tecnologías que permiten la recolección y análisis de datos en tiempo real. Este enfoque, conocido como agricultura de precisión, implica la utilización de datos relacionados con el clima, la calidad del aire y del suelo, los costos de equipos, la disponibilidad y el mantenimiento, para tomar decisiones informadas en la siembra, fertilización y cosecha de cultivos (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (Argentina) et al., 2017). Esta práctica se ha convertido en una parte integral de la revolución agrícola actual, que se inició a principios del siglo XX con la introducción de herramientas mecánicas y se consolidó en los años 90 con el desarrollo de nuevos métodos de producción genética.

La agricultura de precisión ofrece beneficios sustanciales al definir los cultivos y los requisitos del suelo para lograr una productividad óptima y, al mismo tiempo, preservar los recursos y garantizar la sostenibilidad ambiental. Este enfoque aborda problemas críticos como el desperdicio de recursos, los altos costos y el impacto ambiental, contribuyendo así a un desarrollo agrícola más eficiente y sostenible (EOS, 2020). En el ámbito de la agricultura sostenible, la implementación de tecnologías de información y comunicación (TIC) se ha convertido en un elemento clave para gestionar las fincas de manera más eficiente. La agricultura sostenible se define como un sistema de prácticas agrícolas ecológicas que utiliza innovaciones científicas para producir alimentos saludables con prácticas respetuosas para el suelo, el aire, el agua, y que respeta los derechos y la salud de los agricultores (EOS, 2020).

A nivel nacional, el sector agrícola enfrenta desafíos importantes, como la certificación de productos, la escasez de laboratorios especializados y la falta de acceso a mercados internacionales. En Colombia, solo el 0,08% de los 57,8 millones de hectáreas de cultivos orgánicos a nivel mundial se producen en el país, lo que representa una oportunidad de crecimiento significativa. Sin embargo, las certificaciones costosas y los altos requisitos para el comercio de productos orgánicos limitan su participación en el mercado internacional (Ifoam, 2022). Para superar estos desafíos, se requiere un enfoque integral que incluya el acceso a tecnologías e investigación. Según el DANE, el 85% de los productores en áreas rurales dispersas en Colombia no reciben asistencia técnica, lo que destaca la necesidad de avanzar en este aspecto. El Gobierno colombiano está haciendo esfuerzos significativos para superar las brechas digitales y fomentar la incorporación de tecnologías de la información y comunicación (TIC) en el sector agropecuario (DANE, 2014; DANE, 2022).

Además, es importante considerar que en el ámbito normativo, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) juega un papel crucial en la certificación de buenas prácticas agrícolas (BPA). La certificación ICA de fincas en BPA busca garantizar que un producto cumpla con los requisitos específicos, desde aspectos ambientales y

de seguridad hasta la calidad y sostenibilidad. Estas certificaciones contribuyen al desarrollo de un sistema agrícola más eficiente y sostenible (ICA, 2013; ICA, 2021). A nivel regional, el Departamento del Cauca ha sido pionero en el desarrollo de herramientas tecnológicas para mejorar la productividad agrícola. El aplicativo CertiAgro, una evolución del producto CafetHéroe, ha surgido como una solución tecnológica para la implementación de buenas prácticas agrícolas en diferentes sectores, desde café, hasta la quinua. Este proyecto ha sido reconocido a nivel regional y nacional por su contribución a la innovación en el sector agrícola (Gobernación del Cauca, 2021).

En el contexto internacional, se destaca la importancia de la bioeconomía como un enfoque para el desarrollo sostenible. El informe del DNP (2018) señala que, en el sector agrícola y pecuario, hay una creciente demanda de productos de alta calidad por parte de los consumidores, lo que impulsa la necesidad de certificaciones y acreditaciones. Sin embargo, la escasez de laboratorios especializados en Colombia se convierte en una barrera significativa para satisfacer estas demandas y limita el acceso a mercados internacionales (MINCIENCIAS, 2020; DNP, 2018). Es por ello que la implementación de tecnologías de información son clave para el desarrollo del sector agrícola de forma más eficiente y sostenible. La certificación de buenas prácticas agrícolas se presenta como una herramienta fundamental para garantizar la calidad, sostenibilidad y acceso a mercados internacionales. Proyectos innovadores, como CertiAgro, demuestran cómo la tecnología puede ser utilizada para abordar desafíos específicos en el ámbito agrícola, contribuyendo al desarrollo económico y sostenible de las comunidades rurales (Zang, 2012).

En el marco del análisis de la agricultura de precisión y las buenas prácticas agrícolas (BPA), se hace relevante considerar las contribuciones de diversas fuentes especializadas en el campo. El "Manual de buenas prácticas agrícolas para la agricultura familiar" de Izquierdo, Rodríguez Fazzone, y Durán (2007) proporciona directrices fundamentales para el establecimiento y mantenimiento de prácticas agrícolas sostenibles. Este recurso destaca la importancia de abordar las necesidades específicas de la agricultura familiar, resaltando la necesidad de prácticas respetuosas con el medio ambiente y socialmente responsables. En contraste, las investigaciones recientes de Vélez Robledo (2021) ofrecen una perspectiva crítica sobre la agricultura orgánica, señalando que solo el 1% de las hectáreas dedicadas a la producción de alimentos a nivel mundial están destinadas a la agricultura orgánica. Esta baja proporción en Colombia, según el autor, sugiere un desafío significativo en la expansión de prácticas agrícolas más sostenibles. Estos datos resaltan la necesidad de promover y facilitar la adopción de prácticas agrícolas orgánicas para contribuir a un sistema alimentario más sostenible.

Otra consideración teórica es la investigación de Gómez, Mossos-Vivas, y Herrera-Ramírez (2021) sobre el desarrollo de una herramienta tecnológica para facilitar buenas prácticas agrícolas en pequeños agricultores del municipio de Argelia, ésta ofrece un ejemplo concreto de cómo la tecnología puede desempeñar un papel clave en la implementación de prácticas agrícolas sostenibles a nivel local. Este enfoque, en línea con iniciativas como CertiAgro, muestra cómo las soluciones tecnológicas pueden adaptarse a contextos específicos para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad en la producción agrícola a pequeña escala (Izquierdo, 2013).

Estas perspectivas complementan el panorama general de la agricultura de precisión y las BPA, destacando la importancia de considerar las particularidades de la agricultura familiar, el papel crítico de la tecnología y los desafíos específicos de la agricultura orgánica (ICA, 2021). En conjunto, estas fuentes subrayan la necesidad de un enfoque integral y adaptado a contextos específicos para abordar los desafíos y avanzar hacia prácticas agrícolas más sostenibles. En un contexto más amplio, la certificación de buenas prácticas agrícolas, como la mencionada por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), se destaca como un mecanismo fundamental para garantizar que las prácticas agrícolas cumplan con estándares específicos, promoviendo así la calidad y la sostenibilidad en la producción (ICA, 2013; ICA, 2021). La certificación Global GAP, también mencionada por Bureau Veritas (2022), se presenta como un referente internacional que refuerza la importancia de establecer estándares que no solo garanticen la calidad, sino que también fomenten prácticas agrícolas responsables.

Por otro lado, el informe de MINCIENCIAS (2020) sobre bioeconomía destaca la importancia de impulsar una sociedad basada en el conocimiento y la responsabilidad en el uso de los recursos naturales. La bioeconomía se presenta como una oportunidad estratégica para lograr un desarrollo sostenible, y la certificación de productos agrícolas se erige como un componente esencial para asegurar que estos productos cumplan con estándares de calidad y sostenibilidad. Es importante considerar que en el ámbito nacional, la falta de acceso a tecnologías e investigación en áreas rurales, como se evidencia en los hallazgos del Censo Nacional Agropecuario (CNA, 2014) y el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2021), subraya la importancia de abordar las brechas tecnológicas para mejorar la eficiencia y la competitividad en el sector agrícola. La iniciativa del Ministerio de Agricultura para fortalecer el desarrollo del sector agropecuario a través de estrategias y proyectos TIC (Ministerio de Agricultura, 2021) se presenta como un paso crucial hacia este objetivo.

El informe del Departamento Nacional de Planeación (DNP, 2018) resalta la importancia de las certificaciones en un contexto de aumento en la demanda de productos de alta calidad. Sin embargo, se señala una barrera significativa relacionada con la escasez de laboratorios especializados en Colombia para certificar o acreditar los bioproductos generados. Este problema no solo afecta la satisfacción de las demandas internas, sino que también limita el acceso a mercados internacionales. En este panorama, la Federación Internacional de Movimientos de Agricultura Orgánica (Ifoam) resalta que solo el 0,08% de los 57,8 millones de hectáreas de cultivos orgánicos a nivel mundial se producen en Colombia. A pesar del potencial de recursos naturales en el país, los altos costos y los requisitos para la certificación de productos orgánicos limitan su participación en el mercado internacional (Ifoam, 2022). Este hecho reitera la necesidad planteada en el proyecto: abordar los desafíos relacionados con la certificación y la implementación de buenas prácticas agrícolas para fomentar la competitividad en el ámbito global.

En cuanto al marco normativo nacional, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) juega un papel fundamental en la certificación de buenas prácticas agrícolas (ICA, 2013). La certificación ICA de fincas en BPA, que busca cumplir requisitos específicos en aspectos ambientales, de seguridad, calidad y sostenibilidad, refleja el compromiso del país en establecer estándares que promuevan prácticas agrícolas responsables. La

actualización de la normativa por parte del ICA, como se menciona en la referencia (ICA, 2021), indica la adaptabilidad del marco normativo para responder a las necesidades cambiantes del sector agrícola, la tendencia hacia la agricultura de precisión se ha consolidado como una estrategia clave para la toma de decisiones informadas en la siembra, fertilización y cosecha de cultivos. La implementación de tecnologías de información y comunicación (TIC) en el sector agropecuario no solo mejora la eficiencia sino que también contribuye al desarrollo de prácticas agrícolas sostenibles. (Lachman et al., 2022)

En relación con la bioeconomía, el informe de MINCIENCIAS (2020) destaca la importancia de este enfoque para lograr un crecimiento sostenible en Colombia. La bioeconomía se presenta como una oportunidad para impulsar una sociedad basada en el conocimiento y aprovechar los recursos naturales de manera responsable. En este contexto, la certificación de productos agrícolas juega un papel crucial al garantizar que los productos cumplan con estándares de calidad y sostenibilidad. Es por ello que el acceso a tecnologías e investigación es un factor determinante para mejorar la productividad en el sector agrícola. Según el Censo Nacional Agropecuario (CNA) y el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, el 85% de los productores en áreas rurales dispersas en Colombia declararon no recibir asistencia técnica. Este hallazgo alerta sobre el atraso en materia de asistencia técnica y acceso a maquinaria y tecnologías, lo cual es fundamental para cerrar la brecha tecnológica en el sector agrícola (CNA, 2014; Ministerio de Agricultura, 2021). La iniciativa del Ministerio de Agricultura para fortalecer el desarrollo del sector agropecuario a través del uso de tecnología es un paso significativo en la dirección correcta. La implementación de estrategias y proyectos TIC, como se menciona en la referencia (Ministerio de Agricultura, 2021), no solo mejorará la eficiencia en el sector, sino que también generará efectos positivos a corto y largo plazo.

Es pertinente mencionar ¿qué es CertiAgro?, cabe aclarar que es una plataforma tecnológica diseñada para apoyar a los productores de quinua en la implementación de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) según las normas establecidas por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). La herramienta se compone de una aplicación móvil funcional sin conexión a internet y un prototipo web que gestiona diferentes tipos de certificaciones agrícolas (Aguilar, 2009). La plataforma utiliza la gamificación como estrategia principal, incentivando la participación activa de los agricultores a través de un entorno intuitivo y el registro de evidencias de cumplimiento de los criterios establecidos. Además, se incorpora un sistema de reconocimientos e insignias para motivar a los usuarios y facilitar la solicitud de certificación (Bartle, 1996).

El enfoque de CertiAgro en el Departamento del Cauca emerge como una respuesta a la complejidad en el proceso de certificación y mejoramiento de los procesos productivos. Este aplicativo, que evolucionó a partir del producto CafetHéroe, surgió de la necesidad identificada en productores de café especial y, posteriormente, se extendió a otros sectores como la quinua (Mora, Arias, Correa, 2018). Su reconocimiento en eventos como el Hackathon 2015 y el premio JonasRundquist a la innovación en el mismo año indican el impacto positivo y la relevancia de estas soluciones tecnológicas en la mejora de la productividad agrícola (Gobernación del Cauca, 2021).

La plataforma utiliza la metodología de gamificación basada en el modelo RAMP (Relatedness, Autonomy, Mastery, Purpose) de Bartle, que segmenta a los usuarios en función de su relación, autonomía, maestría y propósito. Esta metodología busca involucrar a los productores desde diferentes perspectivas, considerando la diversidad de perfiles y motivaciones (Bartle, 1996). Ella, se enfoca en proporcionar contenidos técnicos de las BPA de manera accesible y comprensible para los agricultores, promoviendo la interacción constante a través de desafíos, resultados e indicadores. Se destaca la importancia de mantener la motivación intrínseca y extrínseca para garantizar la participación a largo plazo (Marczewski, 2013).

Las alianzas estratégicas con organizaciones cafeteras, como el Comité Departamental de Cafeteros del Cauca, y otras organizaciones como Asohofrucol Cauca, AsoCal, y el Proyecto Quinoa Cauca, demuestran cómo CertiAgro ha surgido como resultado del trabajo articulado y colaborativo con diversos actores en el sector agrícola. Este enfoque colaborativo se alinea con las tendencias internacionales que enfatizan la importancia de la cooperación entre diferentes entidades para abordar los desafíos agrícolas de manera integral. Potenciando la combinación de conocimientos internos de la empresa con aportes externos, provenientes de disciplinas diversas, grupos de investigación y experiencias técnicas, enriquece significativamente la propuesta (Aguilar, 2009).

Por otro lado, el desarrollo de la plataforma se ha basado en un proceso de cocreación e innovación abierta, un paradigma que concibe la innovación como un sistema abierto que integra conocimiento tanto interno como externo a la organización. Mediante talleres participativos con productores, técnicos y otros actores del sector, se identificaron y priorizaron las funcionalidades de la plataforma. Este enfoque de diseño centrado en el usuario garantiza que la tecnología resultante sea pertinente, útil y fácil de usar, factores que son determinantes para su adopción. Al involucrar a los usuarios finales desde las primeras etapas del diseño, se asegura que la solución responda a sus necesidades reales y se integre de manera fluida en sus rutinas de trabajo, superando así una de las principales barreras para la adopción tecnológica en el campo, la percepción de que las nuevas herramientas son complejas o irrelevantes para sus contextos específicos campo (Sanders & Simons, 2009).

En su momento la investigación que propició la gestación de CertiAgro consideró un segundo nivel en sus recomendaciones, por ello se exponía que la herramienta era aplicable para la implementación de varios tipos de certificación agrícola, ampliando su alcance y contribuyendo al desarrollo sostenible de la producción de quinoa en la región Mora, Arias, Correa, 2018). En la actualidad, CertiAGRO se encuentra en un nivel tecnológico TRL 4, según los Technological Readiness Levels (Niveles de Preparación Tecnológica), evidenciando validaciones del sistema en condiciones próximas a la realidad, como en organizaciones productivas de quinoa y caña panelera en la región. Estas validaciones han arrojado resultados altamente favorables, generando considerable expectación entre los usuarios y prospectos.

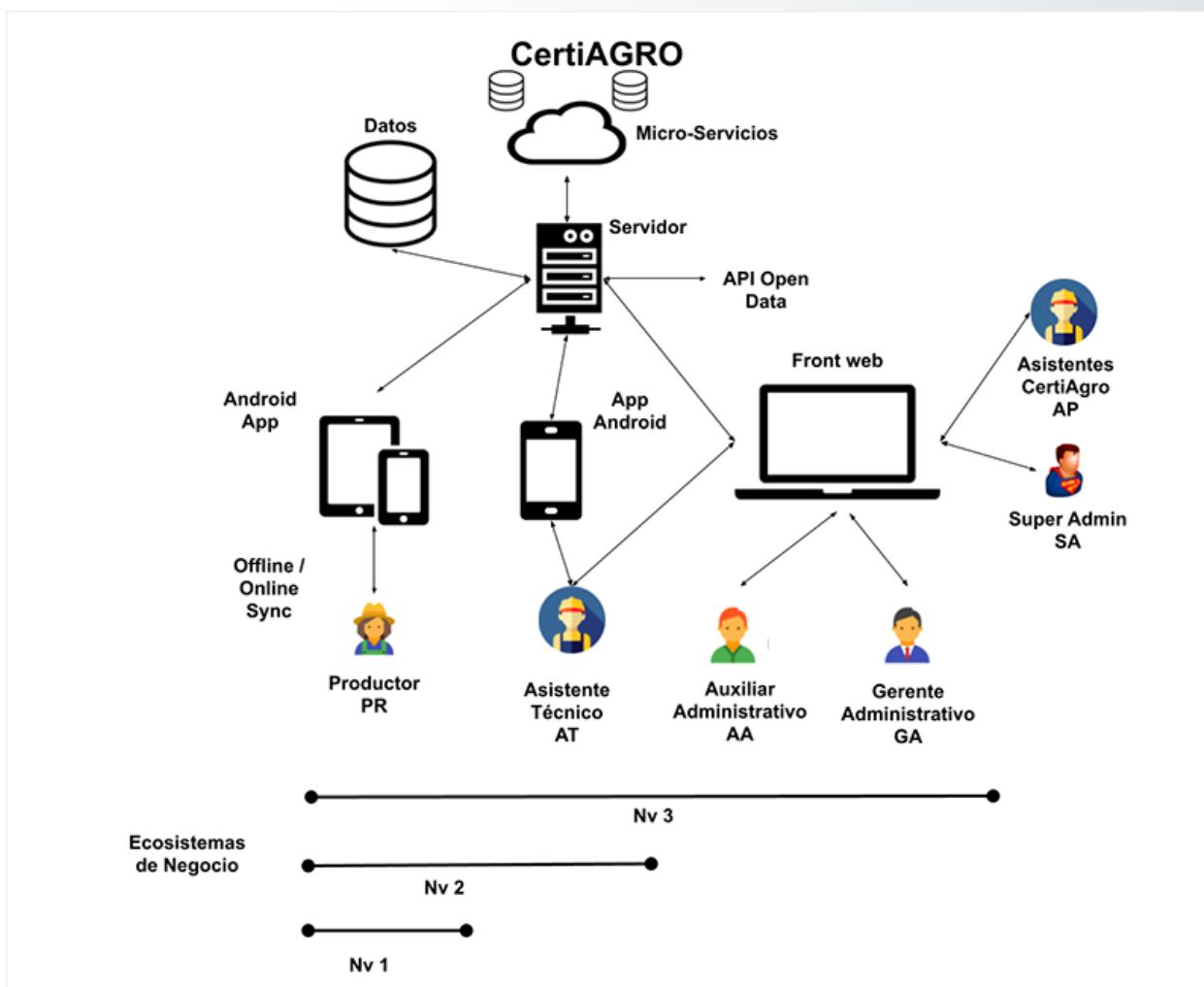
El prototipo funcional móvil de CertiAgro presenta características distintivas como:

- Posibilidad de seleccionar diversos tipos de certificación agrícola.
- Proceso sencillo de creación de cuenta de usuario sin requerir correo electrónico, respaldado por una guía de introducción detallada.
- Interfaz visual amigable e intuitiva, con un lenguaje inclusivo y simple para cada sección.
- Información detallada y práctica de cada criterio.
- Inclusión de fotografías referenciales y ejemplos de predios certificados.
- Registro de evidencias mediante texto, fotografía, video, selección de documentos y fechas.
- Seguimiento del progreso a nivel de secciones, componentes y global.
- Sistema gamificado que recompensa positiva y emocionalmente la realización de tareas.
- Establecimiento de un sistema de ranking que destaca los puntajes más altos entre los usuarios de CertiAgro.

Estas características y su funcionalidad pueden apreciarse en un video de validación de concepto y prototipo en https://youtu.be/3_ri91amynQ . El proceso de validación se llevó a cabo durante la participación en la incubadora de empresas de base tecnológica CREATIC, donde Kcumen Digital, desarrollador de CertiAgro, obtuvo resultados muy alentadores (https://youtu.be/uNb_vZflxY8) , incluso realizando pruebas en entornos controlados con algunos productores agrícolas.

A pesar del avance significativo logrado en el desarrollo del prototipo móvil, CertiAgro identifica la necesidad de incorporar componentes tecnológicos adicionales para vincular otros actores clave en los procesos de implementación de certificaciones agrícolas. Estos actores incluyen la asistencia técnica y las organizaciones de fomento agropecuario. Con el desarrollo del proyecto actual, se busca integrar estas nuevas funcionalidades, sometiéndolas a pruebas y validaciones tanto en entornos controlados como en situaciones reales, con el objetivo de mejorar y ampliar la aplicación.

Figura 1. Diagrama arquitectura alto nivel CertiAGRO



Fuente: Autor.

CertiAgro actualmente cuenta con una completa documentación técnica desde el punto de ingeniería de software, el resguardo de su código fuente de programación en repositorios de control de versiones y el montaje en instancias detenidas de algunos servidores con un alto nivel de escalamiento como lo son los servicios de Azure de Microsoft y AWS de Amazon.

En términos de la metodología, es importante mencionar que cada uno de los objetivos considera una serie de acciones, pero todo está enmarcado en técnicas e instrumentos validados desde las metodologías ágiles e innovación abierta. Este conjunto de interacciones tiene lugar con el usuario. De esta manera, dicho procedimiento se alinea con los fundamentos de lo que se conoce como Innovación Abierta, un término acuñado por el profesor Henry Chesbrough de la Universidad de California, EE.UU., a mediados de la década de los 90. La esencia de este proceso consiste en concebir la innovación como un sistema abierto en el cual participan tanto actores internos como externos a la organización (Zang y Cruz, 2012).

En el primer objetivo: Escalar tecnológicamente la plataforma CertiAgro basados en metodologías iterativas, ágiles y de innovación abierta, llevándola de TRL4 a TRL7. Su propósito radica en la expansión tecnológica de la plataforma CertiAgro, mediante la aplicación de metodologías iterativas, ágiles e innovación abierta, elevándola de TRL4 a TRL7. Se plantea la implementación de metodologías de desarrollo de software para obtener requerimientos definidos y un alcance claro en el desarrollo tecnológico. Esto implica el uso de frameworks iterativos y validables para obtener un prototipo tecnológico pertinente y funcional. (Artieda-Rojas et al., 2019)

Entre las metodologías y marcos de trabajo seleccionados se encuentran:

- Historias de usuario: para la identificación de características a implementar en el prototipo funcional CertiAgro a través de innovación abierta. (Izaurrealde, 2013)
- Lean startup: enfoque ágil para el desarrollo de productos y la gestión de startups, aplicado para la eficiencia y flexibilidad del proceso. (Ries, 2014)
- Kanban: para la gestión visual y ágil de tareas, facilitando la planificación y ejecución de actividades. (Japan Management Association, 2018)
- Scrum y Scrum UX: metodologías ágiles que promueven la colaboración y adaptabilidad, esenciales para un desarrollo iterativo y validable. (Kikitamara & Noviyanti, 2018)
- GTD (Getting Things Done): un sistema de gestión personal que optimiza la productividad, contribuyendo a la eficiencia del desarrollo. (Done, 2013)

Los resultados esperados de la implementación de estas metodologías son:

- Esquema de historias de usuario: definido para identificar las características a implementar en el prototipo funcional CertiAgro.
- Prototipo tecnológico sofisticado: en fase TRL7 para la implementación de criterios de certificación agrícola biosostenible. Documento descriptivo con el proceso de verificación y desglose de normativas presentes en el prototipo.

Para el segundo objetivo: validar y transferir la plataforma escalada de CertiAgro en los entornos reales de producción agrícola de las organizaciones productivas priorizadas. Su centro está en la validación iterativa de la plataforma CertiAgro en entornos cercanos a los reales, con el respaldo del aliado estratégico TECNICAFAÉ y la colaboración con organizaciones productivas vinculadas. Se emplearán mecanismos como pruebas unitarias funcionales y de rendimiento, pruebas heurísticas de usabilidad, recorridos cognitivos y diversas investigaciones exploratorias y descriptivas.

Entre los mecanismos a utilizar se encuentran:

- Pruebas unitarias funcionales y de rendimiento: para evaluar la operatividad y eficiencia de la

plataforma.

- Pruebas heurísticas de usabilidad: recorridos cognitivos y de usabilidad plural para garantizar una experiencia óptima del usuario.
- Investigación exploratoria: para estimar el tamaño y características del mercado, proporcionando datos cruciales para la implementación efectiva.
- Investigación descriptiva y correlacional: para profundizar en la comprensión de los aspectos cualitativos y cuantitativos relacionados con la plataforma CertiAgro.

Finalmente, el tercer objetivo se preocupó por contribuir al fortalecimiento del sector productivo y demás actores del SNCTeI a través de la transferencia del conocimiento y la divulgación de resultados obtenidos. Su enfoque está en la implementación de metodologías y actividades para gestionar, proteger y difundir los resultados del proyecto. Se busca un amplio alcance mediante herramientas tecnológicas web, facilitando la conexión remota entre diversos actores. Las actividades incluyen reuniones presenciales y virtuales, ciclos de conferencias, webinars, talleres técnicos y la construcción de manuales de usuario. Los resultados esperados son el registro de software ante la Dirección Nacional de Derechos de Autor, la difusión de resultados en colaboración con productores y actores del SNCTeI, y la elaboración de un artículo científico sobre los resultados obtenidos durante el proceso de desarrollo tecnológico del prototipo para su publicación en una revista indexada.

3. Resultados alcanzados

El proyecto estratégicamente elevó el nivel de desarrollo de la plataforma digital CertiAgro mediante su escalamiento tecnológico, buscando facilitar su inserción comercial en mercados nacionales e internacionales. Se llevó a cabo una identificación meticulosa de las características tecnológicas y de usabilidad para mejorar su adopción, con el objetivo de generar valor en el sector agropecuario.

A lo largo del proyecto, se resalta el papel clave de CertiAgro como una herramienta que simplifica el proceso de implementación de certificaciones biosostenibles para los productores agrícolas, contribuyendo al mejoramiento de sus procesos productivos. La visión integral del proyecto se refleja en la capacidad de CertiAgro para ampliar el potencial de mercado de los productores y posibilitar su inserción comercial en el exterior, generando impactos económicos directos y beneficios sociales para las regiones involucradas. El diseño y desarrollo de CertiAgro, realizado en etapas iterativas y ágiles, ha permitido alcanzar un nivel de sofisticación tecnológica notable, situándose en la fase TRL7. A través de la implementación de metodologías innovadoras, se ha logrado una plataforma que cumple con los requisitos técnicos y garantiza una experiencia de usuario amigable e intuitiva. (Mora Pedreros et al., 2018)

Los resultados obtenidos se reflejan en la consecución de un prototipo tecnológico avanzado, con un impacto

tangible en la práctica agrícola. CertiAgro ha demostrado ser una herramienta efectiva para los agricultores, apoyándolos en la implementación de prácticas sostenibles y contribuyendo a la consolidación de un sector agropecuario más robusto y competitivo. En el marco del primer objetivo, se llevó a cabo la identificación de características prioritarias para el proceso de sofisticación tecnológica mediante ejercicios de innovación abierta. Este proceso se desarrolló en tres fases fundamentales. En primer lugar, se implementó una actividad de innovación abierta en colaboración con personal técnico y productores de café previamente identificados por TECNICAFAE. Posteriormente, con la información recopilada, se procedió a la clasificación de las características identificadas. Finalmente, utilizando la información previa, se construyó el esquema de historias de usuario, proporcionando así un marco claro para el desarrollo tecnológico.

Este enfoque metodológico permitió la participación activa de actores clave, como el personal técnico y los productores de café, asegurando una recopilación exhaustiva de necesidades y prioridades. La colaboración con TECNICAFAE facilitó la identificación de expertos en la materia y la creación de un espacio propicio para la generación de ideas innovadoras. La aplicación de ejercicios de innovación abierta se reveló como una estrategia efectiva para la obtención de información valiosa, ya que involucró a los actores relevantes desde el principio. La clasificación de características identificadas permitió priorizar elementos clave, destacando aquellos que impactarían significativamente en el proceso de sofisticación tecnológica.

La construcción del esquema de historias de usuario consolidó de manera estructurada las necesidades y expectativas identificadas, proporcionando un mapa claro para guiar el desarrollo tecnológico. Este enfoque iterativo y participativo aseguró que las características esenciales fueran reconocidas y abordadas de manera efectiva en el proceso de sofisticación tecnológica de CertiAgro.

Figura 2. Espacio de cocreación y diseño de usuario



Fuente: Autores

Posteriormente una vez desarrolladas las metodologías ágiles en los talleres participativos se construye el esquema de historia de usuarios. La figura 3 representa un ejemplo de lo desarrollado

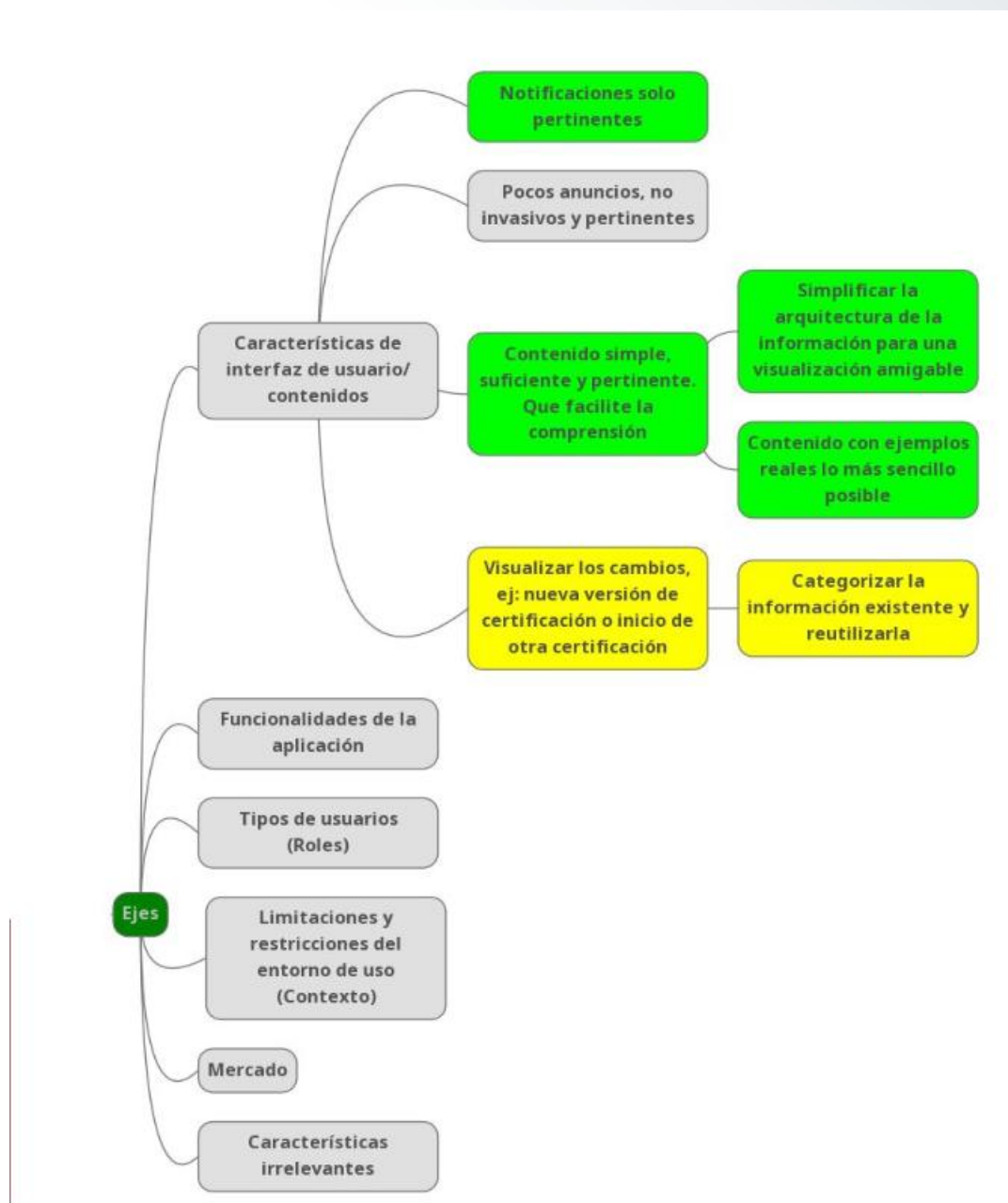
Figura 3. Ejemplo de historia de usuario construida en el proyecto

HISTORIA DE USUARIO	ID: 01	Visualización de criterios
Como Productor quiero visualizar todos los criterios requeridos en un tipo de certificación para dimensionar su complejidad y requisitos.		
Validación: En la vista general de la certificación de la app mostrar en lista todos los criterios ordenados por categorías.	Valor	100
HISTORIA DE USUARIO	ID: 09	Gestionar productores a su cargo
Como Asistente Técnico quiero tener la posibilidad de visualizar las evidencias de mis productores vinculados para poder medir y acompañar su progreso		
Validación: el asistente técnico tiene la posibilidad visualizar el progreso de los productores a los que les esté brindando el acompañamiento.	Valor	100
	Prioridad	Alta
	Estimación	100 horas

Fuente: Autores.

Esto permitió la construcción de un esquema de características priorizadas para adelantar la fase de sofisticación tecnológica.

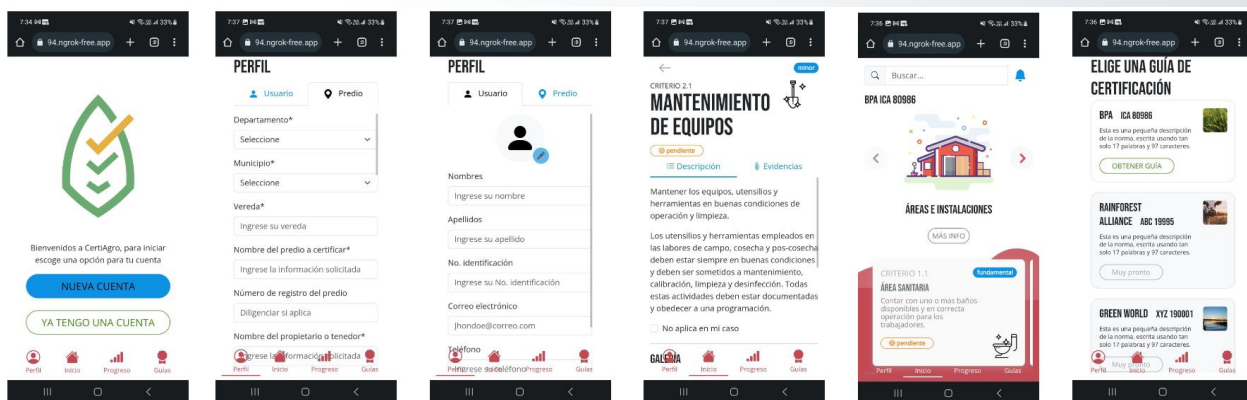
Figura 4. Esquema de caracterización de CertiAgro



Fuente: Autores.

Uno de los aspectos más notorios en la interfaz del usuario es la simplicidad en su uso, lo que genera sólo el uso esencial de la tecnología a partir de notificaciones necesarias, anuncios limitados, contenido simple y claro, y la adecuada visualización de los cambios. Igualmente, se han desarrollado tareas investigativas, de diseño y un primer modelo para el prototipo funcional CertiAGRO. Integrando el sistema de PWA, con el fin de construir un producto que pueda funcionar correctamente desde cualquier dispositivo móvil.

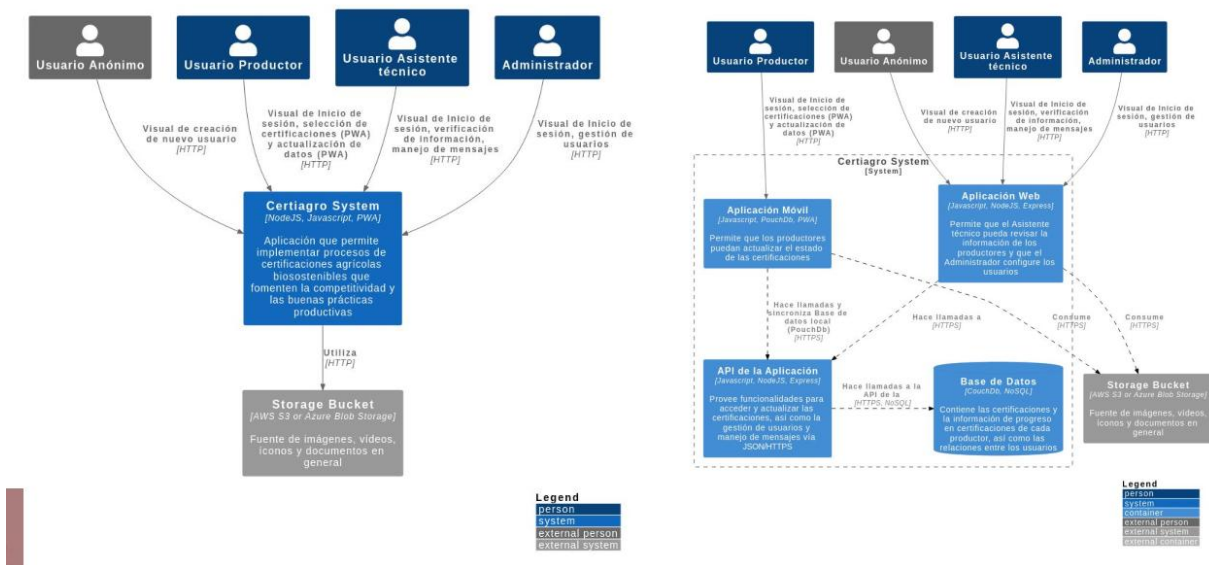
Figura 5. Diseño de prototipo



Fuente: Autores.

Adicionalmente se ha logrado la construcción de los modelos de datos y la arquitectura software, para un posterior desarrollo del prototipo funcional utilizando tecnologías de desarrollo software.

Figura 6. Arquitectura software



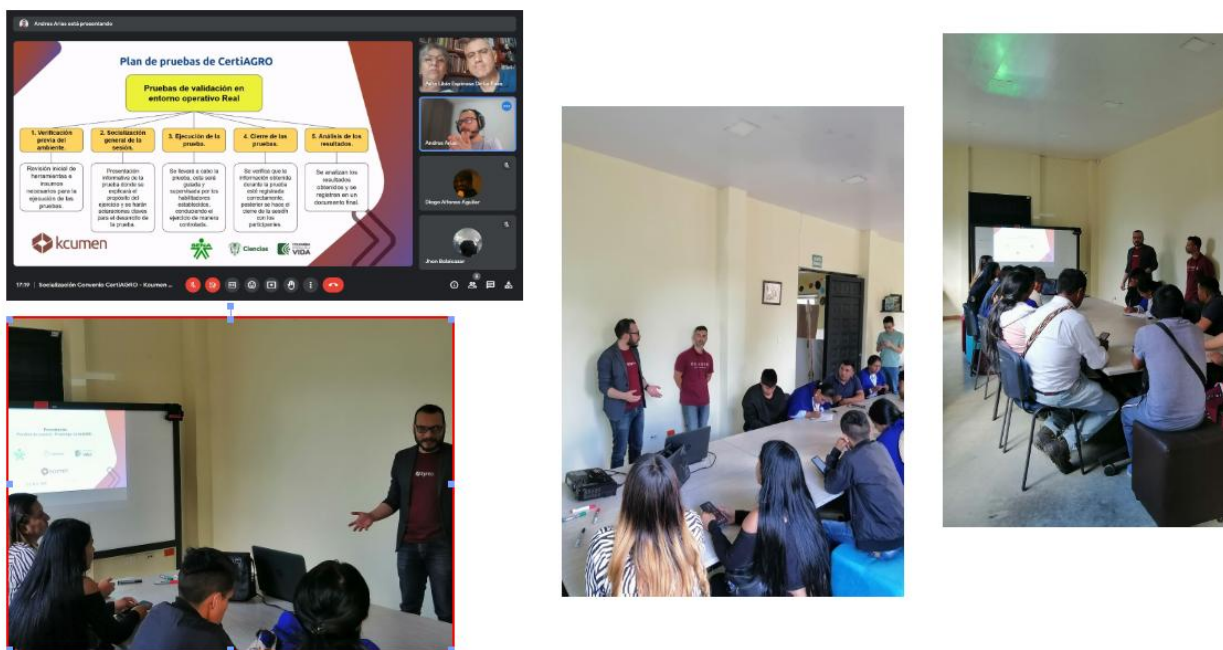
Fuente: Autores.

Durante el tiempo de ejecución, se llevaron a cabo tareas como el análisis detallado de las normas de calidad Rainforest Alliance, Global GAP, Alimentos Ecológicos y BPA. Además, se elaboró una lista de verificación con los criterios esenciales de cada norma, lo que permitirá realizar una prueba inicial para determinar si se cumplen los requisitos necesarios para iniciar un proceso de certificación. (Guevara, 2019)

En el desarrollo del objetivo 2, se generó el despliegue de un plan de pruebas y validaciones de la plataforma sofisticada en diferentes escenarios y entornos reales y de prueba. Por lo tanto, la implementación de una

metodología de prueba heurística se ejecutó un plan de pruebas en un entorno inicialmente cerrado de prueba, con la participación de expertos evaluadores, fue uno de sus resultados más notorios, a partir del prototipo logrado a través de la herramienta FIGMA, se evaluó el desempeño en términos de usabilidad e interfaz de usuario. Se dio inició con el segundo ciclo de pruebas y validaciones, con la participación de productores cafeteros identificados, se ejecutó la primera prueba en instalaciones del Parque Tecnológico de Café - TECNICAFE. Para ello se realizó una socialización previa del plan de pruebas a ejecutarse con el personal a cargo de TECNICAFE, posterior se ejecuta la primera prueba en sus instalaciones.

Figura 7. Fase de iteración a través de pruebas



Fuente: Autores.

Se inició la actividad concerniente a la realización de un estudio de factibilidad económica, financiera y valoración económica. Alcanzando durante el tiempo de ejecución la consolidación del respectivo análisis técnico, mediante el cual se determina la viabilidad empresarial y comercial desde el punto de vista técnico, por otra parte, se logró avances importantes en el análisis de mercado, análisis ambiental y social y el análisis legal y regulatorio. Aquí la información fue recolectada por medio de una encuesta

El objetivo tres, que tiene como propósito la transferencia de conocimiento y divulgación para fortalecer al sector productivo, permitió eventos de presentación de lo logrado en el proyecto. La primera a través de reuniones que se han realizado en diferentes ocasiones con personal directivo, académico y administrativo del SENA, se ha presentado el plan de transferencia propuesto, se socializa las actividades planificadas en el desarrollo del plan y se tuvieron en cuenta opiniones y requerimientos para presentar un cronograma de actividades de acuerdo a las necesidades expresadas.

Figura 8. Encuentros con personal del Sena



Fuente: Autores.

El segundo, en pro de enriquecer el plan de transferencia con los demás actores de SNCTel y el SENA, en el cual la empresa ejecutora Kcumen Digital SAS, encabezada por su representante legal Andrés Arias y el Gerente del proyecto Diego Aguilar, desarrollaron un Bootcamp denominado "Buenas Prácticas de Desarrollo de Productos Software", con una intensidad de 20 horas, para aprendices e instructores pertenecientes al Centro Agropecuario del Sena regional.

Figura 8. Evento Buenas prácticas de desarrollo de productos software



Fuente: Autores.

El último de los procesos en curso es el registro del software de mejora de Certiagro ante la Dirección Nacional de Derechos de Autor.

De manera detallada se puede resumir la ejecución del proyecto a partir de los objetivos y resultados tangibles.

resultados demuestran el avance sistemático desde un prototipo de laboratorio (TRL 4) hasta una plataforma validada en un entorno operativo (TRL 7).

En el marco del Objetivo 1 (Escalamiento Tecnológico), el proceso se inició con ejercicios de innovación abierta y cocreación con personal técnico y productores de café, en colaboración con el aliado estratégico TECNICAFFE. De estas sesiones participativas emanó la información necesaria para construir un esquema detallado de historias de usuario, que sirvió como hoja de ruta para el desarrollo. Este proceso culminó en la definición de un esquema de características priorizadas para la sofisticación tecnológica de CertiAgro, enfocándose en la simplicidad de uso, notificaciones esenciales y una visualización clara del progreso. Con base en estos requisitos, se diseñó el prototipo funcional y se construyó la arquitectura de software y los modelos de datos, utilizando tecnologías como PWA (Progressive Web App) para garantizar la compatibilidad entre dispositivos. Adicionalmente, se realizó un análisis exhaustivo de normativas clave como Rainforest Alliance, Global GAP, Alimentos Ecológicos y las BPA del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), generando listas de verificación que se integraron en la lógica de la plataforma.

Para el Objetivo 2 (Validación y Pruebas), se implementó un plan de pruebas iterativo. Inicialmente, se ejecutó una evaluación heurística en un entorno cerrado con expertos en usabilidad, utilizando un prototipo navegable. Posteriormente, se avanzó a un segundo ciclo de pruebas y validaciones con la participación directa de productores cafeteros en las instalaciones del Parque Tecnológico de Café - TECNICAFFE. Estas pruebas en un entorno real permitieron recopilar retroalimentación directa sobre la interfaz, la funcionalidad y la pertinencia de la herramienta. Paralelamente, se inició un estudio de factibilidad económica y financiera, consolidando el análisis técnico y avanzando en los análisis de mercado, ambiental y regulatorio para sustentar la futura explotación comercial del producto.

Finalmente, en el Objetivo 3 (Transferencia y Divulgación), se llevaron a cabo múltiples actividades para asegurar la apropiación del conocimiento generado. Se realizaron reuniones estratégicas con directivos y personal académico del SENA para presentar y ajustar el plan de transferencia. Como parte de este plan, el equipo ejecutor impartió un Bootcamp de 20 horas sobre "Buenas Prácticas de Desarrollo de Productos Software" a aprendices e instructores del Centro Agropecuario del SENA regional. Estas acciones, junto con la gestión del registro del software ante la Dirección Nacional de Derechos de Autor, consolidaron el compromiso del proyecto con el fortalecimiento del ecosistema de innovación y el capital humano del sector.

4. Conclusiones

El proyecto de escalamiento tecnológico de la plataforma CertiAgro ha cumplido exitosamente sus objetivos, logrando avanzar su nivel de madurez de TRL 4 a TRL 7 y validando su pertinencia y funcionalidad en un entorno operativo real. Los resultados obtenidos, que incluyen un prototipo sofisticado, un esquema de historias de usuario definido mediante cocreación y un plan de transferencia de conocimiento en ejecución, constituyen

una base sólida para la futura inserción comercial y el impacto a gran escala de la plataforma.

La principal conclusión de este trabajo es que el escalamiento exitoso de CertiAgro proporciona un modelo validado y replicable para el desarrollo y despliegue de soluciones AgriTech efectivas en contextos rurales complejos como el colombiano. La contribución fundamental del proyecto reside no solo en el producto tecnológico final, sino en su innovadora metodología centrada en el ser humano. La combinación estratégica de innovación abierta, cocreación con los usuarios finales y la aplicación de la gamificación como herramienta pedagógica ha demostrado ser una respuesta eficaz para superar las barreras históricas de la transferencia y adopción de tecnología en el sector agrícola. Este enfoque asegura la creación de herramientas que no solo son tecnológicamente robustas, sino también socialmente pertinentes, intuitivas y motivadoras para el agricultor.

El análisis de los hallazgos en el contexto del ecosistema AgriTech nacional revela que CertiAgro ocupa un nicho foundational y habilitador. Al facilitar el acceso a la certificación de calidad, la plataforma potencia la capacidad de los productores para participar y beneficiarse de otras innovaciones centradas en la logística, el financiamiento y el acceso a mercados. De este modo, el proyecto no solo fortalece la competitividad de sus usuarios directos, sino que también contribuye a la madurez y sinergia del sector AgriTech en su conjunto, alineándose con las políticas nacionales de desarrollo rural, Agricultura 4.0 y bioeconomía.

Para capitalizar los logros de este proyecto y profundizar en la comprensión de su impacto, se proponen las siguientes líneas de investigación futuras:

1. Evaluación de Impacto Longitudinal: Realizar un estudio longitudinal para cuantificar el impacto a largo plazo del uso de CertiAgro en indicadores clave como las tasas de obtención de certificaciones, el incremento en los ingresos de los productores, el acceso a nuevos mercados y la mejora en la sostenibilidad de las prácticas agrícolas.
2. Estudio Comparativo de Eficacia Pedagógica: Diseñar un ensayo comparativo para evaluar la eficacia de los módulos de aprendizaje gamificados de CertiAgro frente a los métodos tradicionales de extensión agrícola (talleres presenciales, visitas técnicas) en términos de retención de conocimiento y cambio de comportamiento en las prácticas de manejo de cultivos.
3. Análisis de Escalabilidad y Adaptabilidad: Investigar los factores técnicos, económicos, sociales e institucionales que facilitarían o limitarían la escalabilidad del modelo CertiAgro a otros cultivos (además del café y la quinua) y a diferentes regiones de Colombia y América Latina, desarrollando modelos de adaptación contextual.

Estas investigaciones futuras permitirán consolidar el conocimiento generado y guiarán los esfuerzos para maximizar el potencial transformador de la innovación tecnológica en la agricultura sostenible de la región.

Bibliografía

Aguilar, L. J. (2012). La computación en nube (cloud computing): El nuevo paradigma tecnológico para empresas y organizaciones en la sociedad del conocimiento. *Revista Icade. Revista de las Facultades de Derecho y Ciencias Económicas y Empresariales*, (76), 95–111.

Artaraz, M. (2002). Teoría de las tres dimensiones del desarrollo sostenible. *Ecosistemas*, 11(2). <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/614>

Artieda-Rojas, J. A., Mera Andrade, R. M., Muñoz Espinoza, M. M., Iraola, J. I., Barros-Rodríguez, M., Zarabia-Calero, R., Vega Falcón, V., y Romero Fernández, A. (2019). El cuadro de mando integral para el desarrollo de sistemas agropecuarios sustentables. <https://papers.ssrn.com/abstract=3521803>

Austin, J. (1993). El agroempresario del futuro. *Revista del Plan Agropecuario*, 21.

Bureau Veritas. (2022). *Global GAP, certificación en sistemas de gestión de alimentos*. <https://www.bureauveritascertification.com/co/project/global-gap/#alcance>

Cámara de Comercio del Cauca. (2017). *Análisis del ambiente de inversión y de oportunidades de negocio en el departamento del Cauca*. https://www.cccauca.org.co/sites/default/files/archivos/sector_agricola_imprimir_0.pdf

CEPAL. (2016). *Estado de la banda ancha en América Latina y el Caribe 2016*.

DANE. (2014). *Censo nacional agropecuario 2014*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuaria/censo-nacional-agropecuaria-2014>

DANE. (2022). *Boletín exportaciones nacionales abril 2022*. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/exportaciones/boletin_exportaciones_abr22.pdf

Done, G. T. (2013). *Getting things done*. Penguin Books.

Earth Observing System. (2020). *La agricultura sostenible: Un nuevo concepto de cultivo*. <https://eos.com/es/blog/agricultura-sostenible/>

Gambaudo, S. (2014). *Diseño, implementación y certificación de sistema de gestión de inocuidad alimentaria en planta de alimentos balanceados para la nutrición animal* [Tesis de maestría, Universidad Católica de Córdoba].

Gobernación del Cauca. (2021). *En el Cauca avanza el plan de extensión agropecuaria*. <https://www.cauca.gov.co/Prensa/SaladePrensa/Paginas/En-el-Cauca-avanza-el-Plan-de-Extensión->

[Agropecuaria”.aspx](#)

Gómez, M., Mossos-Vivas, N., y Herrera-Ramírez, R. (2021). Desarrollo de una herramienta tecnológica facilitadora de buenas prácticas agrícolas en pequeños agricultores del municipio de Argelia. *Revistas SENA*.

Guevara Burgos, E. A. (2019). *Plataforma tecnológica web y móvil para la gestión de información de los cultivos de Theobroma cacao basada en la Norma Técnica Colombiana 5811* [Trabajo de grado]. <https://repository.universidadean.edu.co/handle/10882/9522>

Instituto Colombiano Agropecuario. (2013). *Colombia avanza en la certificación de buenas prácticas agrícolas*. <https://www.ica.gov.co/noticias/agricola/2013/colombia-avanza-en-la-certificacion-de-buenas-prac.aspx>

Instituto Colombiano Agropecuario. (2021). *La certificación ICA de fincas en buenas prácticas agrícolas tiene nueva norma*. <https://www.ica.gov.co/noticias/ica-moderniza-normatividad-en-bpa-cumplir-requisit>

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. (2017). Revista de investigaciones agropecuarias. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 43(3), 222–225. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1669-23142017000300005

Izaurrealde, M. P. (2013). *Caracterización de especificación de requerimientos en entornos ágiles: Historias de usuario* [Trabajo de especialidad].

Izquierdo, J., Rodríguez Fazzone, M., y Durán, M. (2007). *Manual de buenas prácticas agrícolas para la agricultura familiar*.

Japan Management Association. (2018). *Kanban y just-in-time en Toyota*. Routledge.

Kikitamara, S., y Noviyanti, A. A. (2018). A conceptual model of user experience in scrum practice. En *2018 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)* (pp. 581–586). IEEE.

Lachman, J., Braude, H., Monzón, J., López, S., y Gómez-Roca, S. (2022). El agro 4.0: ¿Cómo puede Argentina transformarse en líder del nuevo paradigma tecnoprodutivo? *Cuyonomics. Investigaciones en Economía Regional*, 6(10). <https://doi.org/10.48162/REV.42.047>

Marczewski, A. (2013). *Gamification: A simple introduction & a bit more*. Amazon Digital Services.

MINCIENCIAS. (2020). *Bioeconomía para una Colombia potencia viva y diversa*. https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/paginas/bioeconomia_para_un_crecimiento_sostenible-qm_print.pdf

MINCIENCIAS. (2021). *Ciencia y tecnología: Fundamento de la bioeconomía*. https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/paginas/bioeconomia_para_un_crecimiento_sostenible-qm_print.pdf

MINCOMERCIO. (2022). *Informe sobre los acuerdos comerciales vigentes en Colombia 2022*. <https://www.tlc.gov.co/acuerdos/vigente>

Mora Pedreros, P. A., Arias Ureña, A. F., y Correa Vargas, R. A. (2018). Caracterización del perfil en habilidades y capacidades TI en un grupo de productores de quinua en el Cauca. *Revista Temas*, 12, 175–186. <https://doi.org/10.15332/RT.V0I12.2041>

Rainforest Alliance. (2020). *Programa de certificación 2020*. <https://www.rainforest-alliance.org/es/certificacion/>

Ries, E. (2014). *El método Lean Startup*. Leader Summaries.

Sanders, E. B. N., y Simons, G. (2009). A social vision for value co-creation in design. *Open Source Business Resource*, 1–11.

Trejos Arroyave, M. (2016). *Planteamiento y evaluación de sistemas productivos agrícolas en áreas inundables del río Cauca* [Tesis doctoral].

Universidad del Valle. (2015). *Impactos ambientales de los monocultivos*. <https://www.univalle.edu.co/medio-ambiente/impactos-ambientales-de-los-monocultivos>

Vélez Robledo, J. (2021). La agricultura orgánica solo tiene el 1 % de hectáreas del total del mercado de alimentos. *Agronegocios*.

Zang, J. H., y Cruz, F. C. (2012). *Innovación abierta: Una revisión de la literatura*. Universidad Politécnica de Madrid.