



PROTOTIPO DE BALANZA AUTOMÁTICA PARA UN DESGRANADOR DE MAÍZ UTILIZANDO TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN

PROTOTYPE OF AN AUTOMATIC SCALE FOR A CORN SHELLER USING INFORMATION TECHNOLOGY

Nathaly Aspiazu-Sevillano , Charles Pérez-Espinoza , Teresa Samaniego-Cobo* 

Universidad Agraria del Ecuador, Guayaquil, 090112, Ecuador

*Autor de Correspondencia: tsamaniego@uagraria.edu.ec

Historial del artículo:

Recibido: 20.11.2025

Revisado: 05.12.2025

Aceptado: 29.12.2025

En línea: 15.01.2026

Palabras clave:

Automatización

Agrícola

Desgranador

Maíz

Tecnología

Keywords:

Automation

Agricultural

Sheller

Corn

Technology

Cómo citar:

N. Aspiazu-Sevillano, C. Pérez-Espinoza y T. Samaniego-Cobo, «Prototipo de balanza automática para un desgranador de maíz utilizando tecnologías de la información», *International Journal of Computational Innovations, Intelligent Systems and AI*, vol. 2, n.º 1, pp. 70–91, ene. 2026. doi: [10.64439/cisai.v2i1.26](https://doi.org/10.64439/cisai.v2i1.26)

Este es un artículo de acceso abierto bajo licencia CC-BY-NC-ND



Resumen:

El estudio describe el diseño y la evaluación de un prototipo de balanza automática integrada a un desgranador de maíz, orientado a mejorar la eficiencia y el control de los procesos postcosecha mediante el uso de tecnologías de la información. La evaluación del prototipo se realizó a través de validación experta, considerando indicadores de eficiencia operativa, integración tecnológica, precisión y confiabilidad, así como viabilidad y escalabilidad. Los resultados evidencian una aceptación general moderada-favorable (58.33%), destacando el indicador de viabilidad y escalabilidad como el mejor valorado (65.33%), lo que refleja un reconocimiento del potencial de implementación de la solución propuesta. No obstante, los expertos identificaron áreas críticas de mejora relacionadas con la precisión metrológica y la integración sistémica, propias de tecnologías en etapas tempranas de desarrollo. En conjunto, los hallazgos sugieren que el prototipo constituye una alternativa tecnológicamente pertinente para la modernización de procesos postcosecha en el sector agrícola. Asimismo, se plantea la incorporación futura de técnicas de inteligencia artificial como una vía para perfeccionar el desempeño del sistema y fortalecer su escalabilidad en entornos de agricultura de precisión.

Abstract:

The study describes the design and evaluation of a prototype automatic scale integrated into a corn sheller, aimed at improving the efficiency and control of post-harvest processes through the use of information technologies. The prototype was evaluated through expert validation, considering indicators of operational efficiency, technological integration, accuracy, and reliability, as well as feasibility and scalability. The results show moderate-favorable overall acceptance (58.33%), with the feasibility and scalability indicator receiving the highest rating (65.33%), reflecting recognition of the implementation potential of the proposed solution. However, the experts identified critical areas for improvement related to metrological accuracy and systemic integration, which are typical of technologies in the early stages of development. Overall, the findings suggest that the prototype is a technologically relevant alternative for the modernization of post-harvest processes in the agricultural sector. Likewise, the future incorporation of artificial intelligence techniques is proposed as a way to improve the system's performance and strengthen its scalability in precision agriculture environments.

I. INTRODUCCIÓN

La producción agrícola constituye uno de los movimientos más relevantes de la economía global, representando no solo una fuente primordial de alimentación, sino también un motor económico esencial para millones de familias en países en desarrollo. Dentro de este contexto, el maíz es uno de los cultivos más significativos a nivel mundial, ocupando posición estratégica en términos de producción global junto con el trigo y el arroz. Erenstein et al. [1] documentan que la producción global de maíz ha experimentado un crecimiento acelerado en las últimas décadas, impulsada por el aumento de la demanda y una combinación de avances tecnológicos, incrementos en el rendimiento y expansión del área cultivada, consolidándose como el principal cereal en términos de volumen de producción y proyectándose como el cultivo más ampliamente cultivado y comercializado en la próxima década. Su relevancia trasciende el ámbito alimentario, extendiéndose hacia sectores industriales, ganaderos y energéticos, lo que lo convierte en un “commodity” estratégico para la seguridad alimentaria y el desarrollo económico sostenible. En el caso particular de Ecuador, esta realidad se manifiesta de manera acentuada, donde el maíz representa un componente crucial del sistema agroalimentario nacional y una fuente de ingresos vital para aproximadamente 100,000 familias de pequeños y medianos productores distribuidos en diversas regiones del país.

A pesar del volumen significativo de producción y del incremento sostenido en la superficie sembrada durante las últimas décadas, el sector maicero ecuatoriano enfrenta desafíos tecnológicos considerables que limitan su eficiencia operativa y competitividad. Las pérdidas postcosecha representan una problemática crítica en la producción de cereales. Kumar y Kalita [2] documentan que entre el 50-60% de los granos de cereales pueden perderse durante la etapa de almacenamiento debido exclusivamente a ineficiencias técnicas en países en desarrollo, mientras que Nath et al. [3] señalan que las pérdidas postcosecha en maíz en África varían entre 10% y 20% del peso total, con algunas regiones experimentando pérdidas de hasta 25-35%. Los procesos de postcosecha, particularmente las operaciones de desgrane y pesaje del maíz continúan ejecutándose mediante metodologías tradicionales que presentan múltiples deficiencias. Para este caso de estudio, el sistema convencional empleado en la provincia de Los Ríos y otras zonas productoras requiere que los trabajadores transporten manualmente los sacos de maíz recién desgranado desde la máquina desgranadora hasta una balanza mecánica ubicada en una superficie plana, proceso durante el cual se generan pérdidas inevitables de grano que cae al suelo durante el traslado. Esta merma no solo representa un desperdicio económico directo para el agricultor, sino que además compromete la precisión en el control de peso total de la producción, variable crítica para los procesos de comercialización y trazabilidad del producto.

La brecha tecnológica observada en los procesos de postcosecha del maíz contrasta notablemente con los avances experimentados en otros sectores agroindustriales, donde la implementación de tecnologías de la Industria 4.0 ha permitido mejorar significativamente la eficiencia operativa y la calidad de los productos. La agricultura de precisión, impulsada por la convergencia de sensores inteligentes y tecnologías avanzadas, ha emergido como una fuerza transformadora en las prácticas agrícolas modernas [4]. Por tanto, las tecnologías de la información y la comunicación, el Internet de las Cosas (IoT) y los sistemas embebidos han cambiado la manera de llevar a cabo los procesos productivos en la agricultura. Por ejemplo, Ayaz et al. [5] ponen de manifiesto que la integración del IoT con las redes de sensores inalámbricos da lugar a sistemas inteligentes de gestión agrícola basada en la toma de decisiones de datos en tiempo real. Recoger datos de big data obtenidos de múltiples orígenes, especialmente de sensores in situ y sensores móviles, es importante en cuanto al hecho de permitir el despliegue de capacidades predictivas para la agricultura de precisión [6]. Por su parte, Ferrández-Pastor et al. [7] relatan la consecución de plataformas de redes de sensores ubicuos (ubiquitous) satisfactorias utilizando IoT en aplicaciones para agricultura de precisión, apuntando que pueden conllevar a la mejora de la calidad, a la eficiencia de la producción, a la disminución del impacto ambiental y a la disminución de los recursos como energía o agua entre otros.

En el campo específico de los sistemas de medición de peso, las celdas de carga que se basan en galgas extensométricas son tecnologías de uso ampliamente extendido en aplicaciones industriales y agrarias. Las celdas de carga surten efecto transformando la fuerza mecánica (peso) en señales eléctricas que pueden ser procesadas y visualizadas como mediciones de peso, ofreciendo buena precisión, fiabilidad y durabilidad [8]. En la literatura científica se recogen muchos esfuerzos que se han llevado a cabo para el desarrollo de sistemas de pesaje digital aplicados a la agricultura mediante tecnologías de celdas de carga acompañadas de microcontroladores de bajo coste. Jayaraman et al. [9] implementan una plataforma IoT para agricultura de precisión que incorpora sensores de peso para el seguimiento en tiempo real de las condiciones ambientales y gestionar inventarios. Narendra et al. [10] presentan una revisión de soluciones IoT para agricultura de precisión, destacando en ella el papel de los sensores de peso en sistemas de riego automatizado, gestión de fertilizantes y seguimiento de silos. En aplicaciones afines, Miller et al. [11] analizan la combinación entre IoT e inteligencia artificial en agricultura mediante el uso de redes de sensores inteligentes, incluyendo sensores de peso para el seguimiento de cultivos. Todo esto presenta evidencias científicas que avalan la viabilidad técnica de incluir sistemas automatizados de medición de procesos agrícolas.

El presente estudio propone un prototipo de balanza automática integrada a un sistema de desgrane de maíz fundamentado en el uso de nuevas tecnologías de la información y de hardware abierto. El sistema propuesto trata de eliminar las ineficiencias que implica el pesaje manual, así como reducir las pérdidas postcosecha por derrame de grano, además de permitir la generación de datos precisos de producción en tiempo real, aspirando con ello a contribuir a la modernización tecnológica del sector maicero ecuatoriano. La importancia de esta investigación radica en su potencial para la mejora de la competitividad de los pequeños y medianos productores mediante la adopción de tecnologías disponibles y escalables, y en la forma en que busca alinearse con los principios de agricultura de precisión y de la transformación digital del sector agropecuario.

1.1 Trabajos relacionados

La incorporación progresiva de nuevas tecnologías de información en sistemas agrícolas se ha incrementado en los últimos años, pero en el ámbito relacionado con el desarrollo de prototipos de balanzas automáticas para desgranadores de maíz, escasos estudios han tratado temas relacionados con el monitoreo del peso, la automatización agrícola, y las aplicaciones del IoT en el procesamiento de granos, por lo que esta subsección se refiere a una revisión de trabajos recientes que fundamentan la propuesta de estudio.

En el ámbito de sistemas de pesaje automatizados con IoT, Alcides et al. [12] desarrollaron un sistema de lisimetría basado en celdas de carga para medición precisa del uso de agua en cultivos. El sistema utiliza cuatro celdas de carga en configuración de balanza de plataforma, amplificadores HX711, microcontrolador ESP32 y transmisión de datos mediante protocolo MQTT a plataforma ThingSpeak. Los autores validaron el sistema alcanzando precisiones del 98.7% en mediciones de evapotranspiración [12]. Aunque este trabajo demuestra la viabilidad de sistemas de pesaje IoT en agricultura, se enfoca exclusivamente en la medición estática de peso de plantas en contenedores, sin abordar el pesaje dinámico durante procesos mecánicos. El presente prototipo se diferencia al implementar un sistema de pesaje automático para un proceso dinámico de desgrane de maíz, donde las vibraciones mecánicas y el movimiento continuo del material representan desafíos adicionales de medición. Por tanto, esta contribución mitiga la brecha entre sistemas de pesaje estático en agricultura y sistemas de pesaje integrados en maquinaria de procesamiento postcosecha en movimiento.

Desde la perspectiva del pesaje automático de animales, He et al. [13] propusieron un algoritmo de pesaje dinámico para vacas lecheras basado en características en el dominio del tiempo y compensación de errores. El sistema utiliza plataformas de pesaje arregladas con celdas de carga y emplea redes neuronales combinadas con transformada "wavelet" empírica para procesamiento de señales dinámicas, logrando errores absolutos medios de 2.1 kg para pesos de 500-700 kg [13]. Si bien

este trabajo aborda exitosamente el pesaje dinámico de objetos en movimiento, se limita al pesaje de animales caminando sobre plataformas sin carga mecánica adicional. En cuanto a la propuesta, el prototipo se diferencia al integrar el sistema de pesaje directamente en un desgranador operativo, donde además del movimiento del producto existe vibración mecánica constante del equipo, ruido de fondo por el proceso de desgrane y variaciones de carga discontinuas. Por lo que consideramos que nuestra contribución mitiga la brecha entre pesaje dinámico de objetos con movimiento controlado (animales) y pesaje durante procesos agroindustriales con múltiples fuentes de interferencia mecánica.

En el contexto de sistemas de pesaje con algoritmos de “machine learning”, Nunes et al. [14] desarrollaron una balanza automática para medición de producción de leche en tiempo real utilizando redes neuronales artificiales. El sistema emplea celdas de carga de alta frecuencia de muestreo (100 Hz) y algoritmos de aprendizaje profundo para filtrar perturbaciones causadas por movimientos del animal durante el ordeño, alcanzando precisiones del 95% en mediciones individuales [14]. Aunque este trabajo demuestra la efectividad de técnicas de “machine learning” para filtrado de señales ruidosas en pesaje, se concentra en aplicaciones de ordeño con flujos líquidos continuos. El presente prototipo se diferencia al trabajar con material granular discontinuo (granos de maíz) donde los patrones de caída y acumulación son aleatorios y la señal de peso presenta características estocásticas distintas a flujos continuos.

Respecto a sistemas de pesaje dinámico de alta precisión, Burnos et al. [15] investigaron sistemas “Weigh-In-Motion” para control automático de peso de vehículos en movimiento. Los autores desarrollaron métodos de calibración automática y compensación de factores ambientales (temperatura, humedad) utilizando sensores piezoeléctricos y celdas de carga capacitivas, logrando precisiones del 5% para pesaje de vehículos a velocidades de 80-100 km/h [15]. Si bien este trabajo aborda el pesaje dinámico de alta velocidad y complejidad, se enfoca en infraestructura vial permanente con objetos de gran masa (vehículos de 3-40 toneladas). El presente prototipo se diferencia al diseñar un sistema de pesaje para masas pequeñas (0-50 kg) integrado en equipo móvil agrícola, donde los requerimientos de portabilidad, bajo costo y calibración in situ son relevantes.

En términos de algoritmos para pesaje dinámico con compensación de perturbaciones, Cardenas-Gallegos et al. [16] desarrollaron un sistema de pesaje automático para ganado utilizando plataformas arregladas y procesamiento de características temporales. El sistema implementa extracción de ventanas de datos válidas mediante análisis de varianza, transformada wavelet para descomposición de señales y redes neuronales para predicción, logrando errores porcentuales absolutos medios inferiores al 2.5%. Aunque este trabajo presenta técnicas avanzadas de procesamiento de señales dinámicas, se aplica a objetos individuales de masa uniforme (animales) con tiempos de medición de 3-5 segundos. En nuestro caso, el prototipo se diferencia al requerir medición continua de flujo de material granular donde no existen objetos individuales discretos sino acumulación progresiva de granos, demandando algoritmos de integración temporal y detección de tasas de cambio en lugar de mediciones discretas.

Los trabajos revisados demuestran que existen tecnologías maduras en sistemas de pesaje automático aplicadas a diversos contextos como, pesaje estático con IoT, pesaje dinámico de animales, pesaje de fluidos durante ordeño, y sistemas de alta velocidad para vehículos. Sin embargo, la revisión de literatura evidencia una brecha crítica donde ninguno de los trabajos analizados implementa un sistema de pesaje automático específicamente diseñado para maquinaria de procesamiento agrícola donde coexisten múltiples desafíos simultáneos como vibración mecánica, flujo discontinuo de material granular, requerimientos de portabilidad, bajo costo y calibración in situ. Por tanto, el prototipo de balanza automática para desgranador mitiga directamente esta brecha al integrar celdas de carga calibradas, algoritmos de filtrado adaptativo, microcontrolador ESP32 con capacidades IoT, y protocolos de compensación de error específicamente diseñados para el entorno vibratorio y dinámico del proceso de desgrane.

II. MÉTODOS

El desarrollo del prototipo de balanza automática para desgranador de maíz se llevó a cabo mediante un enfoque de investigación mixto, combinando métodos documentales y aplicados dentro de un diseño no experimental. La metodología empleada se organizó en tres etapas:

- Recolección de datos y análisis de requisitos.
- Diseño y selección de componentes del sistema.
- Construcción e integración del prototipo.
- Instrumento y métricas de evaluación.

Por tanto, esta sección detalla los procedimientos, herramientas y técnicas utilizadas en cada fase del desarrollo, así como la argumentación de las decisiones técnicas adoptadas para lograr un sistema de pesaje automatizado funcional y eficiente.

2.1 Recolección de datos y análisis de requisitos

En esta subsección se describe el procedimiento empleado para la recolección de datos y el análisis de requisitos del sistema, el cual constituyó la base para el diseño del prototipo de balanza automática integrada al proceso de desgrane de maíz. Por tanto, el proceso en el cual se dio lugar el trabajo de investigación lo realizamos en una finca agropecuaria, productora de maíz, que se encontraba situada en la provincia de Los Ríos, Ecuador, considerando que esta es una de las principales zonas agrícolas del país, por su importante volumen de producción y en donde predominan los métodos asociados a una agricultura tradicional en sus etapas postcosecha. La recolección de información se hizo a través de una guía de observación y una guía de entrevista con la intención de dotar de manera comprensiva del flujo operativo real, y, por consiguiente, se podían ubicar los cuellos de botella que evidenciaban la necesidad de insertar tecnologías de la información para optimizar los procedimientos existentes. La observación se llevó a cabo durante el proceso tradicional de desgrane y pesado manual del maíz, lo que permitió documentar las actividades que llevaban a cabo los jornaleros, los tiempos de operación, las condiciones físicas en las que se encuentra el ambiente de trabajo y las pérdidas de grano con el uso del método de trabajo tradicional.

En particular, la guía de observación se orientó a registrar aspectos relacionados con la manipulación manual de los sacos, la separación física entre la máquina desgranadora y la balanza convencional, la necesidad de superficies planas para lograr mediciones aceptables y la merma de grano que se produce durante el traslado de los sacos llenos. Estas situaciones se evidencian en el proceso ilustrado en la Figura 1, donde se observa que el pesaje se realiza de forma independiente al desgrane, obligando a los trabajadores a interrumpir el flujo continuo de producción y generando pérdidas inevitables de maíz que caen al suelo durante el cambio de sacos



Figura 1. Proceso de desgrane y pesado manual de maíz

Por su parte, la guía de entrevista estuvo dirigida a la administradora de la finca y a los operarios responsables del proceso, con la finalidad de identificar los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema propuesto. A través de esta técnica se recogió información relacionada con la necesidad de controlar el peso exacto por quintal (50 kg), reducir el esfuerzo físico de los trabajadores, minimizar la pérdida de grano, disponer de alertas oportunas durante el llenado de sacos y contar con un mecanismo de registro y monitoreo diario de la producción. Asimismo, se identificó el interés por integrar una solución tecnológica que permita visualizar los datos de pesaje en tiempo real y almacenarlos para su posterior análisis. Como se resume en la Tabla 1, los requisitos definidos responden directamente a las limitaciones operativas observadas en campo, tales como la falta de integración entre el pesaje y el desgrane, la pérdida de grano durante el cambio de sacos y la ausencia de mecanismos de monitoreo y registro de la producción. Por tanto, lo que busca este enfoque es asegurar que el diseño del prototipo de balanza automática estuviera alineado con las condiciones reales del entorno agrícola, garantizando su pertinencia técnica, operativa y económica.

Tabla 1. Análisis de requisitos

Código	Requisito	Descripción	Origen del requisito	Justificación
RQ-01	Funcional	El sistema debe medir automáticamente el peso del maíz durante el proceso de desgrane.	Observación directa del proceso manual	El pesaje manual se realiza de forma independiente al desgrane, generando interrupciones y pérdida de grano.
RQ-02	Funcional	El sistema debe detener o regular el flujo de maíz cuando se alcance el peso objetivo por saco (50 kg).	Entrevista a la administradora de la finca	Garantiza uniformidad en los quintales y evita sobrellenado o subllenado de los sacos.
RQ-03	Funcional	El sistema debe generar una alerta visual y sonora al alcanzar el peso establecido.	Observación y entrevista	Permite al operario actuar oportunamente sin supervisión constante del pesaje.
RQ-04	Funcional	El sistema debe permitir el vaciado automático del maíz hacia el saco correspondiente.	Observación del proceso de cambio manual de sacos	Reduce la pérdida de grano que ocurre durante el traslado y reemplazo manual de sacos.
RQ-05	Funcional	El sistema debe mostrar el peso en tiempo real mediante una interfaz visual accesible.	Observación del entorno de trabajo	Facilita el control del proceso por parte de los trabajadores en condiciones rurales.
RQ-06	Funcional	El sistema debe registrar el número de sacos y el peso total diario de la producción.	Entrevista con la administradora	Permite llevar un control productivo y facilita la toma de decisiones comerciales.
RQ-07	Funcional	El sistema debe integrarse con una aplicación móvil para la visualización del historial de pesaje.	Entrevista y análisis de necesidades	Mejora la trazabilidad de la producción y el monitoreo remoto del proceso.
RQ-08	No funcional	El sistema debe operar de forma estable en entornos rurales con superficies irregulares.	Observación del entorno físico	Las balanzas tradicionales requieren superficies planas, lo cual no es viable en campo.
RQ-09	No funcional	El sistema debe ser de fácil uso para operarios con bajo nivel de capacitación tecnológica.	Entrevista a los trabajadores	Asegura la adopción del sistema sin necesidad de capacitación compleja.
RQ-10	No funcional	El sistema debe utilizar componentes de bajo costo y fácil mantenimiento.	Análisis del contexto productivo	Favorece la sostenibilidad económica del prototipo para pequeños y medianos productores.
RQ-11	No funcional	El sistema debe garantizar precisión y confiabilidad en las mediciones de peso.	Observación y revisión documental	La exactitud del pesaje es crítica para la comercialización del maíz.
RQ-12	No funcional	El sistema debe permitir escalabilidad y futuras ampliaciones funcionales.	Análisis técnico del proyecto	Facilita la incorporación de nuevas funcionalidades sin rediseñar el sistema completo.

2.2 Diseño y componentes del sistema

El diseño del sistema se fundamentó en los requisitos funcionales y no funcionales identificados durante el análisis del proceso de desgrane y pesado manual. A partir de estos requerimientos, se definió una arquitectura distribuida que integra componentes de hardware, conectividad a Internet y una aplicación móvil para el monitoreo y gestión de la información de pesaje. Esta arquitectura general se ilustra en la Figura 2, donde se evidencia la interacción entre los módulos físicos del prototipo, la infraestructura de red y los usuarios finales mediante una base de datos centralizada.

Como se observa en la Figura 2. Arquitectura del prototipo de balanza digital, el sistema está compuesto por dos microcontroladores NodeMCU ESP8266 que operan de manera coordinada. El primer microcontrolador se encarga de la adquisición de datos provenientes del sensor de peso, mientras que el segundo gestiona los actuadores y dispositivos de salida, tales como el servomotor, la pantalla LCD y el buzzer. Ambos módulos se comunican a través de Internet con una base de datos remota, permitiendo el almacenamiento y la posterior visualización de la información mediante una aplicación móvil accesible para los usuarios autorizados.

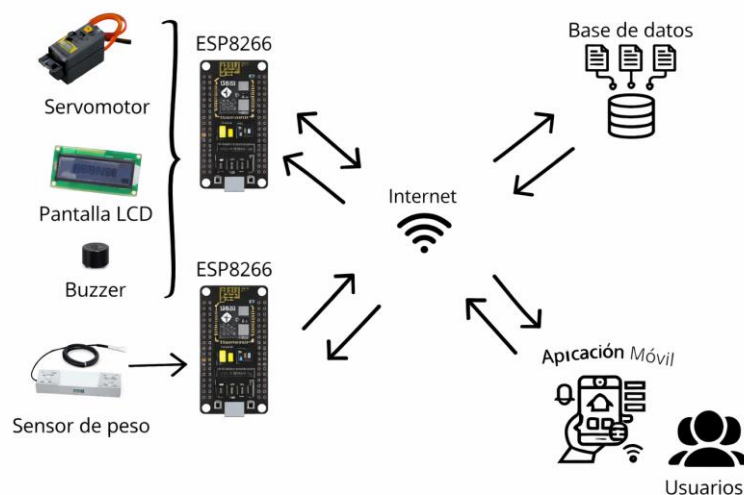


Figura 2. Arquitectura del prototipo de balanza digital

Este enfoque modular favorece la escalabilidad del sistema y permite separar las tareas críticas de medición y control, reduciendo la carga de procesamiento en un solo dispositivo y mejorando la estabilidad operativa del prototipo. Además, la integración con tecnologías de la información facilita la trazabilidad de la producción, uno de los requisitos identificados en la etapa de recolección de datos. Con base en la arquitectura definida, se seleccionaron los componentes electrónicos considerando criterios de precisión, costo, disponibilidad y facilidad de integración. En la Tabla 2 se presentan las especificaciones técnicas del microcontrolador principal utilizado en el prototipo.

Tabla 2. Especificaciones del microcontrolador NodeMCU ESP8266

Característica	Descripción
Microcontrolador	ESP8266
Voltaje de operación	3.3 V
Conectividad	WiFi integrado (IEEE 802.11 b/g/n)
Memoria Flash	4 MB
GPIO	Pines multifuncionales (entrada/salida digital)
Lenguaje de programación	C/C++ (Arduino IDE)
Función en el sistema	Control de sensores, actuadores y comunicación con la aplicación móvil

El sistema de medición de peso se basa en una celda de carga de 55 kg acoplada a un módulo amplificador HX711, encargado de convertir las señales analógicas generadas por la deformación mecánica en datos digitales procesables por el microcontrolador. Las especificaciones de este subsistema se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3. Especificaciones del sistema de medición de peso

Componente	Especificación	Función
Celda de carga	Capacidad máxima: 55 kg	Medición del peso del maíz
Módulo HX711	ADC de 24 bits	Amplificación y digitalización de la señal
Precisión	Alta resolución	Garantiza mediciones confiables
Interfaz	Comunicación digital	Enlace con el ESP8266

En cuanto a los dispositivos de salida y control, el prototipo incorpora un servomotor para el accionamiento de la compuerta de vaciado, un buzzer para alertas sonoras y una pantalla LCD para la visualización del peso en tiempo real. Estos componentes permiten automatizar el proceso y reducir la intervención manual del operario. Sus principales características se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Especificaciones de actuadores y dispositivos de salida

Componente	Característica	Función en el sistema
Servomotor	Capacidad de carga: 5 kg	Apertura y cierre de la compuerta de vaciado
Buzzer	Voltaje: 12 V	Alerta sonora al alcanzar el peso objetivo
Pantalla LCD	LCD 16x2	Visualización del peso en tiempo real
Fuente de alimentación	Batería 9 V	Suministro energético del sistema

La interconexión física de los componentes electrónicos se diseñó para garantizar estabilidad eléctrica y correcta transmisión de datos entre sensores, actuadores y microcontroladores. El detalle de estas conexiones se presenta en la Figura 3. Esquema de conexiones del prototipo, donde se observa la disposición del sensor de peso con el módulo HX711, la conexión del ESP8266 con la pantalla LCD, el buzzer y el servomotor, así como la alimentación del sistema mediante una fuente externa. Este esquema permitió validar previamente la compatibilidad entre los componentes y facilitó el proceso de ensamblaje del prototipo, reduciendo errores durante la implementación.

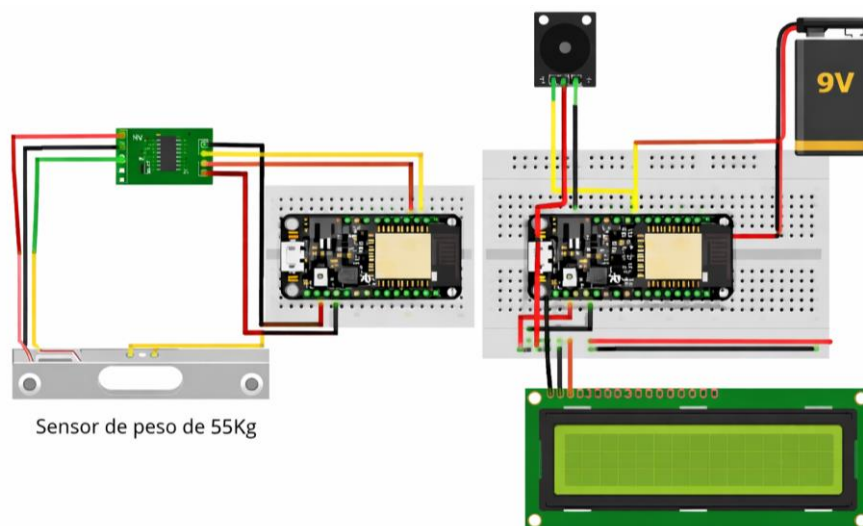


Figura 3. Esquema de conexiones del prototipo

2.3 Construcción e integración del prototipo

La construcción del prototipo de balanza automatizada se desarrolló a partir del diseño conceptual y la arquitectura del sistema previamente definidos, considerando tanto los requisitos funcionales como las condiciones reales del entorno agrícola. Esta etapa tuvo como objetivo materializar el diseño del sistema en una estructura física operativa, integrando los componentes mecánicos, electrónicos y de comunicación de manera coherente y funcional. En una primera fase se elaboró el modelo tridimensional del prototipo, el cual permitió validar la disposición espacial de los componentes, las dimensiones estructurales y la interacción entre los distintos módulos antes de su fabricación física. Este diseño preliminar se presenta en la Figura 4, donde se aprecia la ubicación del sistema de alimentación de maíz, la plataforma de pesaje, el módulo de control y el mecanismo de vaciado.

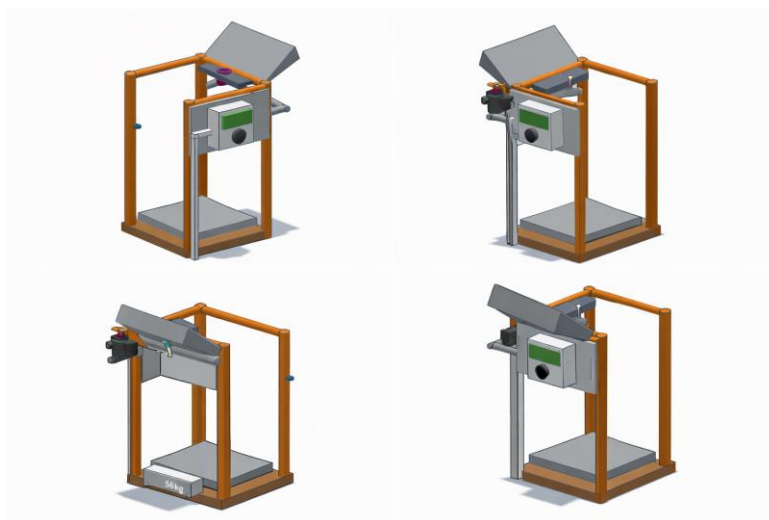


Figura 4. Prototipo de balanza automatizada en 3D

Posteriormente, se procedió a la construcción física del prototipo, empleando materiales metálicos para la estructura portante, seleccionados por su resistencia mecánica y durabilidad en entornos productivos, así como se expone en la Figura 5. La plataforma de pesaje fue diseñada para soportar cargas de hasta 55 kg, asegurando estabilidad durante el llenado de los sacos. En esta etapa se integraron los componentes electrónicos previamente seleccionados, incluyendo el microcontrolador ESP8266, el sensor de peso con su módulo HX711, la pantalla LCD, el buzzer y el servomotor encargado del accionamiento de la compuerta de vaciado.



Figura 5. Prototipo de balanza industrial

La integración final del sistema dio lugar a un prototipo de carácter industrial, orientado a su uso en condiciones reales de trabajo, como se observa en la Figura 6. En esta versión, los componentes electrónicos fueron alojados en un gabinete protector, reduciendo la exposición al polvo, vibraciones y humedad, factores comunes en el entorno agrícola. Asimismo, se mejoró la disposición del cableado y las conexiones internas para mejorar la seguridad eléctrica y facilitar futuras tareas de mantenimiento.



Figura 6. Prototipo de balanza industrial en un escenario real

Desde el punto de vista funcional, la integración del hardware con el software permitió que el sistema opere de manera sincronizada. El sensor de peso transmite los datos al microcontrolador, el cual procesa la información y ejecuta las acciones correspondientes, tales como la activación del servomotor al alcanzar el peso establecido, la emisión de alertas sonoras mediante el buzzer y la visualización del peso en tiempo real en la pantalla LCD. De forma paralela, los datos generados son enviados a la base de datos y puestos a disposición de los usuarios a través de la aplicación móvil, consolidando un flujo de información continuo entre el entorno físico y digital.

2.4 Instrumento y métricas de evaluación

Con el objetivo de evaluar el desempeño del prototipo de balanza automática integrada al proceso de desgrane de maíz, se diseñó un instrumento de evaluación de tipo dicotómico (Sí/No), orientado a recoger el juicio experto desde una perspectiva técnica, operativa y tecnológica. El instrumento fue administrado a 25 especialistas pertenecientes al ámbito agroindustrial y de sistemas de información, escogidos por su conocimiento y experiencia en procesos de producción, automatización, y en el uso de sistemas tecnológicos en situaciones de la vida real. La forma del cuestionario fue estructurada haciendo uso de cuatro indicadores que fueron definidos de acuerdo a las exigencias de los requisitos del sistema y el propio enfoque metodológico del estudio, es decir, un hilo de evaluación que comenzaba en la forma de la precisión métrica del prototipo que se incorporó en la tecnología, en forma de su impacto, y que acabó en la viabilidad y escalabilidad de la misma en condiciones productivas reales. Los indicadores de evaluación estaban constituidos por tres elementos, de manera que se contaba con un total de 12 preguntas, lo que permitió contar con una evaluación de la forma del prototipo equilibrada y sistemática.

En la Tabla 5 se presenta la relación de indicadores, códigos de ítems y formulación de las preguntas utilizadas en el instrumento, las cuales fueron diseñadas para ser claras, específicas y comprensibles para los evaluadores, evitando ambigüedades y facilitando respuestas consistentes.

Tabla 5. Instrumento dicotómico para la evaluación del prototipo de balanza automática

Indicador	Código	Ítem
Precisión y confiabilidad	P1	¿El prototipo presenta mediciones consistentes en distintos ciclos de pesaje?
	P2	¿La balanza automática reduce el error humano durante el proceso de desgranado?
	P3	¿La integración de sensores garantiza estabilidad en la medición del peso?
Integración tecnológica	P4	¿El uso de tecnologías de la información mejora la trazabilidad del proceso?
	P5	¿El sistema permite una adecuada comunicación entre hardware y software?
	P6	¿La automatización propuesta es coherente con entornos agroindustriales reales?
Eficiencia operativa	P7	¿El prototipo optimiza el tiempo del proceso de desgranado de maíz?
	P8	¿La balanza automática contribuye a reducir costos operativos?
	P9	¿El sistema mejora la productividad frente a métodos tradicionales?
Viabilidad y escalabilidad	P10	¿El prototipo es técnicamente viable para su implementación a mayor escala?
	P11	¿El sistema puede adaptarse a distintos volúmenes de producción?
	P12	¿La solución propuesta es sostenible en el contexto agrícola actual?

Dado el carácter dicotómico del instrumento, la métrica principal utilizada para el análisis fue la frecuencia y proporción de respuestas afirmativas (Sí) por ítem e indicador, permitiendo identificar el nivel de aceptación del prototipo desde la perspectiva experta. Esta aproximación facilitó la agregación de resultados por dimensión de evaluación y la comparación entre indicadores, manteniendo una interpretación clara y directa de los datos. Asimismo, para verificar la consistencia interna del instrumento, se estimó el alfa de Cronbach sobre los 12 ítems dicotómicos. El valor obtenido fue $\alpha = 0.759$, superando el umbral recomendado de 0.70 para estudios aplicados, lo que evidencia una adecuada coherencia interna entre los ítems y confirma la fiabilidad del instrumento para evaluar el prototipo de balanza automática.

III. RESULTADOS

La presente sección expone los resultados derivados de la evaluación del prototipo de balanza automática integrada a un desgranador de maíz, a partir del instrumento dicotómico aplicado a 25 especialistas del ámbito agroindustrial y de tecnologías de la información. Los resultados se presentan de forma agregada por indicador con la finalidad de conocer el impacto del prototipo y los puntos de mejora futura.

3.1 Análisis descriptivo por indicador

Los resultados agregados por indicador se presentan en la Tabla 6. Cada indicador fue evaluado mediante tres ítems dicotómicos, resultando en un total de 75 respuestas por indicador (25 expertos \times 3 ítems). El porcentaje de aceptación (respuestas 'Sí') revela una tendencia creciente desde los indicadores técnico-metrológicos hacia aquellos relacionados con la viabilidad de implementación.

Tabla 6. Distribución de respuestas y porcentaje de aceptación por indicador

Indicador	Sí (n)	No (n)	Aceptación Sí (%)
Precisión y Confiabilidad	39	36	52.0
Integración Tecnológica	42	33	56.0
Eficiencia Operativa	45	30	60.0
Viabilidad y Escalabilidad	49	26	65.33

Nota. n = número de respuestas por categoría; N = 75 respuestas por indicador (25 expertos \times 3 ítems).

Como se observa en la Tabla 6 y se visualiza en la Figura 7, el indicador de Viabilidad y Escalabilidad obtuvo el mayor nivel de aceptación (65.33%), seguido por Eficiencia Operativa (60.0%), Integración Tecnológica (56.0%) y Precisión y Confiabilidad (52.0%). Esta distribución evidencia que, si bien los expertos reconocen el potencial del prototipo para su implementación a escala y su contribución a la eficiencia del proceso, expresan reservas moderadas respecto a aspectos técnicos relacionados con la precisión metrológica y la integración hardware-software.

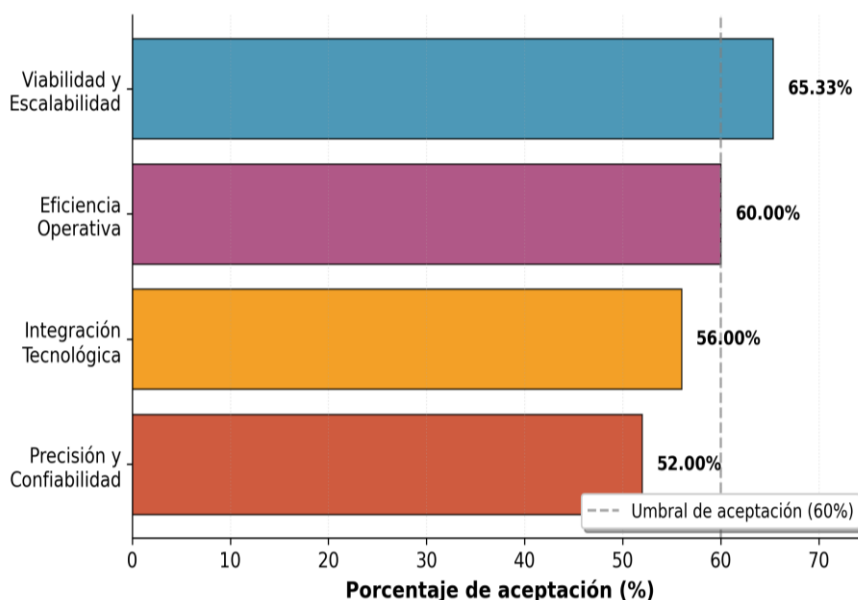


Figura 7. Aceptación de expertos por indicador

Por otro lado, la Figura 7 presenta la distribución porcentual de aceptación por indicador, evidenciando la tendencia creciente desde los aspectos técnicos hacia los de implementación. La línea punteada representa el umbral de aceptación del 60%, valor de referencia establecido en estudios de validación de tecnologías emergentes. Dos de los cuatro indicadores se alinean a este umbral, mientras que los dos restantes se aproximan a él, indicando un balance general positivo, pero con áreas de mejora identificables. Asimismo, la Figura 8 ilustra la distribución absoluta de respuestas afirmativas y negativas para cada indicador. La proporción equilibrada entre ambas categorías en los primeros tres indicadores (con diferencias no superiores a 15 respuestas) evidencia una evaluación crítica por parte de los expertos, lo cual es deseable en procesos de validación técnica para evitar sesgos de aquiescencia. El indicador de Viabilidad y Escalabilidad muestra la mayor diferencia a favor de las respuestas afirmativas (49 vs. 26), exponiendo un consenso más amplio respecto a la factibilidad de implementación del sistema en contextos reales.

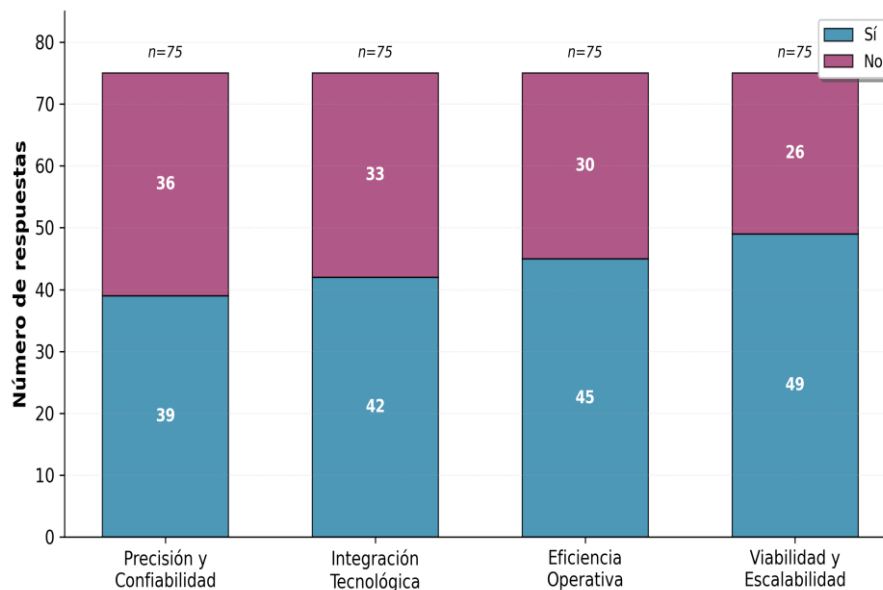


Figura 8. Distribución de respuestas por indicador

3.2 Análisis multidimensional del prototipo

Para complementar el análisis descriptivo, se realizó una visualización radial (Figura 3) que permite apreciar el perfil de aceptación del prototipo en las cuatro dimensiones evaluadas simultáneamente. Este tipo de representación facilita la identificación visual de fortalezas y debilidades del sistema en un formato integrado.

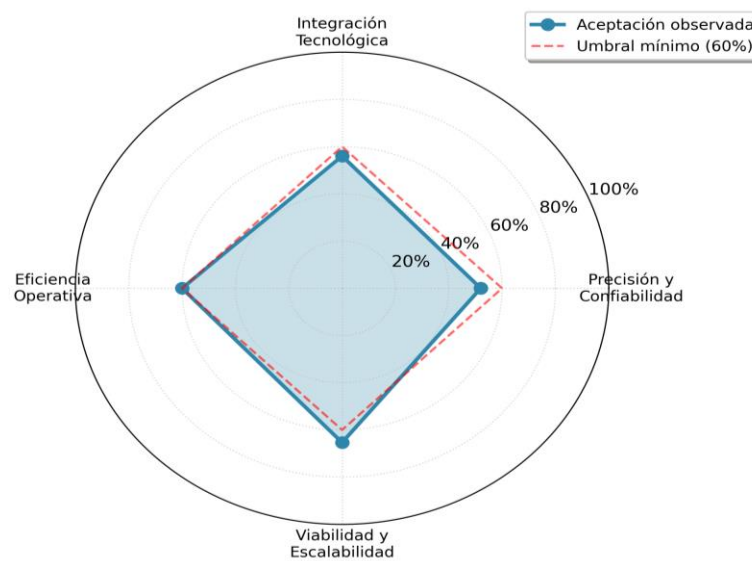


Figura 9. Perfil de aceptación del prototipo

De igual manera la Figura 9 evidencia que el perfil de aceptación del prototipo presenta una forma asimétrica, con mayor proyección hacia los ejes de Viabilidad/Escalabilidad y Eficiencia Operativa, y menor extensión hacia Precisión/Confiabilidad e Integración Tecnológica. El área cubierta por el polígono sugiere un nivel general de aceptación moderado-alto, con dos dimensiones por encima y dos por debajo del umbral del 60%. Esta configuración indica que el prototipo es percibido como viable y eficiente en términos operativos, pero requiere refinamiento en aspectos técnicos fundamentales antes de su despliegue a gran escala.

3.3 Análisis granular por ítem del cuestionario

El análisis a nivel de ítem individual (Figura 4) permite identificar aspectos específicos del prototipo que generaron mayor o menor consenso entre los expertos. Los 12 ítems se agrupan cromáticamente según el indicador al que pertenecen, facilitando la identificación de patrones dentro de cada dimensión evaluada.

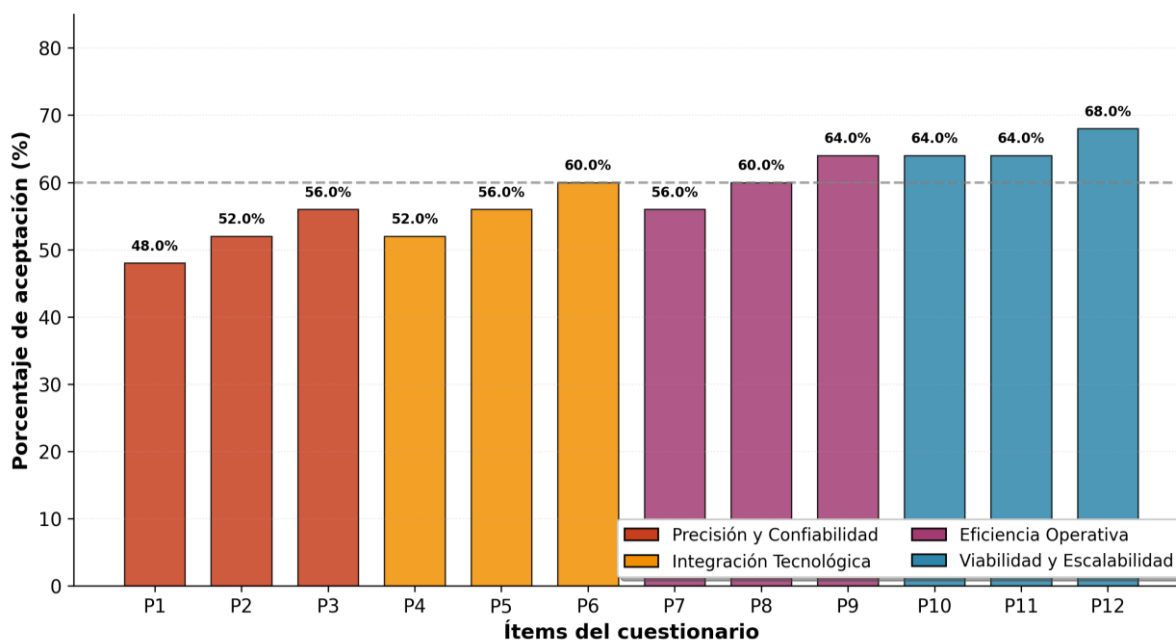


Figura 10. Resultados del cuestionario por pregunta

El análisis por ítem revela una tendencia creciente en la aceptación desde P1 (48.0%) hasta P12 (68.0%), con incrementos progresivos entre grupos de ítems. Dentro del indicador de Precisión y Confiabilidad, el ítem P3 (relativo a la estabilidad de los sensores) obtuvo mayor aceptación (56.0%) comparado con P1 (consistencia de mediciones, 48.0%) y P2 (reducción de error humano, 52.0%), sugiriendo que los expertos confían en la tecnología de sensores empleada pero cuestionan la repetibilidad del sistema completo. En Integración Tecnológica, P6 (coherencia con entornos agroindustriales, 60.0%) superó a P4 (trazabilidad, 52.0%) y P5 (comunicación hardware-software, 56.0%), indicando que el diseño conceptual es apropiado pero requiere optimización en la implementación técnica. Los ítems de Eficiencia Operativa (P7-P9) muestran valores consistentes (56%-64%), mientras que los de Viabilidad y Escalabilidad (P10-P12) alcanzan los niveles más altos (64%-68%), confirmando la percepción favorable sobre el potencial de adopción del sistema.

3.4 Perspectiva de los resultados

El indicador de precisión y confiabilidad da el valor más bajo de aceptación (52.0%) y resulta ser inferior a lo que cabría esperar (60% como umbral deseable). Este indicador pone de manifiesto que los expertos perciben en el instrumento elevadas oportunidades de mejora. En particular, los datos reportan preocupaciones sobre la consistencia de los ciclos de pesaje con sensores repetidos y sobre la funcionalidad de los sistemas para controlar la posibilidad de error humano. Por otro lado, la aceptación de los sensores (P3) significa que su tecnología se puede considerar adecuada, pero que las limitaciones se pueden atribuir a componentes integrados y las calibraciones, y no necesariamente al hardware. Por lo tanto, esta interpretación es consistente con lo que se desprende de la literatura relacionada con sistemas de pesaje automatizados, donde la variabilidad suele encontrarse en la interfaz de componentes más que en el sensor.

Por otro lado, se evidencia un 56.0% de aceptación del indicador integración tecnológica refleja una aceptación media sobre la capacidad del sistema de desgranado para incorporar de manera efectiva y eficiente tecnologías de la información. Los expertos, por un lado, ven coherente el diseño con entornos agroindustriales reales (P6, 60.0%), aspecto que da validez al diseño propuesto, pero expresan reservas sobre la trazabilidad del proceso (P4, 52.0%) y la comunicación entre hardware y software (P5, 56.0%). Estos resultados son la respuesta a una arquitectura conceptual apropiada y una ejecución práctica que requiere, en cierta medida, la mejora de protocolos de comunicación, interfaces de usuario y sistemas de registro de datos. Esta distancia entre el reconocimiento del diseño y las dudas sobre la ejecución técnica del mismo es lógica en prototipos en fase de validación inicial, donde el nivel de madurez tecnológica se ve superado por la demostración de concepto.

De igual manera, el indicador eficiencia operativa presenta los niveles de aceptación fijados (60.0%), siendo visto por los expertos como una característica positiva del prototipo. Los ítems relacionados con "optimización del tiempo de proceso" (P7), "reducción de costes operativos" (P8) o "mejora de la productividad" (P9) se desarrollaron todos en una propuesta de valor alta, tal y como lo perciben estos expertos, lo cual puede ser complementado analizando que el sistema es un método muy efectivo para aumentar la eficiencia de las operaciones de desgranado de maíz. Por tanto, la percepción está basada en los beneficios de la automatización, es decir, de la reducción de tiempos muertos, de la eliminación del trabajo manual y de la homogeneidad en las operaciones, los cuales están muy documentados en la automatización de operaciones agroindustriales. La aceptación en eficiencia operativa es importante, ya que es un criterio muy determinante para utilizar cualquier tipo de tecnología en el ámbito agrícola, donde los márgenes de ganancia son muy estrechos y donde la productividad rápida es imprescindible para mantener la economía.

Por último, el indicador correspondiente a la viabilidad y escalabilidad se obtiene una gran aceptación (65.33%), lo que indica una percepción favorable respecto a la viabilidad y la posibilidad de implementación a mayor escala, mezclando distintos contextos de producción. Los expertos consideran que la solución propuesta es factible técnica (P10), modificable respecto a distintos volúmenes de producción (P11) y que se sostiene en el contexto agrícola actual (P12). Este resultado positivo cobra una especial relevancia, ya que contrasta los aspectos positivos de la evaluación con las reservas técnicas mostradas en los indicadores previos, así como las evidencias proporcionadas de que los evaluadores del prototipo reconocen la conveniencia de la tecnología para ser mejorada y puesta en práctica en entornos reales. La combinación de la viabilidad técnica percibida y la escalabilidad potencial indica que el prototipo se encuentra en una situación favorable y propicia el camino hacia el avance a fases de desarrollo más maduras, siempre y cuando se tomen las limitaciones apuntadas en aspectos de precisión e integración. Lo anteriormente dicho ofrece coherencia con modelos de adopción tecnológica que ponen de manifiesto la percepción de utilidad, así como la facilidad de uso, como elementos determinantes de la intención de adopción.

IV. DISCUSIÓN

El presente estudio evaluó un prototipo de balanza automática integrada a un desgranador de maíz mediante validación experta, obteniendo hallazgos que se sitúan en el contexto de desarrollos recientes en automatización agrícola y tecnologías de pesaje de precisión. Esta sección contrasta los resultados obtenidos con la literatura científica de los últimos cinco años, articulando conexiones con investigaciones sobre integración de sensores IoT, sistemas de pesaje automatizado, adopción tecnológica en agricultura y desafíos de implementación en contextos agroindustriales.

4.1 Integración de sensores inteligentes y arquitecturas IoT en agricultura de precisión

Los resultados del indicador de integración tecnológica (56.0% de aceptación) coinciden con los retos detectados en la literatura actual sobre la implantación de sistemas IoT en la agricultura. Mansoor et al. [17] argumentan que la integración pertinente de los sensores inteligentes no depende solamente del hardware correcto, sino también de arquitecturas de comunicaciones correctas, bien como plataformas de análisis de datos que materialicen la toma de decisiones en tiempo real. En su revisión sistemática acerca de los sensores IoT en la agricultura de precisión, estos autores constatan que las barreras críticas a la adopción exitosa son la interoperabilidad entre componentes, la latencia en la transmisión de datos y la calibración. El prototipo que se evalúa en la presente investigación enfrentaba precisamente estas barreras, como evidencian las puntuaciones moderadas correspondientes al ítem P5 (comunicación hardware-software, 56.0%), exponen que, si bien la arquitectura conceptual es correcta, la implementación concreta requiere perfeccionarse.

Miller et al. [11] realizaron una revisión sistemática siguiendo metodología PRISMA sobre la integración de IoT e inteligencia artificial en agricultura, analizando 3,404 publicaciones del período 2020-2024. Sus hallazgos revelan que los sistemas de monitoreo basados en sensores demuestran precisiones de 90-99% en aplicaciones específicas como detección de enfermedades de cultivos mediante redes neuronales convolucionales, pero que la integración sistémica completa presenta desafíos significativos relacionados con fragmentación de datos, brechas de conectividad en áreas rurales y costos elevados de adopción. El presente estudio corrobora estos hallazgos al mostrar que, aunque los expertos reconocen la coherencia del diseño con entornos agroindustriales reales (P6, 60.0%), expresan reservas sobre la trazabilidad del proceso (P4, 52.0%), lo cual sugiere que el prototipo necesita optimización en sus capacidades de registro y transmisión de datos para maximizar su valor en contextos de agricultura de precisión.

De igual manera, Aarif et al. [18] documenta que los sistemas de precisión habilitados por IoT pueden lograr ahorros mediante monitoreo continuo. Este tipo de optimización basada en datos representa el potencial que el prototipo de balanza automática podría alcanzar en el contexto de procesamiento postcosecha de maíz. La capacidad de generar datos precisos y trazables sobre volúmenes procesados no solo mejoraría la eficiencia operativa, sino que también permitiría análisis predictivos para optimización de recursos, similar a lo reportado en sistemas IoT agrícolas avanzados. La valoración moderada obtenida en el indicador de integración tecnológica (56.0%) evidencia que el prototipo se encuentra en una fase intermedia de desarrollo donde la infraestructura básica existe, pero requiere maduración para aprovechar plenamente las capacidades de análisis de datos que caracterizan a las soluciones IoT contemporáneas.

4.2 Precisión metrológica en sistemas de pesaje automatizado agrícola

La baja calificación en el indicador de precisión y confiabilidad (52.0%) evidencia una debilidad significativa en el diseño evaluado, particularmente en contextos de pesaje dinámico, donde las condiciones de operación presentan alta variabilidad. Diversas investigaciones recientes señalan que incluso los sistemas modernos basados en sensores avanzados enfrentan dificultades para garantizar repetibilidad en entornos agrícolas reales. Por ejemplo, Burdilna et al. [19] desarrollaron un sistema automatizado basado en lógica difusa para lanzadores de granos y concluyeron que la precisión sigue comprometida en condiciones de operación dinámica, lo cual es atribuible a vibraciones mecánicas, flujos irregulares de material y variaciones ambientales. Este fenómeno se refleja en la baja valoración del ítem P1 (consistencia de mediciones), lo cual pone de relieve que el sistema, aunque funcional, requiere optimizaciones fundamentales en su integración sensorica y estructural.

En contraste, el resultado más favorable en el ítem P3 (estabilidad de sensores, 56.0%) sugiere que el hardware subyacente tiene un desempeño razonablemente estable, pero carece de mecanismos que garanticen repetibilidad en escenarios de campo. He et al. [20] estudiaron un sistema de monitoreo de rendimiento en cosechadoras, subrayando la importancia de implementar algoritmos de corrección en tiempo real y estrategias de calibración automatizada para mejorar la precisión en procesos de pesaje agrícola. Adicionalmente, Rodrigues et al. [21] encontraron que factores como la humedad, el tamaño de los granos y el entorno operativo influyen considerablemente en la precisión de sistemas dinámicos. Esto refuerza la necesidad de emplear procesamiento de señales más robusto, como filtros digitales adaptativos, para compensar perturbaciones propias del proceso de desgranado de maíz.

Desde una perspectiva de ingeniería aplicada, el desarrollo de sistemas de pesaje confiables no puede basarse únicamente en los sensores. Debe existir, una arquitectura total donde se implementen procesamiento inteligente, mecánica optimizada, así como el control metrológico continuo. En esta línea, se sitúa la propuesta de Latif et al. [22], una arquitectura IoT para el monitoreo en tiempo real de peso, temperatura y consumo en el secado y proceso de granos, con mejoras en la trazabilidad y exactitud del sistema. Por lo tanto, las siguientes iteraciones del prototipo deberían implementar técnicas como promedios móviles, promedios móviles ponderados, algoritmos de autoajuste y machine learning ligero adaptativos a las condiciones del entorno, logrando así el umbral del 99% de endurecimiento requerido para aplicaciones comerciales.

4.3 Impacto en eficiencia operativa y reducción de pérdidas postcosecha

En cuanto a la eficiencia operativa, el indicador alcanzó el umbral mínimo del 60.0% establecido como umbral de aceptación, por lo que también representa una oportunidad de mejora dentro del prototipo desarrollado. Este resultado coincide con estudios recientes en automatización sobre el procesamiento postcosecha. Sarker et al. [23] realizaron un análisis bibliométrico de 3,404 publicaciones sobre la automatización de la agricultura apoyada en IA e IoT, hallando que los sistemas automatizados pueden reducir la mano de obra hasta en un 25% y la calidad del producto permanecía constante o mejoraba. De hecho, la revisión de estos autores afirma que las máquinas autónomas destinadas a la agricultura, que incorporar sensores en tiempo real y sistemas de control provenientes de IA, consiguen óptimas operaciones desde la preparación del campo hasta la cosecha y el procesamiento de alimentos, reduciendo el tiempo ocioso y estandarizando procesos.

Chen [24] señala que las tecnologías agrícolas actuales son importantes para hacer frente a los retos relacionados con la seguridad alimentaria y la sostenibilidad medioambiental, en un contexto de aumento demográfico y cambio climático. En su revisión del papel de las tecnologías modernas para incrementar la productividad agrícola, el autor indica que la automatización, no solo incrementa la eficiencia, sino que también permite el uso más racional de los recursos de la agricultura a través del seguimiento y el control del proceso productivo en términos de tiempo y cantidad de recursos. En el caso del prototipo que se ha evaluado, la automatización del pesaje elimina los errores asociados al sistema de registro manual, mejora los tiempos de registro de datos y permite la generación de los reportes de producción de manera automática. Lo anterior es una serie de ventajas en términos de operaciones que han podido ser confirmadas por los expertos que participaron en el proceso, que ha posicionado al prototipo como una solución con un alto potencial para aumentar la competitividad de las operaciones de procesamiento del maíz, sobre todo en contextos en donde la eficiencia y la trazabilidad son características que hacen diferenciar el producto en el mercado.

4.4 Factores determinantes de adopción tecnológica en agricultura

El indicador de viabilidad y escalabilidad obtuvo la mayor aceptación del estudio (65.33%), reflejando una percepción favorable sobre el potencial de implementación del prototipo. Este resultado se alinea con teorías consolidadas de adopción tecnológica en agricultura. Los autores aplicaron el modelo de aceptación de tecnología extendido para analizar la intención conductual de agricultores hacia la Agricultura 5.0 en Nepal, encontrando que la utilidad percibida y la facilidad de uso percibida son determinantes críticos de la intención de adopción. El modelo de aceptación de tecnología, validado extensamente en contextos agrícolas durante las últimas dos décadas, postula que la percepción de que una tecnología es útil (mejorará el desempeño) y fácil de usar (requiere mínimo esfuerzo) predice significativamente la intención de adoptarla.

El indicador de viabilidad y escalabilidad obtuvo la mayor aceptación del estudio (65.33%), reflejando una percepción favorable sobre el potencial de implementación del prototipo. Este resultado concuerda con estudios recientes que muestran que la percepción de utilidad y la percepción de facilidad de uso son determinantes clave de la intención conductual hacia la adopción de tecnologías agrícolas. Por ejemplo, una investigación reciente en contextos agrícolas han encontrado que variables equivalentes a la utilidad percibida y facilidad de uso ejercen una influencia significativa sobre la intención de adoptar tecnologías agrícolas, especialmente en la adopción de nuevas tecnologías agrícolas en China [25]. Asimismo, el modelo de aceptación de tecnología —y sus extensiones— han corroborado que los constructos de utilidad percibida y facilidad de uso ejercen efectos directos o indirectos sobre la actitud hacia el uso y la intención de uso de sistemas tecnológicos aplicados a la agricultura digital y de precisión [26].

Lemay y Boggs [27] realizaron una síntesis interpretativa de conocimiento sobre determinantes de adopción de automatización y robótica en agricultura, analizando 72 artículos publicados principalmente en 2020-2021. Sus hallazgos identifican que, más allá de factores técnicos, aspectos económicos (costo inicial, retorno de inversión), sociales (capacitación, aceptabilidad cultural) y regulatorios (políticas de apoyo, estándares de seguridad) son críticos para la adopción exitosa. Los autores enfatizan que tecnologías percibidas como viables técnicamente pero que enfrentan barreras económicas o de conocimiento tienen baja probabilidad de adopción generalizada, particularmente entre pequeños productores. Esta perspectiva es relevante para el prototipo evaluado, ya que, aunque la viabilidad técnica fue bien valorada, la implementación exitosa requerirá estrategias que aborden costos, capacitación y soporte técnico continuo.

Khanna et al. [28] analizan la economía de la adopción de tecnologías digitales de IA en agricultura y afirman que en agricultura las tecnologías digitales de IA alteran el espacio de decisión de los agricultores mediante gestión específica de la localidad, maquinaria autónoma o sistemas de recomendación, pero advierten que su adopción va acompañada de cambios en modelos económicos teóricos y empíricos tradicionales, ya que estas tecnologías traen consigo aprendizaje por refuerzo y adaptación continua que cambian radicalmente el modo de toma de decisiones en agricultura. Para el prototipo analizado, el valor no sólo se encuentra en la automatización del pesaje, sino en su potencial para generar datos estructurados que alimenten sistemas de gestión más amplios permitiendo cosas como realizar análisis predictivos, optimizar el inventario o tomar decisiones basadas en la evidencia. La alta aceptación en viabilidad demuestra que los expertos se ven señalados por este potencial transformador.

4.5 Limitaciones de la investigación

De acuerdo con el presente análisis, si bien el mismo ofrece información valiosa con relación a la percepción, desde la experiencia, del patrón de balanza automática, también hay que tener en cuenta

las premisas metodológicas que limitan de alguna manera la interpretación de los resultados. De un lado, la validación que se realizó fue exclusivamente mediante juicio experto en forma de cuestionario dicotómico y no incluyó pruebas empíricas del desempeño del patrón de balanza automática en condiciones reales de operación. A pesar de que, en fases tempranas de desarrollo tecnológico, la validación experta es un procedimiento adecuado y ofrece información de gran interés acerca de la relevancia conceptual y la viabilidad técnica, no debe sustituir la válida y rigurosa validación empírica, que incorpore mediciones objetivas de precisión, repetibilidad, robustez bajo condiciones variables y desempeño en el largo plazo.

En segundo lugar, el tamaño de la muestra de 25 expertos, aunque es un tamaño suficiente para los estudios exploratorios de validación inicial, limita la generalización de los hallazgos y la potencia estadística para realizar análisis estadísticos inferenciales. Los posteriores estudios se beneficiarían de muestras más amplias por sus análisis de subgrupos (por ejemplo, al comparar las perspectivas de los expertos en metrología con los de la agroindustria) y por sus análisis multivariantes más robustos. Adicionalmente, la muestra fue de conveniencia dentro del ámbito agroindustrial y de tecnologías de la información, lo cual, aunque apropiado para los objetivos del estudio, introduce potencial sesgo de selección que debe considerarse al interpretar los resultados. En tercer lugar, el instrumento de evaluación, aunque demostró confiabilidad interna aceptable ($\alpha = 0.759$), utilizó ítems dicotómicos que, si bien facilitan respuestas claras y reducen ambigüedad, limitan la riqueza de información capturada comparado con escalas Likert multi-punto que permitirían capturar matices en las percepciones de los expertos. Estudios subsecuentes podrían beneficiarse de instrumentos que combinen ítems cuantitativos (escalas de valoración) con componentes cualitativos (preguntas abiertas) para obtener comprensión más profunda de las razones subyacentes a las valoraciones expresadas.

En cuarto lugar, la evaluación fue conducida en una situación concreta del desarrollo del prototipo, careciendo de un seguimiento longitudinal para evaluar la evolución del sistema a medida que se introducen mejoras o cambios en respuesta a los comentarios iniciales. Por tanto, consideramos que, estudios longitudinales podrían ayudar a evaluar múltiples iteraciones del prototipo y permitirían ofrecer una evidencia más cercana a la eficacia de las estrategias de refinamiento y la trayectoria de maduración tecnológica del prototipo. Por último, el estudio no contemplaba ninguna evaluación formal económica sobre los costes de implementación, el retorno de la inversión proyectada, ni un análisis de viabilidad económica en función de las diferentes escalas de operación que es posible adoptar. Aunque la viabilidad fue evaluada cuantitativamente por expertos, un análisis económico riguroso sería necesario para poder informar decisiones de inversión y políticas de apoyo a nuevas tecnologías. Y finalmente, la investigación se circunscribió a un ámbito geográfico y agroindustrial concreto, de tal forma que, aunque es correcta para estudios de caso, dificulta la generalización de los hallazgos en otros ámbitos con otras particularidades de producción, infraestructuras tecnológicas o marcos regulatorios. Por tanto, las referidas limitaciones no invalidan la mayoría de los hallazgos del estudio, sino que delimitan su alcance interpretativo y marcan vías importantes para futuras investigaciones.

V. CONCLUSIONES

El prototipo de balanza automática integrada a un desgranador de maíz, desarrollado mediante tecnologías de la información, fue evaluado a través de validación experta, generándose evidencia relevante sobre su pertinencia técnica, viabilidad de implementación y necesidades de refinamiento. El resultado del nivel de aceptación general fue moderado-favorable, con variación entre indicadores que caracteriza las soluciones tecnológicas en etapa de maduración. Por otro lado, el reconocimiento del valor conceptual operativo junto con los aspectos técnicos se encuentra en un proceso de

maduración. En este orden de cosas, la viabilidad y la escalabilidad lograron una presencia más alta (65.33%), una eficiencia operacional que se ubica en segundo lugar (60.0%) y con la integración tecnológica al 56.0%. En lo que corresponde a la precisión y confiabilidad se logró un 52.0%, es decir, el prototipo requiere de ajustes técnicos antes de una implementación a mayor escala.

A partir de estos resultados, se podría concluir que el prototipo tiene un gran potencial de contribuir a la modernización de los procesos postcosecha en el sector agrícola, de manera especial en sistemas de producción de maíz donde la automatización y la medición precisa constituyen dimensiones críticas de eficiencia. La validación pericial respalda la existencia de una propuesta de valor bien definida en relación a la agricultura de precisión e implicando mejoras en el control operacional del desgranado. Por otro lado, la ejecución del potencial que tiene el prototipo exige un impulso a la mejora que toma como eje la precisión metrológica, la fiabilidad de los sensores y la integración sistémica del conjunto tecnológico, así como la validación experimental y la implementación de la tecnología en el marco de limitaciones económicas y capacidades técnicas de los usuarios finales.

En el marco de un horizonte temporal intermedio, la incorporación de técnicas vinculadas a la inteligencia artificial se plantea como una alternativa estratégica para conseguir no sólo una mejora del rendimiento del prototipo, sino también, y más importante aún, su escalabilidad latente, ya que los algoritmos de aprendizaje automático permitirían mejorar la calibración de la balanza, detectar anomalías en tiempo real, compensar las variaciones asociadas al comportamiento del grano y asistir en la toma de decisiones a partir de la obtención de análisis predictivos del proceso de postcosecha. En consonancia con este planteamiento, el prototipo podría transformarse de un sistema automatizado a uno semiautónomo que podría ser acoplado a entornos de agricultura digital como una contribución sostenida a la mejora de la eficiencia agroindustrial, la seguridad alimentaria y la adopción gradual de tecnologías avanzadas en la producción de maíz.

Contribución de los autores:

Los autores contribuyeron de manera equivalente en todas las etapas del estudio, incluyendo su concepción, diseño, análisis de datos, redacción y revisión.

Agradecimientos:

Se expresa un reconocimiento a la Universidad Agraria del Ecuador por el apoyo brindado.

Financiamiento:

El estudio ha sido autofinanciado por los autores.

Declaración de consentimiento informado:

La participación estuvo condicionada a la aceptación voluntaria del consentimiento informado.

Declaración de disponibilidad de datos:

Los datos del estudio están disponibles a solicitud razonable al autor de correspondencia.

Conflictos de intereses:

No existen conflictos de intereses.

Declaración de uso de IA:

No se utilizó ninguna herramienta de IA. El contenido académico es responsabilidad exclusiva del autor.

REFERENCIAS

- [1] O. Erenstein, M. Jaleta, K. Sonder, K. Mottaleb, and B. M. Prasanna, "Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications," *Food Sec.*, vol. 14, no. 5, pp. 1295–1319, Oct. 2022. <https://doi.org/10.1007/s12571-022-01288-7>
- [2] D. Kumar and P. Kalita, "Reducing Postharvest Losses during Storage of Grain Crops to Strengthen Food Security in Developing Countries," *Foods*, vol. 6, no. 1, p. 8, Jan. 2017. <https://doi.org/10.3390/foods6010008>
- [3] B. Nath, G. Chen, C. M. O'Sullivan, and D. Zare, "Research and Technologies to Reduce Grain Postharvest Losses: A Review," *Foods*, vol. 13, no. 12, p. 1875, Jun. 2024. <https://doi.org/10.3390/foods13121875>
- [4] A. Soussi, E. Zero, R. Sacile, D. Trincherro, and M. Fossa, "Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review," *Sensors*, vol. 24, no. 8, p. 2647, Apr. 2024. <https://doi.org/10.3390/s24082647>
- [5] M. Ayaz, M. Ammad-Uddin, Z. Sharif, A. Mansour, and E.-H. M. Aggoune, "Internet-of-Things (IoT)-Based Smart Agriculture: Toward Making the Fields Talk," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 129551–129583, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932609>
- [6] T. Alahmad, M. Neményi, and A. Nyéki, "Applying IoT Sensors and Big Data to Improve Precision Crop Production: A Review," *Agronomy*, vol. 13, no. 10, p. 2603, Oct. 2023. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102603>
- [7] F. Ferrández-Pastor, J. García-Chamizo, M. Nieto-Hidalgo, J. Mora-Pascual, and J. Mora-Martínez, "Developing Ubiquitous Sensor Network Platform Using Internet of Things: Application in Precision Agriculture," *Sensors*, vol. 16, no. 7, p. 1141, Jul. 2016. <https://doi.org/10.3390/s16071141>
- [8] D. T. Byrne, H. Esmonde, D. P. Berry, F. McGovern, P. Creighton, and N. McHugh, "Sheep lameness detection from individual hoof load," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 158, pp. 241–248, Mar. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.01.048>
- [9] P. Jayaraman, A. Yavari, D. Georgakopoulos, A. Morshed, and A. Zaslavsky, "Internet of Things Platform for Smart Farming: Experiences and Lessons Learnt," *Sensors*, vol. 16, no. 11, p. 1884, Nov. 2016. <https://doi.org/10.3390/s16111884>
- [10] E. Navarro, N. Costa, and A. Pereira, "A Systematic Review of IoT Solutions for Smart Farming," *Sensors*, vol. 20, no. 15, p. 4231, Jul. 2020. <https://doi.org/10.3390/s20154231>
- [11] T. Miller, G. Mikiciuk, I. Durlík, M. Mikiciuk, A. Łobodzińska, and M. Śnieg, "The IoT and AI in Agriculture: The Time Is Now—A Systematic Review of Smart Sensing Technologies," *Sensors*, vol. 25, no. 12, p. 3583, Jun. 2025. <https://doi.org/10.3390/s25123583>
- [12] J. A. Alcides, T. J. A. Da Silva, and S. P. Andrade, "Smart IoT lysimetry system by weighing with automatic cloud data storage," *Smart Agricultural Technology*, vol. 4, p. 100177, Aug. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100177>
- [13] Z. He, Q. Li, M. Chu, and G. Liu, "Dynamic weighing algorithm for dairy cows based on time domain features and error compensation," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 212, p. 108077, Sep. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108077>
- [14] A. Jorge De Paula Nunes Cassimiro, E. Da Silva Ramos, V. E. Cabrera, and E. Noronha De Andrade Freitas, "Milk weighing scale based on machine learning," *Smart Agricultural Technology*, vol. 7, p. 100417, Mar. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100417>
- [15] P. Burnos, J. Gajda, R. Sroka, M. Wasilewska, and C. Dolega, "High Accuracy Weigh-In-Motion Systems for Direct Enforcement," *Sensors*, vol. 21, no. 23, p. 8046, Dec. 2021. <https://doi.org/10.3390/s21238046>
- [16] J. S. Cardenas-Gallegos, P. M. Severns, P. Klimeš, L. N. Lacerda, A. Peduzzi, and R. Soranz Ferrarezi, "Reliable plant segmentation under variable greenhouse illumination conditions," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 229, p. 109711, Feb. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109711>
- [17] S. Mansoor, S. Iqbal, S. M. Popescu, S. L. Kim, Y. S. Chung, and J.-H. Baek, "Integration of smart sensors and IOT in precision agriculture: trends, challenges and future perspectives," *Front. Plant Sci.*, vol. 16, p. 1587869, May 2025. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1587869>
- [18] M. Aarif K. O., A. Alam, and Y. Hotak, "Smart Sensor Technologies Shaping the Future of Precision Agriculture: Recent Advances and Future Outlooks," *Journal of Sensors*, vol. 2025, no. 1, p. 2460098, Jan. 2025. <https://doi.org/10.1155/js/2460098>
- [19] E. Burdilna, S. Serhienko, I. Serhienko, O. Chorna, and A. Nikolenko, "Automated Control System for Grain Throwers Based on Fuzzy Logic," in *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine: IEEE, Sep. 2021, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598608>

- [20] L. He, F. Wu, X. Du, and G. Zhang, "Cascade-SORT: A robust fruit counting approach using multiple features cascade matching," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 200, p. 107223, Sep. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107223>
- [21] D. Rodrigues *et al.*, "Applying Remote Sensing, Sensors, and Computational Techniques to Sustainable Agriculture: From Grain Production to Post-Harvest," *Agriculture*, vol. 14, no. 1, p. 161, Jan. 2024. <https://doi.org/10.3390/agriculture14010161>
- [22] A. Latif, Suwarjono, M. A. Yusuf, and J. Budiasto, "Real-Time Framework for Sustainable IoT-Based Grain Drying Integrated Load, Temperature, and Energy Performance Monitoring," *I2M*, vol. 24, no. 3, pp. 195–206, Jun. 2025. <https://doi.org/10.18280/i2m.240301>
- [23] M. R. Sarker, M. G. M. Abdolrasol, S. Mohamad Hanif Md, R. A. Kadir, M. N. Ahmad, and J. L. Olazagoitia, "Advancing Agriculture Automation Systems: Technological Innovations, Possible Applications, Challenges, and Recommendations," *Advances in Agriculture*, vol. 2025, no. 1, p. 5518653, Jan. 2025. <https://doi.org/10.1155/aia/5518653>
- [24] X. Chen, "The role of modern agricultural technologies in improving agricultural productivity and land use efficiency," *Front. Plant Sci.*, vol. 16, p. 1675657, Sep. 2025. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1675657>
- [25] X. Zhang, Q. Yang, A. Al Mamun, M. Masukujjaman, and M. M. Masud, "Acceptance of new agricultural technology among small rural farmers," *Humanit Soc Sci Commun*, vol. 11, no. 1, p. 1641, Dec. 2024. <https://doi.org/10.1057/s41599-024-04163-2>
- [26] R. J. Thomas, G. O'Hare, and D. Coyle, "Understanding technology acceptance in smart agriculture: A systematic review of empirical research in crop production," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 189, p. 122374, Apr. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122374>
- [27] M. A. Lemay and J. Boggs, "Determinants of adoption of automation and robotics technology in the agriculture sector—A mixed methods, narrative, interpretive knowledge synthesis," *PLOS Sustain Transform*, vol. 3, no. 11, p. e0000110, Nov. 2024. <https://doi.org/10.1371/journal.pstr.0000110>
- [28] M. Khanna, S. S. Atallah, T. Heckeley, L. Wu, and H. Storm, "Economics of the Adoption of Artificial Intelligence-Based Digital Technologies in Agriculture," *Annual Review of Resource Economics*, vol. 16, no. 1, pp. 41–61, Oct. 2024. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-101623-092515>