

Diseño de un prototipo automatizado para la clasificación de arándanos mediante tecnologías IoT para el cultivo San Alejo (Guasca, Colombia)

Design of an automated prototype for the classification of blueberries using IoT technologies for the San Alejo crop (Guasca, Colombia)

Jorge Esau Tierradentro ¹	 https://orcid.org/0009-0004-3503-8102
Gina Vera Rizzo ¹	 https://orcid.org/0000-0002-1525-6653
Lina Paola Cárdenas Rincón ¹	 https://orcid.org/0009-0002-4768-2240
Laura Milena Palacio Pava ¹	 https://orcid.org/0009-0000-1181-9036
Paula Daniela Maldonado Cuevas ^{1*}	 https://orcid.org/0009-0003-8123-1029
Juan David Bejarano Arciniegas ¹	 https://orcid.org/0009-0005-3165-1150

Recibido 19 de octubre de 2025, aceptado 09 de diciembre de 2025

Received: October 19, 2025 Accepted: December 09, 2025

RESUMEN

Este estudio presenta el diseño, construcción y validación de un prototipo automatizado para la clasificación de arándanos por tamaño, implementado en el cultivo San Alejo (Guasca, Colombia). El objetivo fue reemplazar el proceso manual, caracterizado por alta variabilidad, lentitud y dependencia de mano de obra con experiencia, por un sistema de clasificación más preciso, eficiente y estandarizado. El prototipo integra tecnologías del Internet de las Cosas (IoT), conectado a una tarjeta ESP32 y control remoto vía aplicación Blynk IoT, lo cual en conjunto con una estructura cilíndrica perforada, fabricada en acero inoxidable, permite clasificar los frutos en tres categorías: Jumbo, Primera y Segunda.

Metodológicamente, se aplicaron herramientas como análisis estadístico, ciclo PHVA, diagramas de Ishikawa y Pareto, análisis morfológico de materiales, modelado en SolidWorks y validación mediante matriz QFD. Los resultados demostraron una mejora del 91,5% en capacidad operativa (de 47 a 90 lb/día), un aumento del 15,4% en precisión de clasificación (del 78% al 90%) y una reducción del 55,8% en errores. También se eliminó la variabilidad entre operarios y se redujo el tiempo por lote en un 55% en cuanto a la validación por el usuario final otorgó una calificación de 4,6 sobre 5,0.

El sistema desarrollado representa una solución replicable, de bajo costo y bajo mantenimiento, apropiada para pequeños productores. Se concluye que este prototipo es una herramienta efectiva para avanzar hacia una agricultura más inteligente, sostenible y tecnificada.

Palabras clave: Automatización, IoT, clasificación, arándanos, poscosecha, prototipo y precisión.

ABSTRACT

This study presents the design, construction, and validation of an automated prototype for blueberry size classification, implemented at the San Alejo farm (Guasca, Colombia). The objective was to replace the manual process with a more precise, efficient, and standardized classification system. The prototype

¹ Fundación Universitaria del Área Andina. Facultad de Ingeniería y Ciencia Básicas, Departamento de Ingeniería Industrial. Bogotá, Colombia. Email: jtierradentro3@areandina.edu.co; gvera6@areandina.edu.co; lcardenas97@estudiantes.areandina.edu.co; lpalacio29@estudiantes.areandina.edu.co; pmaldonado2@estudiantes.areandina.edu.co; jbejarano32@estudiantes.areandina.edu.co

* Autor de correspondencia: pmaldonado2@estudiantes.areandina.edu.co

integrates Internet of Things (IoT) technologies using an ESP32 microcontroller and remote control through the Blynk IoT application. Together with a perforated cylindrical stainless-steel structure, it enables the classification of berries into three categories: Jumbo, First, and Second.

Methodologically, tools such as statistical analysis, the PDCA cycle, Ishikawa and Pareto diagrams, morphological material analysis, SolidWorks modeling, and validation using a Quality Function Deployment (QFD) matrix were applied. Results demonstrated a 91.5% improvement in operational capacity (from 47 to 90 lb/day), a 15.4% increase in classification accuracy (from 78% to 90%), and a 55.8% reduction in errors. Operator variability was eliminated, and processing time per batch was reduced by 55%. Final user validation yielded a score of 4.6 out of 5.0.

The developed system represents a replicable, low-cost, and low-maintenance solution suitable for small-scale producers. It is concluded that the prototype is an effective tool for advancing toward more innovative, more sustainable, and technology-driven agriculture.

Keywords: Automation, IoT, classification, blueberries, postharvest, prototype, accuracy.

INTRODUCCIÓN

La industria agrícola colombiana enfrenta retos importantes en el contexto de la competitividad global, especialmente en cultivos de alto valor como el arándano. Este fruto, que ha experimentado un crecimiento acelerado en su demanda tanto en el mercado nacional como internacional, requiere procesos de poscosecha altamente eficientes para garantizar la calidad exigida por los consumidores. Sin embargo, una de las principales limitaciones identificadas en los sistemas de producción es la clasificación manual del fruto, proceso que no solo incrementa los costos operativos, sino que también introduce una alta variabilidad en el producto final, afectando directamente la estandarización de la clasificación por tamaño y la presentación del fruto [1].

Particularmente en el caso del cultivo San Alejo, ubicado en el municipio de Guasca, Cundinamarca, se evidenció que el método tradicional de clasificación manual genera ineficiencias significativas que dificultan el cumplimiento de los estándares comerciales [2]. Esta situación es común entre pequeños y medianos productores, los cuales, a pesar de contar con condiciones agroclimáticas favorables, no disponen de herramientas tecnológicas adecuadas para optimizar sus procesos [8].

Diversos estudios han resaltado el papel de las tecnologías emergentes en la transformación digital del sector agrícola. Entre ellas, el Internet de las Cosas (IoT) se presenta como una alternativa viable y adaptable, incluso en entornos rurales, por su capacidad de conectar dispositivos y sistemas de

control en tiempo real [7], [9]. La aplicación de estas tecnologías en el proceso de clasificación puede representar un cambio significativo en la eficiencia operativa, reduciendo la dependencia de la mano de obra manual, minimizando errores humanos y mejorando la uniformidad del producto, como lo señalan [3], [6].

Este artículo presenta el desarrollo de un prototipo clasificador de arándano con capacidad clasificar 3 tamaños, Jumbo de 16 milímetros, Primera de 12 a 15 milímetros, Segunda de 8 a 11 milímetros por medio de tecnología IoT, enfocado en resolver las problemáticas identificadas en el proceso de poscosecha del cultivo San Alejo. La propuesta parte de un diagnóstico contextual, se fundamenta en referentes tecnológicos previos como los descritos por [7] quien propone un diseño conceptual viable, adaptable y con bajo requerimiento técnico para su operación. El propósito es aportar una solución funcional, escalable y replicable que responda a las necesidades de pequeños productores, alineándose con los principios de agricultura inteligente y sostenibilidad tecnológica [4].

METODOLOGÍA

Este estudio se desarrolló bajo un enfoque metodológico mixto, que integra técnicas cualitativas y cuantitativas para el análisis y diseño de un prototipo tecnológico orientado a la automatización del proceso de clasificación de arándanos por tamaño. La investigación se estructuró en cuatro fases principales, las cuales incluyeron el diagnóstico del problema, análisis de referentes tecnológicos, diseño del prototipo y fabricación del mismo.

En la fase diagnóstica, se realizó un análisis de las condiciones operativas del cultivo San Alejo, mediante visitas de campo, observación directa y aplicación de encuestas a operarios y responsables del proceso de poscosecha. Esto permitió identificar los principales cuellos de botella en la clasificación del fruto, los cuales se relacionaban con la variabilidad en el criterio humano, el tiempo excesivo requerido para el proceso manual y la falta de estandarización en el tamaño del producto final.

Esta problemática se comprobó mediante el desarrollo de tres modelos de simulación para representar el proceso de clasificación manual de arándanos en el cultivo seleccionado, cada uno asociado a un trabajador distinto, teniendo esto en cuenta el trabajador A, siendo el más inexperto en el proceso de clasificación, cuenta con aproximadamente 10 días de experiencia. Consecutivamente, el trabajador B presenta una experiencia intermedia cuantificable en 2 meses, y, por último, el trabajador C, el cual cuenta con una experiencia alta cuantificable en 6 meses. En este contexto, los datos de desempeño en libras clasificadas se recolectaron durante tres lunes y dos martes, estos valores permitieron evidenciar una variabilidad en la producción resultante del nivel de experiencia o juicio subjetivo de cada colaborador.

Como se observa en la Figura 1, el Trabajador C mantiene el nivel más alto de productividad, con un

promedio superior a las 50 libras por jornadas. El Trabajador B presenta un rendimiento intermedio con un comportamiento constante y estable a lo largo del tiempo. Por su parte, el Trabajador A tiene el desempeño más bajo y disperso, evidenciando fluctuaciones en su capacidad de clasificación.

Con base a los datos recolectados, se calcularon estadísticas descriptivas como media, varianza y desviación estándar para cada operario. Posteriormente, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) para identificar si existían diferencias estadísticamente significativas en el rendimiento entre los trabajadores. Los resultados mostraron que el trabajador C tenía la mayor media de clasificación (53,6 libras), mientras que el trabajador B fue el más consistente, con la menor desviación estándar (1,92). El ANOVA arrojó un p-valor de 0,00002 indicando diferencias estadísticamente significativas entre los trabajadores, y las comparaciones múltiples confirmaron que el desempeño entre A, B y C era significativamente disperso. Esta etapa permitió evidenciar la variabilidad humana en el proceso de selección y justificar la necesidad de un sistema automatizado que garantice mayor precisión, eficiencia y estandarización en la clasificación de arándanos sin depender de mano de obra con experiencia para evitar esas dispersiones.

A partir de este diagnóstico, se emplearon diversas herramientas de ingeniería para analizar y mejorar

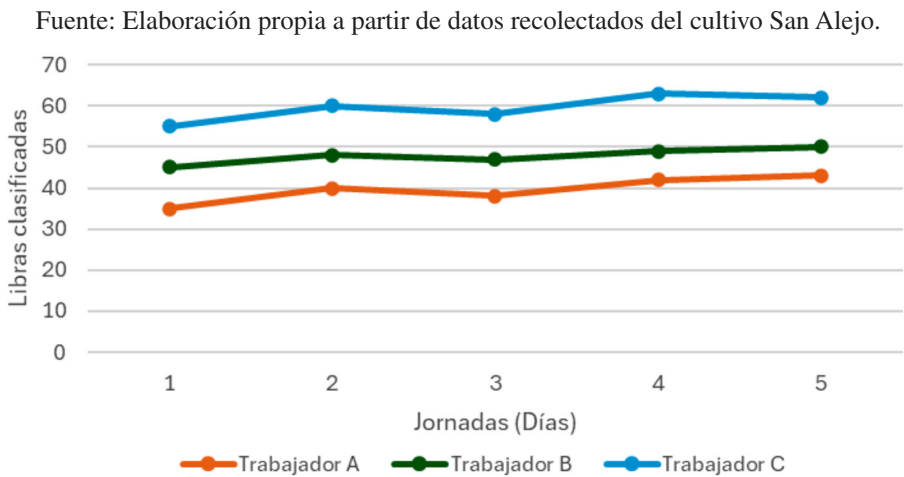


Figura 1. Libras clasificadas por jornada durante cinco días consecutivos por tres operarios del cultivo San Alejo. Se evidencia la diferencia en productividad y consistencia del proceso manual.

el proceso, entre ellas el ciclo PHVA (Planear-Hacer-Verificar-Actuar), el cual permitió identificar y desarrollar las fases necesarias para abordar la problemática presentada en el cultivo San Alejo, guiando de forma continua cada etapa del proyecto, permitiendo de esta manera una construcción del prototipo adecuada. En la fase de planeación se identificaron las necesidades operativas del cultivo mediante observación directa; en la fase de ejecución se diseñó y fabricó el prototipo considerando los requerimientos hallados en la fase de planeación; durante la verificación se evaluó el desempeño del sistema en pruebas prácticas y finalmente, en la fase de ajuste, se reconocieron oportunidades de mejora que sientan las bases para futuras optimizaciones e implementaciones en contextos similares.

Como complemento se implementó el diagrama de Ishikawa (Figura 2), el cual permitió identificar y organizar las causas que generaban alta variabilidad en la clasificación manual de arándanos por tamaño. A través de este análisis, se evidenció que los principales factores que afectan la uniformidad del proceso estaban relacionados con aspectos humanos, metodológicos, técnicos y ambientales, donde se destacan el juicio subjetivo del operario, la ausencia de sistemas automatizados, el uso de herramientas rudimentarias, la falta de una secuencia de trabajo definida y las condiciones de trabajo sin ergonomía. Estos hallazgos fueron determinantes para definir los requerimientos funcionales del prototipo, permitiendo diseñar una solución enfocada en la

automatización del proceso de clasificación, lo cual contribuyó a mejorar la precisión, reducir la subjetividad y garantizar una mayor uniformidad en el producto final.

Adicionalmente, se construyó un diagrama de Pareto con base en el principio 80/20 (Figura 3), con el propósito de identificar las problemáticas que generan mayor impacto en el proceso de clasificación de arándanos por tamaño, dentro del contexto productivo del cultivo San Alejo. Esta herramienta permitió priorizar las causas que afectan significativamente los resultados que llegan a los consumidores del producto, facilitando así la focalización de esfuerzos hacia aquellas variables críticas que requieren intervención.

La recolección de datos se basó en 172 observaciones obtenidas mediante un cuestionario dirigido a cosechadores de arándanos con experiencia, en el que se les solicitó señalar cuál de las problemáticas planteadas consideraban más relevante resolver mediante un prototipo clasificador. Este enfoque metodológico permitió una aproximación empírica fundamentada en la experiencia del personal operativo, asegurando así una alineación entre el diseño de soluciones tecnológicas y las necesidades reales del proceso.

Se obtuvo como resultado que, al centrar los esfuerzos en las primeras dos dificultades (clasificación manual y falta de personal con experiencia), se reduciría

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. Diagrama Ishikawa correspondiente al análisis representativo de los factores causales referentes a la variabilidad del proceso manual de clasificación de arándanos por tamaño.

Fuente: Elaboración propia.

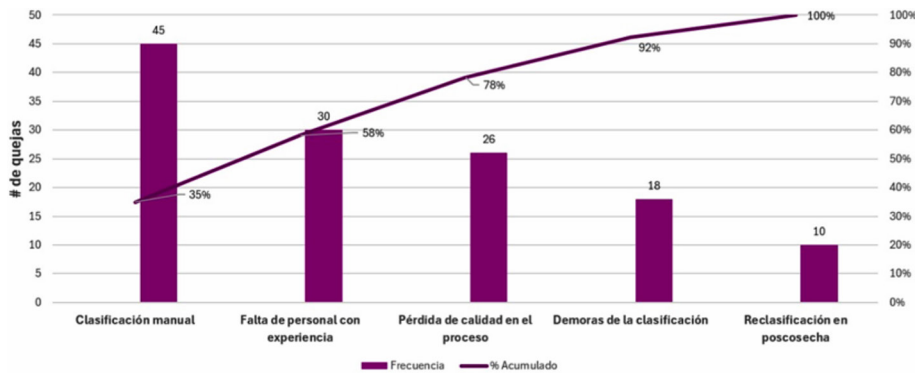


Figura 3. Diagrama de Pareto que identifica y prioriza los factores que generan mayor impacto en la ineficiencia del proceso de clasificación de arándanos por tamaño.

el 58% de las dificultades planteadas, esto implica que el desarrollo e implementación del prototipo clasificatorio de arándanos por tamaño enfocado en automatizar la selección por tamaño y mitigar la dependencia en operadores especializados aborda directamente estas barreras críticas. De este modo, no sólo se optimiza el rendimiento del proceso de clasificación, sino que también se cumple con el objetivo de aplicar una solución técnica que responda eficazmente a las causas principales identificadas en el diagrama de Pareto.

Por otro lado, en cuanto al análisis de antecedentes tecnológicos, se realizó una revisión bibliográfica

en la literatura científica y proyectos similares desarrollados en fuentes académicas, destacando soluciones aplicadas en agricultura de precisión mediante el uso de sensores, visión artificial y arquitectura IoT [14]. Esta revisión permitió seleccionar la tecnología que más se adecuaba a un contexto de baja tecnificación y recursos limitados, como es el caso de la microempresa intervenida.

Durante la fase de diseño se elaboró un prototipo analítico clasificador (Figura 4) utilizando el software SolidWorks. El diseño consistió en una estructura cilíndrica giratoria con perforaciones de distintos diámetros distribuidas longitudinalmente, permitiendo

Fuente: Elaboración propia.

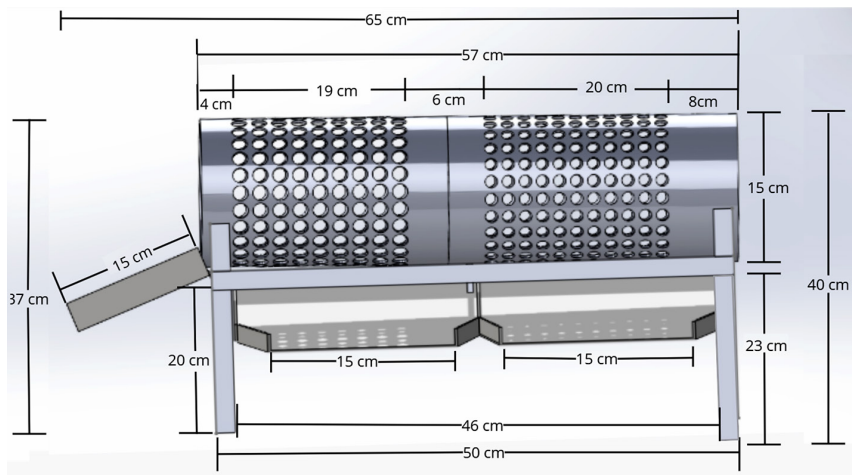


Figura 4. Figura técnica con cotas del prototipo clasificador de arándanos.

la clasificación de los arándanos por tamaño a medida que se desplazan por el mismo. siguiendo principios mecánicos de separación física y contacto controlado del fruto similares a los empleados en sistemas automatizados con cintas transportadoras como el descrito por [11]. La estructura se soportó sobre una base metálica inclinada que facilita el movimiento descendente del fruto y su recolección en bandejas ubicadas estratégicamente bajo cada sección. El diseño buscó optimizar la simplicidad operativa y estabilidad estructural.

La elección del cilindro rotatorio se fundamentó en parámetros como lo son la resistencia estructural, facilidad de limpieza y el bajo costo de los materiales, priorizando la reproducibilidad del sistema en contexto de microempresas del municipio de Guasca, en comparación con otras alternativas como lo son rodillos paralelos de poliuretano, mallas vibrantes, bandas perforadas; la elección contaba con el menor costo, facilidad de limpieza y resistencia. El acero inoxidable AISI 304 se seleccionó como material principal por su inercia química, resistencia a la corrosión y cumplimiento de normativas sanitarias para el manejo de alimentos, garantizando la inocuidad del fruto durante la clasificación, además, su superficie lisa reduce los daños por rasgaduras en los arándanos.

Desde el punto de vista operativo, el sistema rotatorio perforado ofrece una clasificación pasiva y continua, sin necesidad de vibración externa o sistemas de transporte adicionales, lo cual minimiza la demanda energética y el riesgo de daño en el fruto gracias a la baja velocidad giratorio, lo que previene fuertes impactos y pérdida de bloom, por lo tanto, la selección del cilindro se basó en un equilibrio entre viabilidad económica, higiene, simplicidad mecánica y desempeño funcional, asegurando una solución replicable y de bajo mantenimiento para pequeños productores.

Por otro lado, en lo referente a los riesgos operativos, el cilindro rotatorio puede presentar atascos por acumulación de frutos o residuos; para mitigar este efecto se proponen protocolos de limpieza entre ciclos, garantizando la eliminación de restos que puedan obstruir las perforaciones. Asimismo, se recomienda mantener un flujo máximo aproximado de 50 frutos cada cinco giros, condición que favorece el desplazamiento por gravedad y reduce el riesgo

de fricción, sobrecarga o daño en los frutos durante el proceso de clasificación.

Otro riesgo identificado está relacionado con la superficie donde sea ubicado el prototipo puesto que el sistema depende de una inclinación fija de 4° para garantizar el desplazamiento controlado de los frutos por gravedad, cualquier irregularidad o desnivel en la superficie de apoyo puede alterar dicho ángulo, generando variaciones en la velocidad de desplazamiento, acumulación de frutos por estancamiento o direccionamiento de los arándanos por tal alteración en la inclinación, para mitigar este riesgo, se recomienda instalar el prototipo sobre una superficie nivelada y firme, verificar el ángulo de inclinación, de ser necesario se propone ajustar la base mediante soportes que aseguren la posición óptima de operación.

En cuanto a la fabricación del prototipo físico, se inició con el cilindro, pieza principal del sistema, para ello, se perforó una lámina de acero inoxidable AISI 304 de 2 mm de espesor mediante corte láser, incorporando perforaciones uniformes distribuidas a lo largo del cilindro con un espacio entre perforaciones de 2 mm como se muestra en la Figura 4, iniciando con diámetros de 13 mm para la primera sección y terminando con diámetros de 16 mm para la segunda sección perforada, las cuales se separan por 6 cm de lámina sin perforaciones, posteriormente, la lámina fue enrolada para darle la forma cilíndrica, obteniendo así el tambor, el cual posee una longitud de 46,5 cm y un diámetro de 15 cm.

Luego se elaboró la base para el cilindro en acero al carbono ASTM A36, con una inclinación de 4°, lo que facilita el desplazamiento de los frutos por gravedad, con cuatro ruedas de goma que permiten el giro controlado del cilindro a través de una polea acoplada a un motor DC de 12V con un torque de 1,8 N·m el cual cuenta con un rpm de 70, gracias al cual conseguía una velocidad nominal de 15 rpm para el cilindro, para controlar el sentido del giro del cilindro se utilizó un módulo L298N.

Para determinar el rpm óptimo y el voltaje adecuado del motor para el prototipo, se realizaron una serie de pruebas experimentales con diferentes motores y velocidades durante el proceso de clasificación, las cuales se representan de manera cuantitativa en

la Tabla 1. Estas pruebas permitieron establecer el tipo de motor y la velocidad nominal óptima para garantizar tanto la eficiencia operativa como la conservación del Bloom del arándano.

Se determinó que una velocidad de 15 rpm constituye el punto óptimo de operación del cilindro, ya que logra un equilibrio entre eficiencia y conservación de la calidad visual del fruto. En los ensayos experimentales con 100 arándanos mixtos (25 de categoría Jumbo, 35 de Primera y 40 de Segunda), se observó que a 10 rpm el tambor presentaba un movimiento demasiado lento, lo que redujo la eficiencia al 88%, dado que algunos frutos permanecían más tiempo dentro del cilindro, aunque se mantenía una calidad del 98%.

Por el contrario, a 20 rpm, el incremento en la velocidad generó un flujo excesivamente rápido, provocando un mayor choque y desgarros entre frutos con lo cual la eficiencia descendió al 93% y la calidad visual se redujo al 83%.

Finalmente, a 15 rpm el sistema alcanzó una eficiencia del 96% y una calidad visual del 98%, clasificando correctamente 96 de los 100 arándanos, mientras solo 2 presentaron una leve pérdida de bloom. Este comportamiento demuestra que 15 rpm representa la velocidad de operación ideal, al garantizar un flujo continuo, evitar colisiones entre frutos y mantener la integridad superficial del arándano, superando los resultados obtenidos en las demás velocidades evaluadas.

Paralelamente, se realizó la programación de una tarjeta ESP32, la cual fue conectada al sistema y configurada mediante la aplicación Blynk IoT, permitiendo su operación remota a través de red Wi-Fi y por último se fabricaron tres bandejas en acero ASTM A36, destinadas a recibir los frutos clasificados a la salida del tambor y guiarlos hacia su respectivo estuche según el tamaño. El resultado final de este proceso se muestra en la Figura 5, donde se observa el prototipo físico completamente ensamblado.

Tabla 1. Pruebas experimentales para determinar RPM y nivel de voltaje en el motor.

Voltaje	RPM	Eficiencia	Porcentaje de calidad
8	10	88%	98%
12	15	96%	98%
16	20	93%	83%

Fuente: Elaboración propia.

Fuente: Elaboración propia.

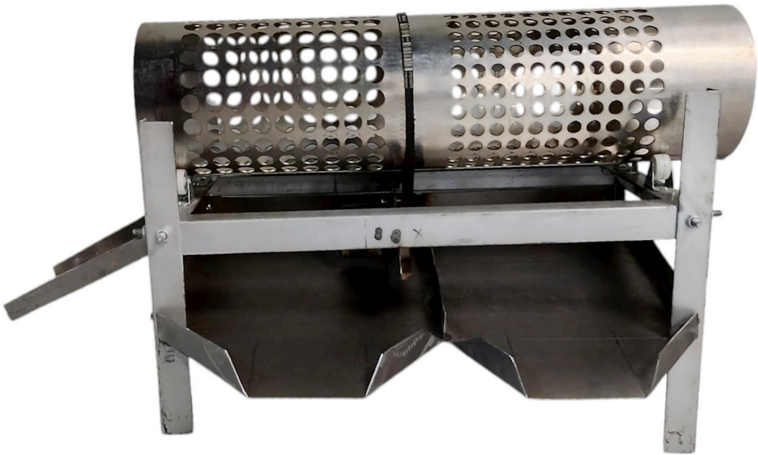


Figura 5. Prototipo físico clasificador de arándanos.

El funcionamiento del prototipo físico construido mostrado en la Figura 5, inicia con la alimentación eléctrica del sistema, una vez que el cilindro se encuentra girando los arándanos son introducidos, durante el giro, los frutos comienzan a desplazarse a lo largo del cilindro, atravesando las diferentes secciones de clasificación. En la primera etapa se separan los arándanos de segunda categoría, con diámetros comprendidos entre 8 y 11 milímetros. Los frutos que superan este tamaño avanzan hacia la segunda sección de orificios, donde se clasifican los arándanos de primera categoría, cuyas dimensiones se encuentran entre 12 y 15 milímetros.

Finalmente, los arándanos Jumbo son conducidos directamente hacia la tercera rampa. Cada fruto, una vez clasificado, es dirigido a su respectivo estuche mediante las rampas de salida, con el propósito de evitar manipulación del mismo. Los diámetros utilizados para la clasificación corresponden a los rangos estandarizados del cultivo San Alejo, asegurando uniformidad y confiabilidad en el proceso.

Luego se procedió a establecer la lógica operativa del sistema mediante un esquema de automatización basado en IoT. Esta lógica fue representada a través de un diagrama de flujo, donde se detallan los pasos secuenciales desde el encendido del dispositivo hasta la finalización del proceso de clasificación. Dicho flujo, mostrado en la Figura 6, facilita la comprensión del funcionamiento general del sistema.

Se representa el flujo de operación del prototipo clasificador de arándanos mediante un sistema automatizado controlado por IoT, en este sentido el proceso inicia con la conexión del prototipo a una fuente eléctrica de 12V y a una red Wi-Fi, condiciones indispensables para acceder a la interfaz de control remoto Blynk IoT. Una vez verificada la conexión, el usuario selecciona la dirección de rotación del cilindro (derecha o izquierda) y configura el tiempo de operación.

Posteriormente, el sistema es activado desde la aplicación móvil (Figura 7), lo que desencadena la transmisión de comandos a la tarjeta ESP32, la cual emite señales de control digital al módulo L298N, el cual actúa como receptor y ejecutor de la operación, iniciando la rotación del cilindro, al culminar el tiempo establecido, la L298N detiene

Fuente: Elaboración propia.

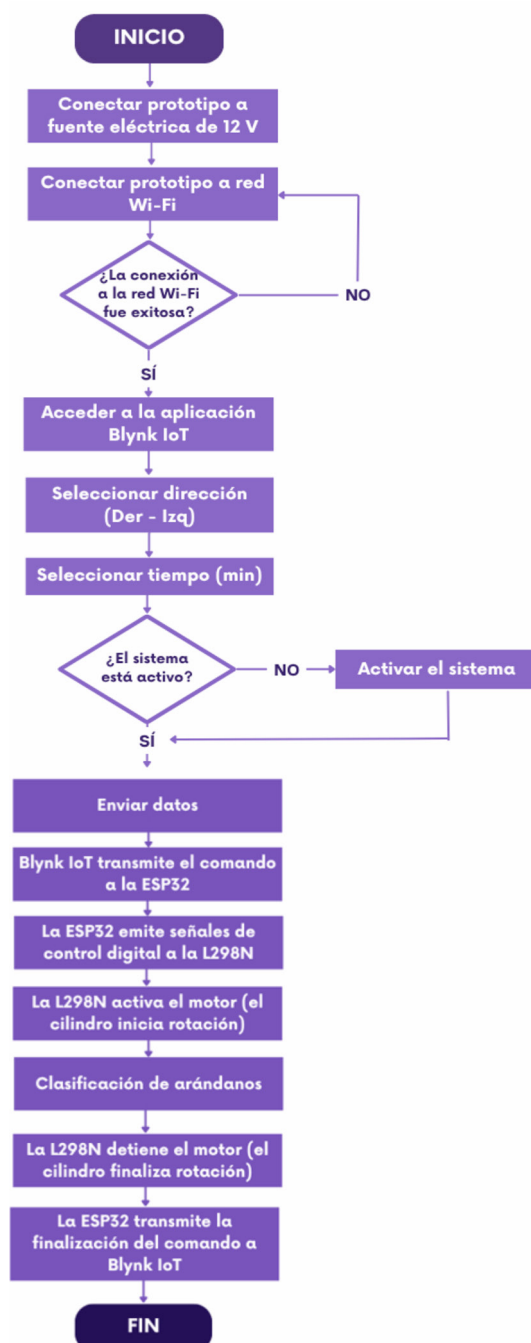


Figura 6. Diagrama de flujo del funcionamiento del prototipo.

el motor y comunica la finalización del ciclo a la tarjeta ESP32 la cual transmite la señal a la plataforma Blynk IoT, cerrando así el proceso, este

Fuente: Elaboración propia.



Figura 7. Interfaz visual app Blynk IoT.

sistema eléctrico es representado físicamente en la Figura 8. Este esquema permite una operación remota, eficiente y estandarizada, reduciendo la intervención humana en el proceso de clasificación por tamaño y garantizando la trazabilidad de cada etapa del sistema.

Para garantizar una reproducibilidad óptima del prototipo es fundamental tener en cuenta la calibración, ya que esta permite mantener constantes las condiciones de operación y asegurar la precisión en la clasificación de los frutos. En primer lugar, la calibración mecánica la cual garantiza la alineación del tambor rotatorio, la inclinación de la base (4°) y el correcto acople entre el motor y la polea, evitando desbalances que puedan alterar la velocidad o generar atascos. En segundo lugar, la calibración eléctrica y funcional la cual se encarga de mantener estable la velocidad nominal del tambor (15 rpm), verificando el desempeño del motor, del módulo L298N y la comunicación con la tarjeta ESP32 a través de la aplicación Blynk IoT, lo que asegurara una respuesta sincronizada y uniforme del sistema.

Como validación del diseño conceptual del prototipo se implementó la matriz QFD más conocida como la casa de la calidad (Figura 9), la cual permitió obtener datos cuantitativos relevantes gracias a la implementación de encuestas basadas en las metodologías Kansei y Kano aplicada a los trabajadores del cultivo y potenciales clientes del prototipo clasificador, al mismo tiempo identificar de manera estructurada las expectativas y necesidades del usuario final. Para ello, se evaluaron características clave del prototipo, tales como peso, tamaño, materiales, control de humedad y el software de procesamiento, en función de los requisitos definidos por el cliente. Entre estos requerimientos se destacan la precisión en la clasificación, la velocidad de procesamiento, la capacidad operativa del sistema, la facilidad de uso y la conservación del fruto en condiciones óptimas para su comercialización.

Fuente: Elaboración propia.

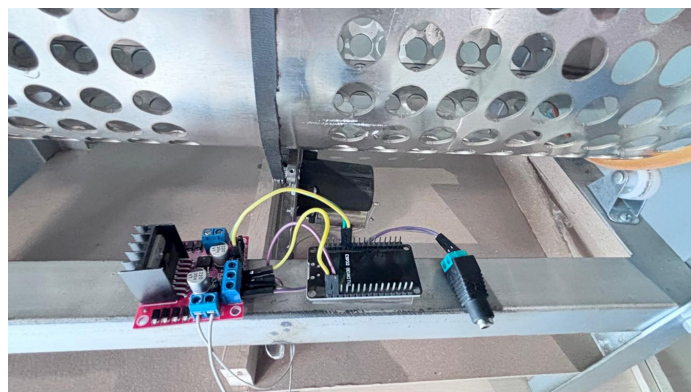


Figura 8. Sistema eléctrico del prototipo clasificador de arándanos.

Fuente: Elaboración propia.

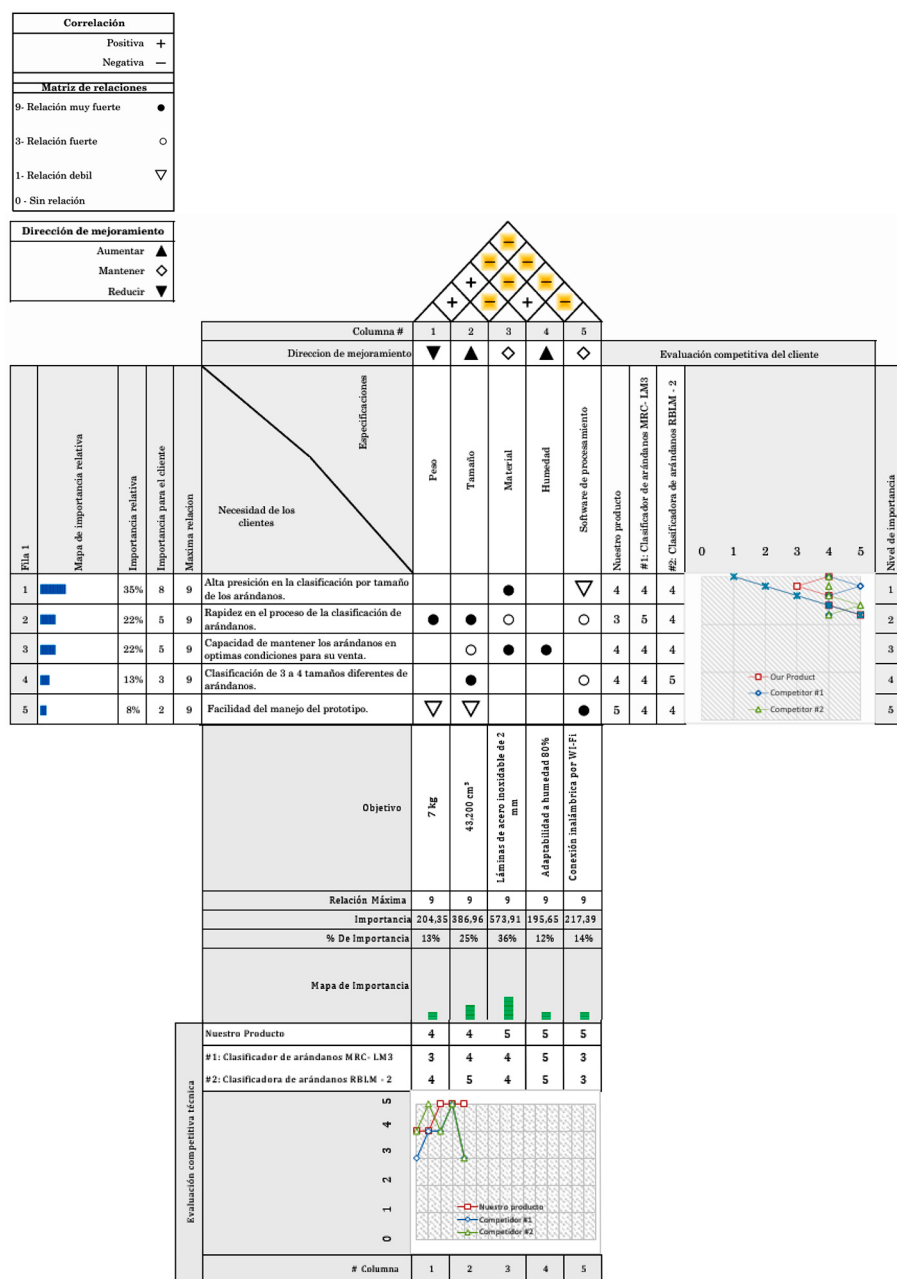


Figura 9. Casa de la calidad relacionada a los requerimientos del usuario con las características técnicas del prototipo clasificador de arándanos.

Mediante los resultados obtenidos se evidenció que, para el usuario, la alta precisión del sistema de clasificación representa un peso relativo del 35%, consolidándose como la necesidad de mayor prioridad dentro de la matriz QFD. Esta demanda

se vincula directamente con las especificaciones técnicas establecidas en la etapa de diseño. La rapidez en el proceso de clasificación, con un peso del 22%, se asocia estrechamente con parámetros críticos como la selección de materiales del equipo

y la incorporación de conectividad inalámbrica, lo que evidencia una alineación técnica coherente.

Asimismo, la capacidad del sistema para mantener los arándanos en condiciones óptimas representa otro 22% de prioridad, relacionada principalmente con el uso de materiales como el acero inoxidable para la pieza que más contacto tenía con los arándanos. Por su parte, la capacidad de clasificar los frutos según su tamaño y la facilidad de uso del sistema fueron valoradas en un 13% y 8%, respectivamente, necesidades que se abordaron mediante un diseño modular y una interfaz de usuario intuitiva. En conjunto, el prototipo respondió satisfactoriamente a los requerimientos del cliente, obteniendo una calificación global de 4,6 sobre 5,0 en la evaluación final de desempeño.

Finalmente, se realizó una prueba práctica del prototipo, lo que permitió evaluar su funcionalidad en cuanto precisión de la clasificación por tamaño y el cuidado de la calidad del producto durante el proceso, en donde se evidenció que el sistema clasifica adecuadamente los arándanos y los dirige de manera efectiva hacia su estuche correspondiente a través de las bandejas de salida, gracias a esto y a los resultados obtenidos al realizar pruebas con los 3 tamaños de arándanos (Jumbo de 16 milímetros, Primera de 12 a 15 milímetros, Segunda de 8 a 11 milímetros) se estimuló una precisión del 90% para el prototipo en cuanto a la asignación del tamaño de los frutos, lo cual demuestro que cumple con los objetivos propuestos en cuanto a eficiencia,

por lo que estos resultados constituyen una base técnica confiable para futuras implementaciones y escalabilidad industrial.

RESULTADOS

La implementación del prototipo de clasificación automatizada de arándanos permitió evidenciar mejoras sustanciales respecto al proceso manual tradicional empleado por el cultivo San Alejo. Para validar cuantitativamente estas mejoras, se compararon indicadores clave antes y después de la puesta en marcha del sistema, abarcando aspectos de productividad, precisión, eficiencia temporal y calidad del producto final. La cual puede ser evidenciada en la Tabla 2.

La media de libras clasificadas por día pasó de 47,0 lb/día en el sistema manual a 90,0 lb/día con el prototipo automatizado, lo que representa una mejora del +91,5% en capacidad operativa. Esta diferencia no solo implica un incremento significativo en el rendimiento, sino también una mayor estabilidad en los resultados, respaldada por la reducción de la varianza promedio de 8,43 a 1,20 y de la desviación estándar de 2,90 a 1,09. Estos valores reflejan una notable disminución en la dispersión de los datos y por tanto una mayor consistencia del sistema.

En cuanto a la precisión de clasificación por tamaño, el sistema automatizado alcanzó un 90%, frente al 78% obtenido de forma manual, indicando una

Tabla 2. Comparación de indicadores de eficiencia operativa, calidad del producto y dependencia del recurso humano entre la clasificación manual pre-implementación y el prototipo automatizado aplicado.

Métrica	Clasificación manual promedio preimplementación	Clasificación prototipo aplicado	% de mejora
Media de libras clasificadas por día.	47,0 lb/día	90,0 lb/día	+91,5%
Varianza promedio.	8,43	1,20 (estimada)	-85,8%
Desviación estándar promedio.	2,90	1,09 (estimada)	-62,4%
Precisión en clasificación por tamaño.	78%	90%	+15,4%
Homogeneidad del producto final.	Baja	Alta	Alta mejora cualitativa
Tiempo promedio por lote.	~45 min.	18-22 min.	-55% y -60%
Nivel de daño o pérdida del "bloom".	Alto	Bajo	Reducción significativa
Requiere operario calificado.	Si	No	-100% dependencia
Variabilidad entre operadores.	Alta	Nula	-100%

Fuente: Elaboración propia.

mejora directa del +15,4%. Esta mejora es clave para los estándares de exportación y la satisfacción del cliente final. A nivel cualitativo, también se observó una mejora en la homogeneidad del producto final, pasando de baja a alta, como resultado de la uniformidad del algoritmo y la ausencia de juicios subjetivos del operario.

Desde el punto de vista operativo, el tiempo promedio por lote de 100 frutos se redujo de 45 minutos a un rango de 18-22 minutos, lo que supone un ahorro del -55% y -60% del tiempo. Este indicador está directamente vinculado con la reducción del requerimiento de intervención humana. En la operación manual, se requería un operario calificado y existía una alta variabilidad de las libras clasificadas entre operadores. Con el prototipo, estas dependencias fueron eliminadas completamente, lo que se traduce en una reducción del 100% en la variabilidad entre operadores y una eliminación del 100% de la dependencia de mano de obra calificada.

Por otro lado, se realizó una comparación entre los tres indicadores más representativos las libras clasificadas por día, precisión (%) y tiempo por lote, en la Figura 10 se evidencia visualmente la superioridad del prototipo frente al método manual, con mejoras observadas tanto en eficiencia como en calidad del proceso.

Posterior al análisis de los indicadores globales de desempeño, se procedió a evaluar la clasificación obtenida en cada una de las categorías de fruto, con el fin de complementar el diagnóstico cuantitativo, esta segunda comparación, ilustrada en la Figura 11, permite contrastar la efectividad del sistema

automatizado frente al manual en términos de exactitud por tipo de arándano.

La Figura 10 presenta la comparación entre los resultados de clasificación manual y automatizada según la categoría del fruto: Jumbo, Primera y Segunda mientras que en la Figura 11 se discriminan las clasificaciones correctas e incorrectas, lo cual permite visualizar de forma precisa el impacto funcional del sistema desarrollado.

En la categoría Jumbo, el método manual alcanzó 120 clasificaciones correctas y 30 incorrectas, mientras que el prototipo logró mejorar el desempeño con 142 frutos correctamente clasificados y una reducción notable a solo 8 errores, representando una disminución del 73,3% en errores para esta categoría. Esta mejora puede atribuirse a la mayor sensibilidad del sistema ante los rasgos morfológicos que caracterizan a los frutos de gran tamaño, lo que valida la robustez del algoritmo entrenado.

En la categoría Primera, la clasificación manual obtuvo 125 aciertos y 25 errores, frente a los 135 aciertos y solo 15 errores alcanzados por el sistema automatizado. Esto implica una mejora del 8% en exactitud y una reducción del 40% en errores, lo cual resulta especialmente relevante dado que esta categoría representa el mayor volumen comercializado en muchos cultivos.

Por su parte, en la categoría Segunda, los resultados muestran una mejora más discreta pero consistente: de 110 clasificaciones correctas y 40 incorrectas (manual), se pasa a 131 correctas y 19 incorrectas (prototipo). La reducción del error fue del 52,5%,

Fuente: Elaboración propia.

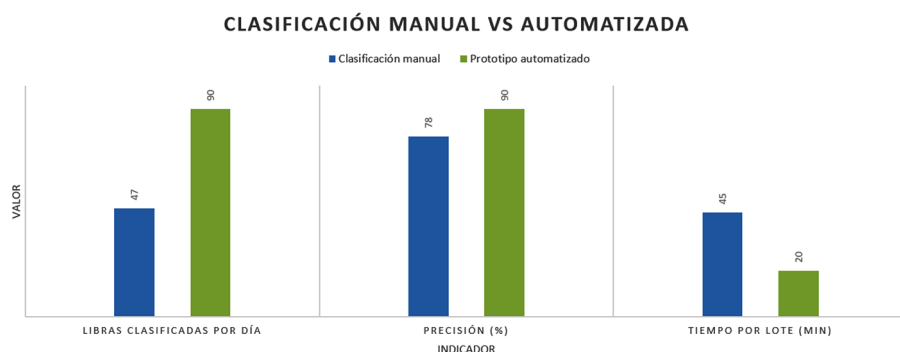


Figura 10. Clasificación manual vs automatizada.

Fuente: Elaboración propia.

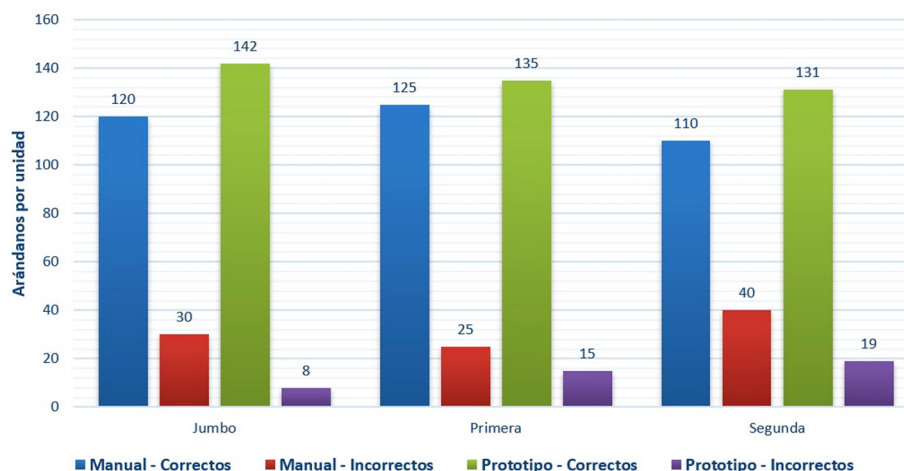


Figura 11. Comparación de clasificaciones correctas e incorrectas por categoría.

y el aumento en precisión fue de 19,1% en valores absolutos.

La validación del prototipo no se limitó a la correcta separación por tamaño, ya que, además se verificó una precisión global del 90%, superior al 78% del método manual, y una reducción del 55,8% en las clasificaciones incorrectas, lo que evidencia un comportamiento más estable del sistema, por otro lado, la capacidad operativa aumentó de 47 a 90 lb/día (+91,5%) y el tiempo de clasificación por lote se mantuvo en un rango de 18-22 minutos, demostrando un rendimiento constante bajo condiciones reales.

Adicionalmente, como criterio de éxito se definió una precisión $\geq 85\%$ y una capacidad ≥ 80 lb/día, evidenciando que ambos parámetros fueron superados por el prototipo, gracias a lo cual se confirma una validación satisfactoria, lo cual justifica la implementación de una automatización, al no solo tener implicaciones económicas como lo son un mayor valor agregado gracias a un producto correctamente clasificado, sino también operativas al asegurar la calidad homogénea de los lotes.

Por otro lado, se realizaron dos pruebas relacionadas con la calidad del fruto, en las cuales inicialmente se comparó la clasificación manual con la clasificación mediante el prototipo, además, se compara el antes de la clasificación con él después de la clasificación plenamente mecánica, tal prueba fue de carácter exploratorio, orientada a identificar posible pérdida

de bloom y variaciones en la apariencia superficial del fruto bajo ambos métodos. Las Figura 12 y Figura 13 permiten evidenciar el estado del arándano tras la manipulación, mostrando la conservación del recubrimiento ceroso natural y la integridad de la piel en los tres calibres evaluados (Segunda, Primera y Jumbo).

En la comparación entre la clasificación manual y la clasificación mecánica (Figura 12) se evidencia que los frutos procesados mediante el sistema automatizado

Fuente: Elaboración propia.



Figura 12. Clasificación manual vs clasificación mecánica del arándano.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 13. Prueba del antes y después de la clasificación mecánica del arándano.

presentan una mejor conservación de su recubrimiento ceroso y una apariencia más homogénea en cuanto a brillo y forma. En contraste, los frutos manipulados de forma manual muestran ligeras áreas opacas asociadas al contacto directo y la fricción durante el proceso de clasificación, lo cual sugiere que el sistema mecánico con tambor rotatorio reduce significativamente el desgaste del bloom por la manipulación, al mantener un flujo controlado y minimizar el contacto entre frutos, logrando una clasificación eficiente sin comprometer la calidad visual del producto.

Por otro lado, las imágenes obtenidas después del proceso de clasificación con el prototipo muestran una conservación homogénea del bloom en todos los calibres analizados, ya que no se evidencia abrasión ni pérdida visible del recubrimiento ceroso. Al comparar ambos métodos, se observó que la clasificación manual presentó una pérdida aproximada del 15% del bloom atribuida al contacto físico directo y la fricción durante la manipulación, mientras que el prototipo registró una pérdida inferior al 5%, evidenciando un roce mínimo entre frutos, lo cual muestra que el prototipo mantiene más del 95% de la superficie intacta, lo cual es coherente con lo reportado por otros autores, quienes señalan que la presencia de la bloom influye directamente en la aceptación sensorial y en la intención de compra del consumidor de arándanos [12], confirmando su eficacia en la conservación de la calidad del fruto,

además de mejorar la eficiencia operativa frente al método manual tradicional.

Tales resultados reflejan que el sistema de tambor rotatorio y la velocidad controlada de 15 rpm generan un desplazamiento suave por gravedad que minimiza la manipulación del arándano, preservando su apariencia y textura superficial, a diferencia del proceso de clasificación manual, donde el fruto es tomado, inspeccionado y depositado en el estuche, el prototipo automatizado dirige cada arándano directamente hacia su empaque final mediante las rampas de salida, eliminando así dos etapas de contacto físico, lo cual reduce directamente la pérdida de bloom.

En consecuencia, los frutos clasificados por el prototipo mantienen una apariencia más homogénea, con recubrimiento ceroso continuo y sin signos de deterioro. Estos resultados respaldan la funcionalidad del diseño en términos de control de velocidad, forma de tambor y tamaño de perforaciones, demostrando que el equipo permite una manipulación controlada y cuidadosa del producto.

Teniendo esto en cuenta, los resultados obtenidos demuestran que la implementación del prototipo automatizado de clasificación de arándanos supera de manera contundente al proceso manual tradicional, tanto en términos cuantitativos como cualitativos. Las mejoras observadas en la precisión por categoría, la reducción del error, el aumento de productividad y la homogeneización del producto final reflejan el alto grado de confiabilidad y eficiencia del sistema desarrollado. La reducción global del 55,8% en errores de clasificación y el incremento del 91,5% en la capacidad diaria de procesamiento representan avances significativos que impactan directamente en la eficiencia operativa y la calidad poscosecha del fruto.

Estos hallazgos validan no sólo la viabilidad técnica del prototipo, sino también su alineación con las prioridades del usuario establecidas mediante la metodología QFD, posicionando al sistema como una alternativa escalable, replicable y con alto potencial de transferencia tecnológica en el sector agroindustrial.

DISCUSIÓN

El desarrollo del prototipo clasificador de arándanos constituye un avance relevante en la incorporación de

tecnologías digitales al sector agrícola colombiano, particularmente en contextos de producción a pequeña escala. En estudios como el de Liu, Zhang, Du, Ren, Huang y Chai [10], se emplean sistemas de visión artificial para la clasificación de frutos, los cuales alcanzan altos niveles de precisión, aunque implican costos elevados de inversión, capacitación y mantenimiento. En contraste, la propuesta presentada en este trabajo se orienta hacia microproductores rurales, priorizando un diseño mecánico de bajo costo complementado con control mediante tecnología IoT, que permite automatizar el proceso de clasificación por tamaño de manera accesible. Este enfoque busca equilibrar eficiencia, simplicidad operativa y sostenibilidad económica [12].

En este sentido, uno de los principales aportes del proyecto es su enfoque de apropiación tecnológica contextualizada. A diferencia de sistemas industriales robustos que requieren inversiones elevadas y personal altamente capacitado, el prototipo desarrollado destaca por su simplicidad operativa, bajo requerimiento de mantenimiento y facilidad de uso, por lo tanto, esta aproximación lo convierte en una solución accesible para pequeños y medianos productores, promoviendo la democratización de la tecnología agrícola.

El diseño modular y funcional del prototipo también representa una oportunidad para futuras mejoras. Aunque la clasificación actual se centra exclusivamente en el tamaño del fruto, el sistema podría evolucionar hacia una clasificación multivariable, integrando análisis de color o madurez fenológica, lo cual ampliaría su utilidad en diferentes etapas del proceso agrícola y diversificaría su aplicación comercial [5].

Adicionalmente, la posibilidad de integrar el prototipo con plataformas de monitoreo remoto o análisis de datos abre un camino hacia la digitalización progresiva de los cultivos, facilitando la toma de decisiones en tiempo real y el seguimiento continuo del desempeño operativo. La validación práctica del prototipo mostró resultados satisfactorios, con un desempeño del 90% en precisión de clasificación, lo que respalda su viabilidad técnica y funcional para su implementación en condiciones reales de campo. En conjunto, estos resultados no solo confirman la efectividad de la propuesta tecnológica, sino que

también evidencian su potencial como herramienta de transición hacia modelos agrícolas más inteligentes, sostenibles y adaptados a las realidades del productor colombiano.

CONCLUSIONES

La implementación del prototipo automatizado para la clasificación de arándanos en el cultivo San Alejo demostró ser una solución técnica efectiva frente a las limitaciones del proceso manual, evidenciando mejoras significativas en precisión, eficiencia y homogeneidad del producto final. La capacidad operativa diaria pasó de 47 a 90 libras, representando un incremento del 91,5%, mientras que la precisión en la clasificación por tamaño aumentó del 78% al 90%, lo que supone una mejora directa del 15,4%. Asimismo, la desviación estándar se redujo de 2,90 a 1,09, lo cual refleja una mejora del 62,4% en consistencia operativa.

En términos de eficiencia temporal, el tiempo de procesamiento por lote de 100 frutos disminuyó de 45 minutos a un promedio de 20 minutos, generando un ahorro de hasta 55,5% en tiempo. Esta ganancia operativa, sumada a la eliminación total de la dependencia de mano de obra calificada (reducción del 100% en variabilidad entre operarios), evidencia una optimización integral del proceso. Además, el total de errores en la clasificación de los frutos se redujo de 95 a 42, lo que equivale a una disminución del 55,8% en errores de clasificación por tamaño, destacando el impacto del sistema en la calidad final del producto.

La validación por categorías también arrojó resultados positivos: en la categoría Jumbo, los errores disminuyeron un 73,3%; en Primera, un 40%; y en Segunda, un 52,5%, consolidando al sistema como una alternativa robusta en todos los tamaños comercializados en el cultivo San Alejo. Estas mejoras están directamente alineadas con los requerimientos definidos en la matriz QFD, destacando la precisión (35%) y la rapidez (22%) como factores críticos satisfechos.

Se recomienda continuar con el proceso de mejora del prototipo mediante la incorporación de técnicas de visión artificial que permitan clasificar no solo por tamaño, sino también por grado de madurez, empleando algoritmos de aprendizaje profundo

ampliando las capacidades del sistema hacia una agricultura más inteligente y conectada, enfocando el estudio a empresas de mayor magnitud [13].

Desde una perspectiva de impacto, este prototipo se perfila como una herramienta tecnológica replicable en otros cultivos de alta rotación, contribuyendo a la reducción de la brecha tecnológica en el sector agroindustrial colombiano. Su bajo costo, facilidad de operación y alta eficiencia lo convierten en una solución viable para pequeños productores, con potencial de escalabilidad e integración en cadenas productivas que exijan estandarización y calidad. Futuros estudios podrán enfocarse en evaluar su desempeño en condiciones climáticas variables, con diferentes variedades de arándano y en procesos de comercialización internacional según clasificación por tamaños diferentes a los evaluados durante este estudio.

REFERENCIAS

- [1] J.F. Castañeda Bustos and J.C. Preciado, "Phenological states classification of blueberries using artificial intelligence," in *2025 IEEE Conference on Artificial Intelligence (CAI)*, Santa Clara, CA, USA, 2025, pp. 390-393, doi: 10.1109/CAI64502.2025.00071.
- [2] H.V. Morales Villegas, L.P. Casa Chacha, D.A. Villacís Jerez, K.A. Chamorro Andrade y S.E. Toapanta Minta, "Diseño y construcción de un prototipo automatizado para la clasificación de uvas según su color", *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 8, no. 4, pp. 8607-8619, 2024, doi: 10.37811/cl_rcm.v8i4.13019.
- [3] K. Bavithra, R. Latha, R. Mithra, C. Pooja, and C.R. Sasmitha, and L. Vishnupriya, "Precision harvesting: utilizing inception neural networks in robotic arms for fruit sorting," in *2025 International Conference on Computational Innovations and Engineering Sustainability (ICCIES)*, Coimbatore, Tamilnadu, India, Abr. 24-26, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCIES63851.2025.11032682.
- [4] J.E. Martínez Baquero, A.M. Idrobo Yunda, S. Ríos Rico y J.J. Piñeros Calderón, "Diseño e implementación IoT para temperatura en un proceso de aclimatación de semilla de palma", *Revista Ingeniería, Matemáticas y Ciencias de la Información*, vol. 12, no. 23, pp. 13-24, 2025, doi: 10.21017/rimci.1103.
- [5] D. Krklješ *et al.*, "Agrobot Gari, a multimodal robotic solution for blueberry production automation," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 237, Art. no. 110626, 2025, doi: 10.1016/j.compag.2025.110626.
- [6] E. Westerweele, "What are the powerful benefits of AI for your blueberry grading?," *Ellips. insights.ellips.com*. Accessed: Jul. 31, 2025. [Online]. Available: <https://insights.ellips.com/blogs/blueberry-grading-artificial-intelligence>
- [7] H.X. Huynh, B.H. Lam, H.V.C. Le, T.T. Le, and N. Duong-Trung, "Design of an IoT ultrasonic-vision based system for automatic fruit sorting utilizing size and color," *Internet of Things*, vol. 25, Art.no. 101017, 2024, doi: 10.1016/j.iot.2023.101017.
- [8] F. Peña Baracaldo, D.R. Africano Franco y C.A. Moreno-Ortiz, "Cost analysis of a blueberry producing farm in the Cundiboyacense highlands, Colombia: A case study", *Agronomía Colombiana*, vol. 41, no. 2, pp. 1-11, 2023, doi: 10.15446/agron.colomb.v41n2.103525.
- [9] J. Liao, Z. Wu, M. Wu, Y. Wu, and M. Zhong, "Flexible shelling of Camellia oleifera fruits based on cracking treatment: key components design and mechanism," *Journal of Food Process Engineering*, vol. 48, no.7, Art. no. e70190, 2025, doi: 10.1111/jfpe.70190.
- [10] F. Liu, Y. Zhang, C. Du, X. Ren, B. Huang, and X. Chai, "Design and experimentation of a machine vision-based cucumber quality grader," *Foods*, vol. 13, no. 4, Art.no. 606, 2024, doi: 10.3390/foods13040606.
- [11] M. Ayyıldız, Y.K. Çiftçi, K. Kilecioğlu, and Ö. F. Arslan "Fruit Sorting Automation; Cartesian Robot and Conveyor Design," *Düzce University Journal of Science & Technology*, vol. 12, no. 3, 1627-1639, 2024, doi: 10.29130/dubited.1400615.
- [12] C.M. Asensio, M.L. Arpaia, and D. Obenland, "The role of fruit surface bloom in consumer preference for blueberries: sensory evaluation and multisensory interactions," *Foods*, vol. 14, no. 3, Art. no. 455, 2025, doi: 10.3390/foods14030455.
- [13] M. Krstić, G.P. Agnusdei, S. Tadić, and P.P. Miglietta, "Prioritization of the drivers of electronic traceability in agri-food supply

- chains,” *Agricultural and Food Economics*, vol. 11, Art. no. 42, 2023, doi: 10.1186/s40100-023-00284-5.
- [14] M.W. Amna, G. Li, M.Z. Akram, M. Faheem, M.M. Omar, and M.G. Hassan, “Machine vision-based automatic fruit quality detection and grading,” *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, vol. 12, no. 2, pp. 274-287, 2023, doi: 10.15302/J-FASE-2023532.