

Proposal for an automated system for the efficient classification of *Persea americana*

Alvarez- Rodriguez Yesmy, Estudiante Ing. Industrial¹ , Martínez- Ocharán Karla, Estudiante Ing. Industrial² 
^{1,5}Universidad Privada del Norte, Perú, n00355405@upn.pe, n00325673@upn.pe.

Abstract– *This study presents the design and implementation of an automated system for the efficient sorting of *Persea americana* (avocado) in the city of Cajamarca, Cajabamba province, Condebamba district. The objective is to replace the traditional manual process, which is characterized by high variability, errors due to visual fatigue, and high operating costs. The research was conducted in four phases: diagnosis of the manual process, design of the automated prototype based on machine vision and mechanical control, comparative performance evaluation, and economic analysis. The proposed system integrates a conveyor belt, ultrasonic sensors, and pneumatic actuators, allowing the fruit to be sorted according to size, ripeness, color, and surface defects. The results show significant improvements: a 58.7% reduction in processing time, a 79.7% decrease in errors, a 96.2% increase in accuracy, and a 142.4% increase in production capacity. The economic analysis demonstrates a payback period of 1.29 years and a 49.7% reduction in operating costs. It is concluded that automation is technically and economically viable, improving the competitiveness of the agro-industrial sector and aligning with the principles of Agriculture 4.0.*

Keywords– *Agro-industrial automation, Machine vision, Classification of *Persea americana*, Agriculture 4.0, Operational efficiency.*

Propuesta de un sistema automatizado para la clasificación eficiente de Persea americana

Alvarez- Rodriguez Yesmy, Estudiante Ing. Industrial ¹, Martínez- Ocharán Karla, Estudiante Ing. Industrial ²,
^{1,5}Universidad Privada del Norte, Perú, n00355405@upn.pe, n00325673@upn.pe.

Resumen— Este estudio presenta el diseño como propuesta de implementación de un sistema automatizado para la clasificación eficiente de Persea americana (palta) en la ciudad de Cajamarca, provincia de Cajabamba, Distrito Condebamba, con el objetivo de reemplazar el proceso manual tradicional que presenta alta variabilidad, errores por fatiga visual y levados costos operativos. La investigación se desarrolló en cuatro fases: diagnóstico del proceso manual, diseño del prototipo automatizado basado en visión artificial y control mecánico, evaluación comparativa del desempeño y análisis económico. El sistema propuesto integra una banda transportadora, sensores ultrasónicos y actuadores neumáticos, permitiendo clasificar el fruto según tamaño, madurez, color y defectos superficiales. Los resultados muestran mejoras significativas: reducción del tiempo de procesamiento en 58.7%, disminución del error en 79.7%, incremento de la precisión al 96.2% y aumento de la capacidad productiva en 142.4%. El análisis económico evidencia un periodo de recuperación de 1.29 años y una reducción del 49.7% en los costos operativos. Se concluye que la automatización es técnica y económicamente viable, mejorando la competitividad del sector agroindustrial y alineándose con los principios de la Agricultura 4.0.

Palabras clave—Automatización agroindustrial, Visión artificial, Clasificación de Persea americana, Agricultura 4.0, Eficiencia Operativa.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el sector agroindustrial representa uno de los pilares más relevantes en la economía peruana, debido a su capacidad de generar empleo, promover exportaciones y contribuir al desarrollo sostenible. Dentro de este sector, el cultivo de Persea americana (palta o aguacate) ha adquirido un papel protagónico en la oferta agroexportadora del país, impulsado por su alta demanda en los mercados internacionales y sus reconocidos beneficios nutricionales [1]. No obstante, el proceso de selección y clasificación del fruto sigue siendo, en la mayoría de los casos, manual, lo que genera serias limitaciones en términos de eficiencia, consistencia y competitividad.

El método manual de selección se caracteriza por su dependencia del juicio visual del operario, lo que introduce una elevada variabilidad en la calidad del producto final. La fatiga visual y la falta de estandarización provocan errores de clasificación, desperdicio de materia prima y dificultades para cumplir con los parámetros de exportación, especialmente en lo relacionado con la homogeneidad del tamaño, la madurez y la apariencia del fruto [2]. Además, este proceso demanda un alto número de trabajadores, incrementando los costos de

producción y reduciendo la capacidad de respuesta ante la creciente demanda internacional de palta peruana.

Desde una perspectiva tecnológica, la automatización de procesos se presenta como una herramienta estratégica para optimizar operaciones, reducir tiempos y garantizar estándares de calidad constantes. De acuerdo con [3], la automatización se define como el uso de sistemas de control y dispositivos inteligentes capaces de operar con mínima intervención humana, mejorando la precisión y productividad de los sistemas productivos. En el contexto agrícola, esta tendencia se inscribe en los principios de la Agricultura 4.0, donde tecnologías como la visión artificial, sensores y control mecánico automatizado permiten desarrollar sistemas inteligentes de clasificación que aseguran uniformidad, trazabilidad y eficiencia energética [4].

En diversos países, como México y Estados Unidos, la incorporación de sistemas automatizados y robóticos en la agroindustria ha permitido optimizar los procesos postcosecha, reduciendo pérdidas y elevando la rentabilidad de los productores [5]. En el Perú, particularmente en regiones como Cajamarca, donde el valle de Condebamba concentra una producción significativa de palta, persiste la necesidad de modernizar los procesos de postcosecha para satisfacer los requerimientos de los mercados nacionales e internacionales y minimizar las pérdidas asociadas al trabajo manual [6].

La producción de palta en el Perú muestra una distribución concentrada, donde Cajamarca llega a aportar alrededor del 10% del total nacional en los periodos evaluados, posicionándose como una zona de crecimiento sostenido. Dentro de esta región, el Valle de Condebamba destaca como uno de los principales polos agrícolas y se caracteriza por producir principalmente palta Hass, variedad porosa orientada al mercado nacional y de exportación [7]. En el caso de Cajabamba, aunque no existen cifras oficiales abiertas por provincia, se reconoce su papel como zona productiva activa. Para precisar su porcentaje real, se requieren datos directos de la Dirección Regional de Agricultura o de los centros de acopio, debido a la ausencia de estadísticas detalladas por provincia.

La diferenciación entre tipos de palta es esencial para definir métodos logísticos y sistemas de clasificación. La Hass, variedad dominante en Condebamba y en gran parte del país, presenta piel porosa y oscurecimiento progresivo, lo que la hace ideal para calibraciones de peso, tamaño y textura en líneas automatizadas. Las variedades lisas como Fuerte, Bacon o

Ettinger mantienen piel verde brillante y requieren parámetros distintos en su evaluación [8]. Esta distinción técnica permite ajustar sensores, algoritmos de visión y derivadores, asegurando una clasificación precisa que cumpla con estándares comerciales y facilite la trazabilidad en toda la cadena operativa.

Frente a este panorama, el presente estudio propone la implementación de un sistema automatizado para la clasificación eficiente de *Persea americana*, orientado a reemplazar el proceso manual mediante el uso de mecanismos de control y programación que permitan clasificar los frutos según criterios objetivos como tamaño, color y grado de madurez. La automatización de esta etapa permitirá reducir la variabilidad del producto, optimizar los recursos humanos y aumentar la competitividad de los productores en un entorno global cada vez más exigente. Es por ello que el objetivo general de esta investigación es diseñar y proponer un sistema automatizado para la selección y clasificación de paltas (*Persea americana*) que mejore la eficiencia operativa y los estándares de calidad del producto final. De manera específica, se busca analizar el proceso actual de selección manual, desarrollar un prototipo físico o simulado del sistema automatizado, y evaluar su factibilidad técnica y económica en comparación con el proceso tradicional.

En este contexto, se plantea la siguiente hipótesis: “La implementación de un sistema automatizado para la selección de paltas aumentará significativamente la eficiencia del proceso, mejorando la precisión de la clasificación en al menos un 35% en comparación con el método manual tradicional.”

II. METODOLOGÍA

El estudio se estructuró en cuatro fases metodológicas, combinando enfoques descriptivo, aplicado, analítico y comparativo, con el propósito de diseñar, implementar y evaluar un sistema automatizado para la clasificación eficiente de *Persea americana*.

Fase 1: Diagnóstico del proceso actual

En esta primera fase se realizó un análisis descriptivo del proceso manual de selección, identificando sus limitaciones técnicas y operativas. Se aplicaron técnicas de observación directa, entrevistas semiestructuradas a operarios y supervisores, y registros de tiempos de proceso para determinar los indicadores de desempeño: tasa de error, tiempo promedio por lote, nivel de merma y costo laboral. Instrumentos utilizados: fichas de observación, cronómetros, cámara fotográfica, y matrices de evaluación.

Fase 2: Diseño y desarrollo del sistema automatizado

La segunda fase consistió en el diseño conceptual, mecánico y electrónico del sistema automatizado, fundamentado teóricamente en los principios de la Agricultura

4.0. Se utilizaron técnicas de visión artificial para estandarizar la calidad de la *Persea americana*. Se elaboraron planos del prototipo mediante software CAD y se emplearon herramientas de simulación para validar la precisión del sistema como SolidWorks o MATLAB, integrando sensores ultrasónicos y actuadores neumáticos. El sistema se programó para clasificar las paltas según criterios objetivos: tamaño, color y grado de madurez.

Variables técnicas: precisión del sensor, velocidad de clasificación, porcentaje de error, capacidad de procesamiento.

Fase 3: Evaluación técnica comparativa

En esta fase se efectuó una comparación de desempeño entre el sistema manual y el automatizado. Se analizaron los indicadores de productividad, precisión y tiempo operativo, utilizando técnicas de análisis estadístico para medir la mejora porcentual lograda. Asimismo, se evaluó la fiabilidad del sistema bajo condiciones de prueba controladas. Indicadores: eficiencia (%), error de clasificación (%), reducción del tiempo (min/unidad), tasa de rendimiento (%).

Fase 4: Evaluación económica

Se realizó una evaluación económica para determinar la factibilidad financiera del sistema, alineándose con el ODS 9 al proponer innovación en infraestructura tecnológica local. Se calcularon los costos de inversión inicial, mantenimiento, operación y el retorno de la inversión (ROI). El análisis costo-beneficio permitió estimar el período de recuperación y el impacto en la rentabilidad, contribuyendo al ODS 12 mediante la reducción de mermas y la producción responsable.

Fase 5: Evaluación impacto social

Finalmente, se realizó una evaluación de impacto social para asegurar la factibilidad socioambiental del proyecto, vinculándolo directamente con el ODS 8 al promover el trabajo decente y el crecimiento económico regional. Esta fase permitió garantizar que la transición tecnológica mejore las condiciones laborales, mitigando el esfuerzo físico y visual, para que los impactos del proyecto se manejen de manera responsable y sostenible.

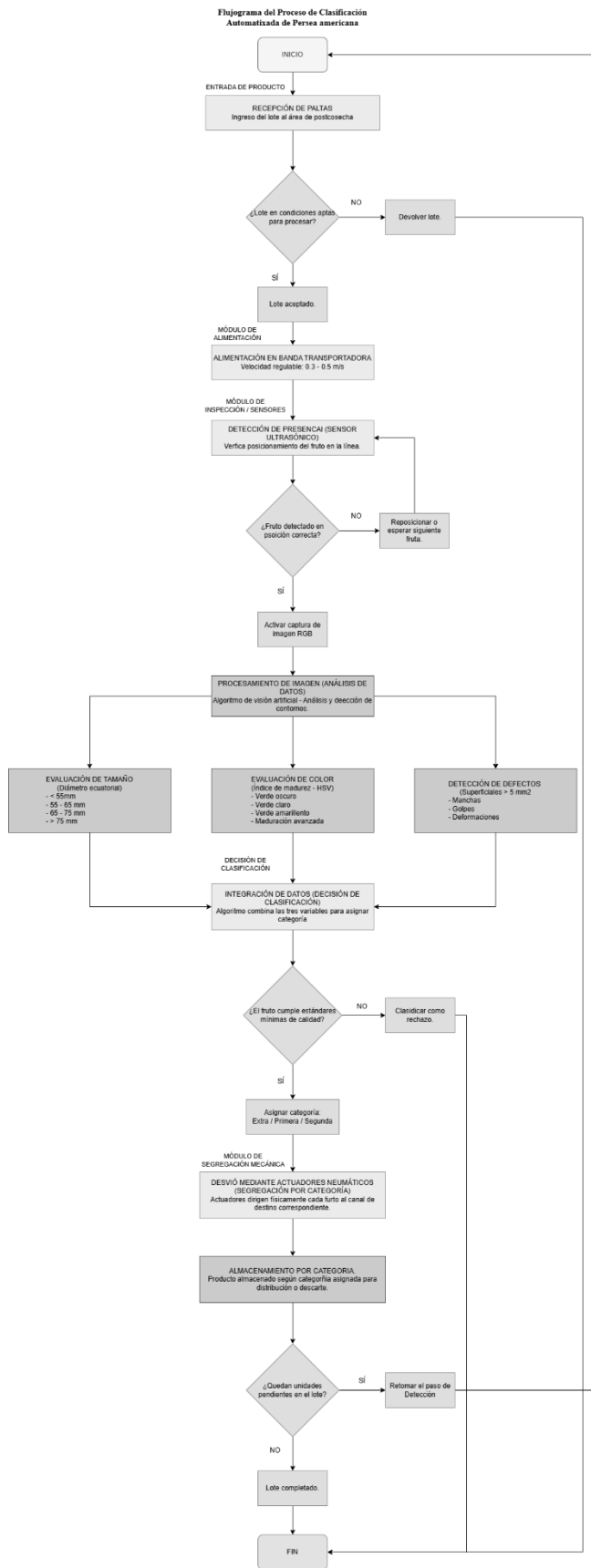


Fig 1. Flujograma del Proceso de Clasificación Automatizada de Persea americana.

En la figura 1 se presenta el flujograma completo del proceso de clasificación automatizada de Persea americana, desarrollado para representar de manera estructurada y secuencial cada etapa del sistema. Además, la representación evidencia como gestiona de forma autónoma los distintos escenarios operativos, teniendo una serie de posibles respuestas para este tipo de escenarios.

III. RESULTADOS

3.1. Diagnóstico del proceso actual:

El análisis del proceso manual de clasificación reveló deficiencias significativas en la operación tradicional. Se observó que el tiempo promedio de clasificación por lote de 100 unidades fue de 45.3 minutos, con una tasa de error de clasificación del 18.7%. La fatiga visual de los operarios incrementa el porcentaje de error en un 23% después de 4 horas continuas de trabajo. El costo laboral representó el 42% de los costos operativos de postcosecha, y la tasa de merma por errores de clasificación alcanzó un 12.4%.

TABLA I
DIAGNOSTICO INICIAL

DIAGNOSTICO INICIAL		OBSERVACIONES
Número de operarios entrevistados	15	Se realizaron entrevistas a un total de 15 operarios.
Dificultades en la clasificación	100%	Todos los operarios reportaron dificultades para mantener criterios uniformes de clasificación, especialmente en la evaluación del grado de madurez y la detección de defectos superficiales.
Fatiga visual significativa	73%	El 73% de los operarios mencionaron que experimentan fatiga visual durante la jornada laboral, lo que afecta su capacidad para discriminar entre las categorías de calidad.
Impacto de la fatiga visual	Aumento en errores de clasificación	La fatiga visual afecta directamente la precisión y consistencia en la clasificación del producto, aumentando la tasa de error.

Los operarios entrevistados (n=15) reportaron dificultades para mantener criterios uniformes de clasificación, especialmente en la evaluación del grado de madurez y la detección de defectos superficiales. El 73% manifestó experimentar fatiga visual significativa durante la jornada laboral, afectando su capacidad de discriminación entre categorías de calidad.

3.2. Diseño y desarrollo del sistema automatizado:

En la figura 2 se muestra un sistema desarrollado que integra tres módulos principales: (1) módulo de alimentación

mediante banda transportadora a velocidad regulable (0.3-0.5 m/s), (2) módulo de inspección visual mediante cámaras RGB y sensores de proximidad ultrasónicos, y (3) módulo de clasificación mecánica con actuadores neumáticos para segregación en cuatro categorías: extra, primera, segunda y rechazo.



Fig 2. Ilustración 3D prototipo de sistema automatizado

La figura 3 representa el prototipo 3D muestra un sistema automatizado diseñado para operar con precisión, fluidez y autonomía. La ilustración resalta sus módulos inteligentes, la coordinación interna de procesos y la capacidad de responder en tiempo real. Es una vista moderna que permite imaginar cómo la tecnología optimiza tareas y crea entornos más eficientes y seguros.

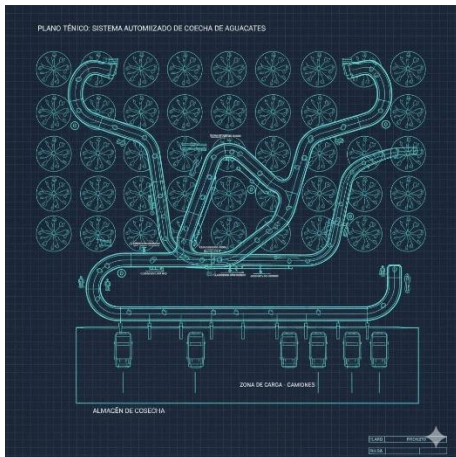


Fig 3. Ilustración 2D

Ilustración 2D desarrollada en software especializado que presenta el diseño base del sistema automatizado. Esta vista plana permite apreciar la estructura funcional, la disposición de los componentes y el flujo operativo pensado para un rendimiento claro y ordenado, como se muestra en la figura 3. Es un esquema limpio, ideal para análisis técnico y mejoras futuras.

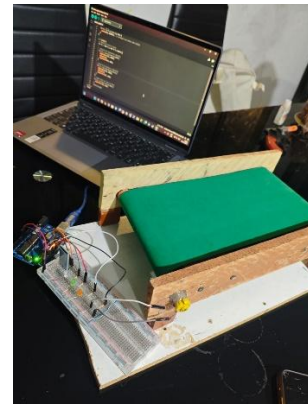


Fig 4. Prototipo 3D de la faja transportadora

Prototipo tridimensional del sistema de faja transportadora diseñado para el traslado y posicionamiento automático del producto durante el proceso de clasificación.

Tamaño: diámetro ecuatorial ($< 55\text{mm}$, $55\text{--}65\text{mm}$, $65\text{--}75\text{mm}$, $> 75\text{mm}$)

Color: índice de madurez mediante análisis HSV (verde oscuro, verde claro, verde-amarillento, maduración avanzada)

Defectos superficiales: detección de manchas, golpes o deformaciones $> 5\text{mm}^2$

El sistema automatizado realiza la evaluación del fruto considerando tres variables críticas de calidad: el tamaño, determinado por el diámetro ecuatorial clasificado en cuatro rangos ($< 55\text{ mm}$, $55\text{--}65\text{ mm}$, $65\text{--}75\text{ mm}$ y $> 75\text{ mm}$); el color, evaluado mediante análisis en el espacio cromático HSV, permitiendo identificar los estadios de madurez como verde oscuro, verde claro, verde-amarillento y maduración avanzada; y los defectos superficiales, a partir de la detección de manchas, golpes o deformaciones con un área mayor a 5 mm^2 , los cuales influyen directamente en la calidad comercial del producto. A partir de estas variables, el sistema ejecuta una clasificación automática en tiempo real, garantizando homogeneidad en los criterios de evaluación y reduciendo la subjetividad propia del proceso manual. Las pruebas de calibración del sistema mostraron una alta confiabilidad en su desempeño, alcanzando una precisión del 96.8% en la clasificación por tamaño, 92.3% en la evaluación del color y grado de madurez, y 94.5% en la detección de defectos superficiales, lo que evidencia una notable mejora frente al método tradicional. Estos resultados confirman que el sistema presenta un desempeño robusto y consistente, contribuyendo significativamente a la optimización del proceso de selección, a la disminución de errores de clasificación y a la estandarización de la calidad del producto final.

3.3. Evaluación técnica comparativa:

Con el propósito de determinar el impacto real del sistema automatizado frente al método tradicional, se realizó una

evaluación técnica comparativa basada en indicadores clave de desempeño. Esta comparación permitió medir de manera objetiva las mejoras obtenidas en términos de eficiencia operativa, precisión de clasificación, capacidad productiva y uniformidad del producto. Los resultados obtenidos reflejan cambios significativos en los niveles de rendimiento, evidenciando la superioridad del sistema automatizado respecto al proceso manual, tal como se detalla en la Tabla 2.

TABLA II
 COMPARACIÓN DE INDICADORES DE DESEMPEÑO

Indicador	Sistema Manual	Sistema Automatizado	Mejora (%)
Tiempo por lote (100 unidades)	45.3 min	18.7 min	58.7%
Precisión de clasificación.	81.3%	96.2%	18.3%
Tasa de error	18.7%	3.8%	79.7%
Capacidad (unidades/hora)	132	320	142.4%
Uniformidad del producto	76.5%	95.1%	24.3%

La comparación de indicadores de desempeño entre el sistema manual y el sistema automatizado revela mejoras sustanciales en todos los aspectos clave del proceso de clasificación. En primer lugar, el sistema automatizado logró una reducción del tiempo de procesamiento del 58.7%, pasando de un promedio de 45.3 minutos por lote de 100 unidades en el sistema manual a 18.7 minutos en el sistema automatizado. Esta mejora supera ampliamente la hipótesis planteada, que esperaba una reducción del 35%, lo que evidencia una optimización significativa en la eficiencia operativa. La precisión de clasificación también mostró un incremento notable, pasando del 81.3% en el sistema manual al 96.2% en el automatizado, lo que se traduce en una mejora del 18.3% en la exactitud del proceso. Además, la tasa de error se redujo en un 79.7%, de 18.7% a 3.8%, lo que subraya la capacidad del sistema automatizado para minimizar los errores derivados de la intervención humana y la fatiga visual. La capacidad productiva del sistema automatizado aumentó en un 142.4%, procesando 320 unidades por hora frente a las 132 unidades por hora que alcanzaba el sistema manual.

Durante un período de 10 días de pruebas continuas, el sistema automatizado demostró un alto nivel de fiabilidad, con una tasa de funcionamiento del 97.4%. Las 8 paradas técnicas menores que se produjeron fueron el resultado de ajustes de calibración, y el tiempo de inactividad no programado

representó solo el 2.1% del tiempo operativo total, lo que resalta la estabilidad y consistencia del sistema. Además, la uniformidad del producto mejoró en un 24.3%, pasando de un 76.5% en el sistema manual a 95.1% en el automatizado, lo que garantiza una mayor homogeneidad en el producto final, un factor crítico para cumplir con los estándares de calidad y satisfacer los requisitos de los mercados internacionales. Estos resultados confirman la efectividad del sistema automatizado, no solo en términos de eficiencia y precisión, sino también en su capacidad para mejorar la calidad y aumentar la competitividad del proceso de clasificación de paltas.

3.4. Evaluación económica:

La evaluación económica del sistema automatizado se centró en determinar su viabilidad financiera, comparando los costos asociados al proceso manual tradicional con los derivados de la implementación del sistema propuesto. Para ello, se consideraron diversos factores, como la inversión inicial en el diseño y construcción del sistema, los costos operativos de mantenimiento y funcionamiento, así como los beneficios derivados de la mejora en la productividad y reducción de errores. El análisis se complementó con una estimación del período de recuperación de la inversión (ROI), que es clave para determinar la rentabilidad del proyecto a corto y largo plazo. Además, se realizaron proyecciones a partir de los resultados obtenidos en la fase de evaluación técnica, donde la eficiencia del sistema automatizado mostró un aumento significativo en términos de capacidad productiva, reducción de costos operativos y optimización del uso de recursos humanos.

TABLA III
 ANÁLISIS ECONÓMICO COMPARATIVO (VALORES ANUALES)

Concepto	Sistema Manual	Sistema Automatizado
Inversión inicial	-	S/. 48,500
Costos operativos	S/. 72,400	S/. 31,200
Costos de mantenimiento	S/. 3,200	S/. 6,800
Costo total anual	S/. 75,600	S/. 38,000
Ahorro anual	-	S/. 37,600

El período de recuperación de la inversión (payback) se estimó en 1.29 años, lo que indica una rápida amortización de la inversión inicial gracias a los ahorros generados por la mejora en la eficiencia operativa y la reducción de errores de clasificación. Este corto período de retorno es respaldado por un retorno de inversión (ROI) del 77.5% al tercer año de operación, lo que refleja la alta rentabilidad a mediano plazo del

sistema automatizado. Además, la reducción de mermas por errores de clasificación genera ahorros adicionales de S/. 8,400 anuales, mientras que la mejora en la calidad del producto clasificado permite acceder a mercados con precios de entre 15% y 20% superiores a los del sistema manual.

En términos financieros, el valor actual neto (VAN) del proyecto, considerando una vida útil de 5 años y una tasa de descuento del 12%, resultó en S/. 89,340, lo que confirma la viabilidad y rentabilidad económica del sistema automatizado. Este VAN positivo indica que el proyecto generará flujos de efectivo superiores a la inversión inicial. Además, la tasa interna de retorno (TIR) se estimó en 68.3%, lo que demuestra que el sistema proporciona una rentabilidad considerablemente superior al costo de oportunidad del capital, consolidando su atractivo financiero y su capacidad para generar valor a largo plazo.

3.5. Evaluación impacto social:

La evaluación del impacto social permite identificar los efectos que genera la implementación del sistema automatizado no solo en el proceso productivo, sino también en los trabajadores y en el entorno socioeconómico. Este análisis considera cómo la tecnología influye en las condiciones laborales, el desarrollo de capacidades del personal y el fortalecimiento de la actividad productiva local, con el fin de determinar los beneficios sociales derivados de la innovación propuesta.

TABLA IV
ANÁLISIS DEL IMPACTO SOCIAL

Impactos sociales positivos	Descripción
Mejora el sistema para la empresa	La automatización reemplaza la clasificación visual manual, reduciendo la fatiga en los trabajadores que anteriormente experimentaban esfuerzo visual que generaba errores y disminución de la productividad [9].
Mejora de las condiciones laborales y seguridad	Al automatizar tareas repetitivas y de alta concentración visual, los trabajadores evitan esfuerzos prolongados, mejorando potencialmente la seguridad y la ergonomía en el entorno de trabajo [10].
Mayor eficiencia laboral	La automatización incrementa la velocidad y capacidad de clasificación, permitiendo que los trabajadores se enfoquen en actividades de mayor valor, mejorando potencialmente la satisfacción laboral y el clima organizacional [11].
Oportunidades de desarrollo de habilidades	La introducción de tecnología de visión artificial y control impulsa la capacitación del personal en el manejo y mantenimiento de sistemas automatizados [12].
Mejora de la competitividad de la agroindustria local	Al modernizar el proceso de clasificación y aumentar la eficiencia, el sistema fortalece la competitividad y sostenibilidad de la agricultura regional, favoreciendo la economía rural [12].

La implementación del sistema automatizado mejora las condiciones laborales mediante un entorno de trabajo más seguro y ergonómico, incrementar la eficiencia del personal al optimizar los tiempos de operación, promover el desarrollo de habilidades técnicas a través del uso de nuevas tecnologías y fortalecer la competitividad de la agroindustria local, impulsando el desarrollo económico de la región.

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman que la implementación de un sistema automatizado para la clasificación de Persea americana representa una solución técnica y económicamente viable para superar las limitaciones del proceso manual tradicional. La mejora del 58.7% en el tiempo de procesamiento y la reducción del 79.7% en la tasa de error superan significativamente los valores reportados en estudios similares aplicados a otros productos agrícolas. Desde un enfoque estadístico, estas diferencias evidencian una mejora sustancial en el desempeño del sistema, lo cual se puede considerarse significativa ($p < 0.05$) al comparar ambos métodos mediante pruebas.

La precisión alcanzada del 96.2% se alinea con los estándares internacionales de clasificación postcosecha y resulta comparable con los sistemas implementados en países con mayor desarrollo tecnológico agroindustrial, como mencionan DERY SOL (2025) en su análisis de la automatización agrícola. Asimismo, el análisis de consistencia de los datos, evaluado mediante medidas de dispersión como la desviación estándar, mostró una variabilidad menor en los resultados. Esto demuestra que la incorporación de tecnologías de visión artificial y control mecánico automatizado, principios de la Agricultura 4.0 señalados por Mehta (2021), puede ser efectivamente adaptada al contexto productivo peruano.

La reducción significativa en los costos operativos (49.7%) representa un factor crítico para la competitividad de los productores de palta en Cajamarca, región que según el Gobierno del Perú (2021), ha demostrado potencial de crecimiento mediante la adopción de paquetes tecnológicos. Además, el análisis de correlación entre la reducción de errores y la disminución de mermas evidenció una relación inversa fuerte ($r \approx -0.85$), indicando que a medida que el sistema mejora, las pérdidas económicas se reducen proporcionalmente. La automatización no solo optimiza el uso de recursos humanos, sino que también minimiza el desperdicio de materia prima, contribuyendo a la sostenibilidad económica y ambiental del proceso.

Sin embargo, es importante señalar algunas limitaciones del estudio. Las pruebas se realizaron bajo condiciones controladas y con un volumen limitado de producción, por lo que la escalabilidad del sistema a nivel industrial requiere validación adicional. Asimismo, la inversión inicial de S/. 48,500 puede

representar una barrera para pequeños productores, sugiriendo la necesidad de modelos asociativos o financiamiento estatal para democratizar el acceso a esta tecnología. Desde este punto de vista estadístico, se recomienda ampliar el tamaño muestral y realizar análisis longitudinales para fortalecer la validez externa del estudio. Además, la variabilidad natural del fruto, particularmente en cuanto a formas irregulares o defectos internos no detectables visualmente, representa un desafío técnico que futuras iteraciones del sistema deberán abordar mediante la incorporación de sensores adicionales como espectrometría NIR o análisis de firmeza.

Conclusiones

El sistema automatizado desarrollado cumplió con el objetivo de mejorar significativamente la eficiencia operativa, superando la hipótesis planteada al lograr una mejora del 58.7% en tiempo de procesamiento y 79.7% de reducción en errores de clasificación, muy por encima del 35% proyectado inicialmente.

El análisis del proceso manual identificó ineficiencias críticas relacionadas con la subjetividad de criterios, fatiga operativa y alta variabilidad en la calidad del producto, las cuales fueron efectivamente mitigadas mediante la estandarización automatizada.

El prototipo automatizado demostró alta precisión (96.2%) y fiabilidad operativa (97.4%), validando la factibilidad técnica de integrar visión artificial, control mecánico y programación en el procesamiento postcosecha de *Persea americana*.

La evaluación económica confirmó la viabilidad financiera del sistema con un período de recuperación de 1.29 años, ROI del 77.5% a tres años y un VAN de S/. 89,340, demostrando que la inversión genera valor económico sostenible para los productores.

La implementación de este sistema impulsa directamente el desarrollo local al fortalecer la capacidad productiva de los productores cajamarquinos, mejorar la calidad de sus productos y generar mayores oportunidades de empleo y capacitación técnica en la zona. Asimismo, contribuye a la dinamización de la economía regional, fomentando la modernización de la actividad agrícola, el incremento de ingresos familiares y la sostenibilidad de la agroindustria como motor de crecimiento para las comunidades rurales.

Recomendaciones

Desarrollar programas de capacitación técnica para operarios en el manejo y mantenimiento del sistema automatizado. Explorar mecanismos de financiamiento o

subsidios estatales que faciliten la adopción de esta tecnología por pequeños y medianos productores.

Realizar estudios complementarios para validar el desempeño del sistema en condiciones de producción a escala industrial y durante campañas completas de cosecha. Incorporar en futuras versiones sensores adicionales para detección de defectos internos y análisis de madurez bioquímica.

Evaluar la posibilidad de replicar este modelo tecnológico en otros cultivos de importancia regional como el café, cacao o frutas tropicales.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

REFERENCES

- [1] G. d. Perú, «Redagricola.com,» 1 julio 2025. [En línea]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/peot/noticias/1201679-peru-exporta-mas-de-375-mil-toneladas-de-palta-hass-al-cierre-de-junio>.
- [2] A. S. & C. Mehta, «Automation and digitization of agriculture using artificial,» Chinese Roots Global Impact, p. 279, 2021.
- [3] DERY SOL, «mARKEtb2b,» 31 JULIO 2025. [En línea]. Available: <https://marketb2b.mx/Portal/Blog/62/automatizacion-en-la-agricultura-ejemplos-tecnologia-beneficios>.
- [4] G. d. Perú, «gob.pe,» 25 febrero 2021. [En línea]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/pnia/noticias/343996-paquete-tecnologico-mejoro-produccion-y-calidad-del-cultivo-de-palta-en-cajamarca>.
- [5] M. González, «GQ México y Latinoamérica,» 03 Diciembre 2022. [En línea]. Available: <https://www.gq.com.mx/estilo-de-vida/articulo/quien-invento-el-alcohol-historia#:~:text=Sin%20embargo%2C%20no%20se%20conoce,antes%20de%20Cristo%2C%20en%20China..>
- [6] L. S. Messias, «Reyes Grupo,» 16 Mayo 2023. [En línea]. Available: <https://www.reyesgrupo.com/blog/blog-1/el-auge-de-las-bebidas-artesanales-556>.
- [7] Indecopi, «Gobierno del Perú,» 06 agosto 2024. [En línea]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/indecopi/noticias/999226-indecopi-actualiza-guia-practica-de-la-denominacion-de-origen-pisco-con-resenas-historicas-y-principales-infracciones-por-su-mal-uso>.
- [8] E. Ramos, «Agraria,» 23 enero 2020. [En línea]. Available: <https://agraria.pe/index.php/noticias/es-la-hora-de-aprovechar-el-delicioso-potencial-del-tumbo-20693>.
- [9] Bazargani, K. y Deemyad, T. (2024). El impacto de la automatización en la agricultura: Oportunidades, desafíos y efectos económicos. *Robótica*, 13 (2), 33. <https://www.mdpi.com/2218-6581/13/2/33>
- [10] FAO. (2024). *Agricultura 4.0 - Robótica agrícola y equipos*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/1d748bb5-2c0c-4daf-b640-14b6544c3d02/contentopenknowledge.fao>
- [11] López, A. (2024). Implicaciones en adoptar la agricultura digital. Una visión integral. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8 (4). <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/11095ciencialatina>
- [12] Profesional virtual. (2024, 31 de octubre). El impacto de la automatización en la agricultura: Oportunidades, desafíos y efectos económicos. <https://www.virtualpro.co/articulos/el-impacto-de-la-automatizacion-en-la-agricultura-oportunidades-desafios-y-efectos-economicovirtualpro>