





Sistema de visión artificial para evaluar cereza de café Machine vision system for the evaluation of cherry coffee beans

J. A. Cruz-Morales ^a, J. A. Morales-Viscaya ^b, A. I. Barranco-Gutiérrez ^b, A. L. Herrera-May ^{a,c}

A. A. Alonso-Ramírez ^b, R. M. Woo-García ^{a,d,*}

^a Maestría en Ingeniería Aplicada, Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat, Universidad Veracruzana, Boca del Río 94294, Veracruz, México.

^b Tecnológico Nacional de México en Celaya, TecNM-Celaya, Guanajuato, Celaya 38010, México.

^c Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología, Universidad Veracruzana, Boca del Río 94294, Veracruz, México.

^d Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Veracruzana, Boca del Río 94294, Veracruz, México.

Resumen

La calidad de productos del campo es un factor clave para la industria agrícola debido a que impacta de sobremanera su valor de mercado. La calidad del café de especialidad depende de una serie de características específicas que atraen al consumidor. En este trabajo se presenta el diseño y construcción de un sistema de visión artificial para la clasificación de cereza de café de especialidad desarrollado en el lenguaje Python con una Raspberry Pi 4. La segmentación de imágenes se basa en dos parámetros del café: color y tamaño. Se utiliza el espacio de color HSV y la teoría de momentos de las imágenes para calcular el área en píxeles de la cereza de café. El sistema de visión artificial propuesto obtuvo una exactitud de 93.49% en la clasificación de cereza de café respecto a su grado de maduración y una precisión del 82.6%, fue verificado con una base de datos compuesto por 169 imágenes obtenidas mediante una cámara SH003, con el sistema propuesto se logran obtener más de 3600 granos de café cereza clasificados en una hora en promedio, cantidad superior a la reportada por los clasificadores expertos de la región (2500 granos por hora).

Palabras Clave: Clasificación, procesamiento de imágenes, agricultura, café.

Abstract

Product quality is a critical factor in agricultural industry because it greatly impacts its market value and refers to how well a product satisfies customer needs, serves its purpose, and meets industry standards. The quality of specialty coffee depends on specific characteristics that attract the consumer. This paper presents the design and construction of an artificial vision system for classifying specialty coffee cherries developed in Python with a Raspberry Pi 4. Image segmentation is based on two coffee parameters: color and size. HSV color space and image momentum theory are used to calculate the area in pixels of the coffee cherry. The artificial vision system developed in this work achieved an accuracy of 93.49% in the classification of the coffee cherry according to its level of ripeness and a precision of 82.6%, the developed algorithm was verified with a dataset that consisting of 169 images obtained using a SH003 camera. With the proposed system, it is possible to obtain more than 3,600 classified cherry coffee in one hour on average, an amount higher than that reported by expert classifiers in the region (2500 in an hour).

Keywords: Classification, image processing, agriculture, coffee.

1. Introducción

El sector agrícola es un área importante en la actividad económica de la República Mexicana debido a la extensa gama de productos que se siembran en todas sus regiones (Centro de estudios para el desarrollo rural sustentable y la soberanía

alimentaria, 2018). El café es un producto agrícola estratégico en México con más de 500,000 productores en 14 entidades federativas y 480 municipios (SAGARPA, 2018). Existen más de 30 especies de árboles de café, entre los que se encuentra el *Coffea Arábica L.* que destaca por sus cualidades gustativas y aromáticas.

*Autor para la correspondencia: rwoo@uv.mx

Correo electrónico: zS20022536@estudiantes.uv.mx (Jordan Antonio Cruz-Morales), d2003026@itcelaya.edu.mx (Joel Artemio Morales-Viscaya), Israel.barranco@itcelaya.edu.mx (Alejandro Israel Barranco-Gutiérrez), leherrera@uv.mx (Agustín Leobardo Herrera-May), d2203002@itcelaya.edu.mx (Adán Antonio Alonso-Ramírez), rwoo@uv.mx (Rosa María Woo-García).

Historial del manuscrito: recibido el 31/03/2023, última versión-revisada recibida el 15/06/2023, aceptado el 19/06/2023 publicado el 11/09/2023. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial2.10721>



Es importante garantizar la calidad de los granos de cereza de café de especialidad durante cada una de las etapas de crecimiento, con mayor énfasis durante la etapa de cosecha.

Los atributos morfológicos del café como tamaño, forma, textura, color y la presencia de irregularidades visuales como manchas o desperfectos influyen en la selección del consumidor (García et al., 2019). Generalmente, las características morfológicas del grano se asocian con cualidades aromáticas y gustativas distintivas del café como la fusión del cuerpo, acidez, aroma, amargor, acabado, dulzor y sabor. En la Figura 1 se muestran las etapas de maduración de la cereza de café.

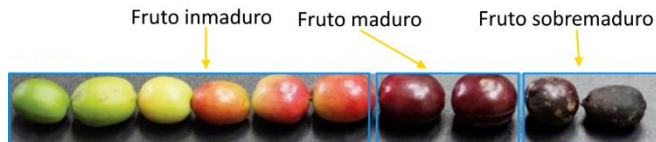


Figura 1: Etapas de maduración de la cereza de café

El color de un fruto es el primer parámetro considerado en la percepción de la calidad y su vida útil, un atributo visual de la superficie del alimento, crítico para su aceptación (Sandoval & Prieto, 2007). Las etapas de maduración de café son: fruto verde o inmaduro (poco aromático, bebida amarga y áspera), fruto maduro (aroma fragante, bebida con mejor expresión de sus cualidades gustativas) y fruto sobremaduro o seco (sabores fermentados). El tamaño del café es una característica clave para la evaluación de calidad del fruto, cada variante de café posee diferentes tamaños.

En este trabajo se propone el diseño y la implementación de un sistema de clasificación de granos de cereza de café de especialidad de la variedad sarchimor para el proceso de lavado. Debido a su demanda en el mercado nacional, este producto requiere de modernas técnicas de cultivo y post cosecha para cumplir con la calidad solicitada por los compradores. Un adecuado control de calidad y clasificación de los granos disminuirá las pérdidas por descomposición del producto en almacenamiento, disminuirá los precios de venta y mejorará la presentación del producto final. Por estas razones es necesario generar sistemas de medición eficientes, automatizados y objetivos, aplicados a la industria del café.

En general, los sistemas de visión artificial están conformados por las etapas de: adquisición de imágenes,

lectura de la información, procesamiento digital, análisis de imágenes y clasificación. En la mayoría de los casos estos sistemas poseen un actuador para separar objetos que no cumplen con los estándares de clasificación.

Castro10721 et al. (2019) implementaron un sistema de visión artificial que evalúa el grado de madurez de la grosella con diferentes técnicas de clasificación de imágenes y aprendizaje automático (machine learning) como redes neuronales convolucionales, máquinas de soporte vectorial y árboles de decisión. Para comparar el desempeño del clasificador de imágenes utilizaron los espacios de color RGB, CIE L*a*b* y en matiz, saturación y valor (por sus siglas en inglés, HSV), donde obtuvieron 89.46%, 90.65% y 90.62% de exactitud respectivamente. El mejor clasificador para evaluar el grado de madurez de la grosella fue el SVM y el espacio de color CIE L*a*b*.

Susanibar et al. (2021) diseñaron e implementaron un prototipo de sistema automatizado para la clasificación de granos de café verdes, utilizando los parámetros de tamaño y el tipo de defectos presentes en el grano para mejorar la calidad de dicho producto. Este sistema fue implementado en una Raspberry Pi3 dotada de una cámara para la adquisición de imágenes y un Arduino® mega para el control de los actuadores que separan a los granos de café. Los resultados de la clasificación de tamaño y defectos fueron de 96% y 80% de exactitud respectivamente.

Lal & Fukai (2022) desarrollaron un sistema de clasificación de granos de café verdes implementadas en una Raspberry Pi3. Consiguieron una frecuencia de muestreo de 13.77 imágenes por segundo con una exactitud mayor (98.19%) usando redes neuronales convolucionales. La resolución de las imágenes a color que se usaron para la clasificación fue de 64x64 píxeles (px).

La organización de este escrito es la siguiente; en la sección II se describen los materiales y la metodología utilizada para desarrollar el sistema de visión artificial: instrumentos, diseño del sistema, procesamiento de imágenes y extracción de características. En la sección III se describen los resultados obtenidos respecto a la clasificación de cereza de café. Finalmente, en la sección IV se presentan las conclusiones y trabajo futuro.

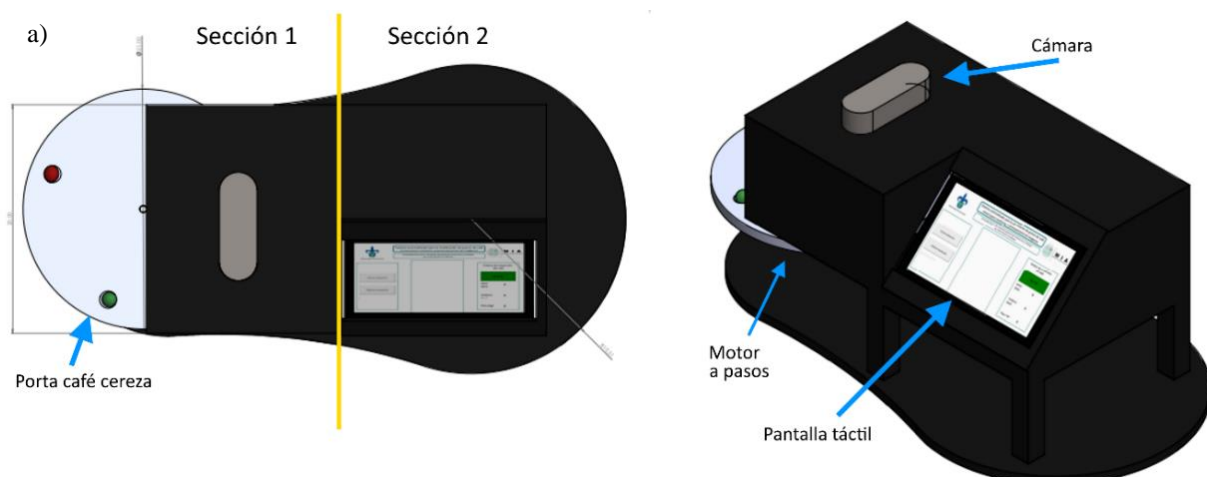


Figura 2: Sistema para la clasificación de granos de cereza de café, a) vista superior, b) vista isométrica

2. Materiales y métodos

Se realizó la propuesta de diseño y el modelado del sistema de visión artificial en el software de diseño asistido por computadora (CAD) SolidWorks® con unas medidas de estructura de 35x21x24cm. El diseño se desglosa con dos partes principales: 1) espacio para los componentes y 2) espacio para la captura de imágenes de las muestras, ver Figura 2. En la sección 1 del diseño, con dimensiones de 10x20x10cm, se ubican los siguientes dispositivos: una cámara USB SH003, iluminación led de tipo aro de 5000K paralela e incidente al objeto, y un motor a pasos nema 17 (para representar un flujo continuo de muestras de cereza de café).

La cámara presenta una resolución de 1920x1080px, y se delimitó el área de interés para reducir el tamaño de la imagen y tiempo de procesamiento digital, resultando en imágenes de 800x530px (rangos de corte: 800 a 1600px en el eje X y 550 a 1080px en el eje Y), dado que en promedio el tamaño del café cereza es de 2 cm de diámetro

En la sección 2 del diseño, con dimensiones de 20x21x11.5cm, se ubican: una Raspberry Pi 4B, un Arduino® uno y un controlador TB6600, para el control del motor nema 17; una pantalla táctil de 7 pulgadas con una resolución de 1024x600px, para visualizar la interfaz gráfica de usuario (GUI) del sistema y; una fuente de alimentación de 12V a 10A, para energizar el Arduino® y el motor nema 17.

El motor nema 17 y el TB6600 están configurados para que cada paso del motor sea de 0.45°. La velocidad del motor nema 17 es de 21 revoluciones por minuto (rpm), haciendo pausas de 0.3s frente a la lente de la cámara. Como resultado la velocidad de clasificación es de 60 cerezas por minuto, es decir, 11.880 kg/h aproximadamente (con un peso promedio de cereza de 3.3g). La implementación del sistema se realizó en versión prototipo, utilizando fibropanel de densidad media (por sus siglas en inglés, MDF) de 6mm.

2.1. Metodología de procesamiento del sistema de clasificación

El procesamiento de imágenes es el análisis matemático de una señal en dos dimensiones mediante un equipo de cómputo, donde la entrada y la salida del procesamiento son imágenes. Se realiza con el fin de mejorar el contenido o extraer información de interés dentro de la imagen.

Las bibliotecas utilizadas para el desarrollo de la programación del sistema son: OpenCV, biblioteca optimizada para aplicaciones de visión artificial (Marín, 2020); Numpy, facilita el manejo de operaciones matriciales; Tkinter, implementada para desarrollo de GUI (Moore, 2018).

En la Figura 4 se describe la metodología de programación del sistema de clasificación de cereza de café con imágenes.

2.2. Transformación de espacio de color BGR a HSV

Para realizar un procesamiento digital de imágenes es necesario especificar un espacio de color para la representación de las imágenes. La mayoría de las cámaras digitales poseen un sensor que absorbe las longitudes de onda de la luz en tres canales: rojo, verde y azul (por sus siglas en inglés, RGB). En OpenCV las imágenes se representan en tres canales: azul, verde y rojo (por sus siglas en inglés, BGR). Este espacio de

color BGR es similar al RGB, con la diferencia del orden de sus canales.

En este trabajo se utilizó el espacio de color HSV. La componente *H* representa el color puro permitiendo diferenciar el tipo de matiz, *S* denota la cantidad de blanco y *V* describe el brillo. HSV separa la intensidad de la imagen (*V*) de la pureza del color (*H*), para evitar que grandes variaciones en la iluminación, afecten la clasificación de la cereza de café.

El algoritmo desarrollado está compuesto por 3 etapas: preprocesamiento, segmentación y clasificación. La primera etapa convierte la imagen capturada en el espacio de color BGR a HSV. En la segmentación se identifica la cereza de café por su color y se extraen sus características. Finalmente, en la etapa de clasificación se determina si el objeto candidato corresponde a un café de calidad, ver Figura 3.

La ecuación (1) describe la normalización de los canales de color de BGR entre 0 y 1, denotados como *R'*, *B'* y *G'*. La transformación del espacio de color BGR a HSV se establece en las ecuaciones (1, 2, 3 y 4).

$$R' = R/255; B' = B/255; G' = G/255 \tag{1}$$

$$H = \begin{cases} 0^\circ, & \text{si } \Delta = 0 \\ 60^\circ \cdot (((G' - B')/\Delta) \bmod 6), & \text{si } C_{max} = R' \\ 60^\circ \cdot ((B' - R')/\Delta + 2), & \text{si } C_{max} = G' \\ 60^\circ \cdot ((R' - G')/\Delta + 4), & \text{si } C_{max} = B' \end{cases} \tag{2}$$

$$S = \begin{cases} 0, & \text{si } C_{max} = 0 \\ \Delta/C_{max}, & \text{si } C_{max} \neq 0 \end{cases} \tag{3}$$

$$V = C_{max} \cdot 100 \tag{4}$$

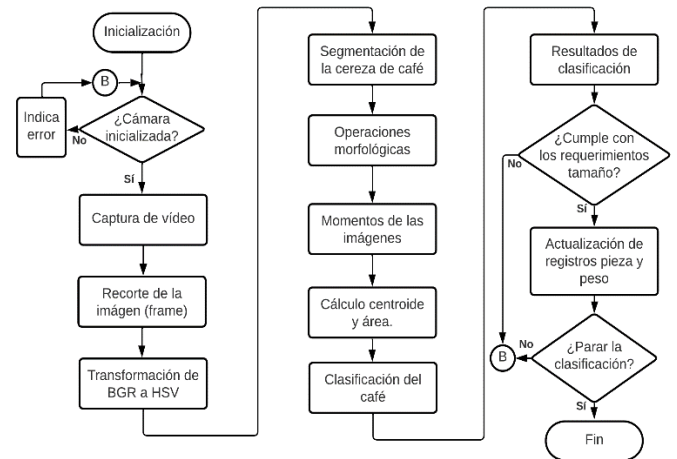


Figura 3: Diagrama de flujo del algoritmo del sistema de visión artificial para la clasificación de cereza de café

Tabla 1: Parámetros del espacio de color BGR y HSV en OpenCV

Espacio de color	Canales	Descripción estándar	Descripción OpenCV
BGR	B	[0-255]	[0-255]
	G	[0-255]	[0-255]
	R	[0-255]	[0-255]
HSV	H	[0-360]	[0-180]
	S	[0-100]	[0-255]
	V	[0-100]	[0-255]

Dado que la biblioteca de OpenCV posee una escala distinta para los espacios de color respecto al estándar, es necesario realizar un ajuste en dicha escala para evitar una segmentación no deseada, ver Tabla 1.

En la ecuación (5) se muestra el ajuste de escala de las componentes del espacio de color *HSV* a *HSV_{opencv}*.

$$\begin{aligned} H_{opencv} &= (H \cdot 180)/360 \\ S_{opencv} &= (S \cdot 255)/100 \\ V_{opencv} &= (V \cdot 255)/100 \end{aligned} \quad (5)$$

2.3. Segmentación de imágenes en HSV

La segmentación de imágenes se define como el proceso de separar una imagen en regiones de píxeles de interés. La umbralización es el método básico para realizar una segmentación de imágenes. Consiste en hacer una transformación donde se evalúa cada píxel de la imagen para determinar si cumple con el umbral (*T*), este método es usado en imágenes cromáticas y acromáticas (Mery, 2015).

En la segmentación de las imágenes de cereza de café se requiere un umbral inferior (*T₁*) y uno superior (*T₂*) de cada uno de los canales, si cumple el valor que se le asigna es 1, de lo contrario es 0, obteniendo una imagen binaria. Para lograr la segmentación de la cereza de café se utilizaron dos umbrales superiores y dos umbrales inferiores para el canal *H* debido a que el color rojo existe en 2 secciones no continuas numéricamente. Se realiza una operación *OR* con (6) y (7), asignando el valor de 1 si las condiciones son verdaderas, y si ninguna se cumple se le asignará cero; donde las imágenes están representadas por una función *I*, donde (*x,y*) son coordenadas de un píxel e *I(x,y)* el valor de intensidad de ese píxel.

$$I_s(x, y) = 1; \text{ si } H_1T_1 \leq I(x, y) \leq H_1T_2 \quad (6)$$

$$I_s(x, y) = 1; \text{ si } H_2T_1 \leq I(x, y) \leq H_2T_2 \quad (7)$$

$$I_s(x, y) = 0; \text{ en caso contrario}$$

2.4. Operaciones morfológicas

Las operaciones morfológicas son fundamentales en el procesamiento digital para extraer los componentes de las imágenes que representan y describen las regiones geométricas (formas). En una operación morfológica los píxeles de una imagen se ajustan en función del valor de píxeles cercanos. Estas operaciones pueden ser usadas en conjunto para realizar el procesamiento específico de una geometría como encontrar el contorno, eliminar ruido, aumentar el tamaño, entre otros (Shih, 2010).

Las operaciones básicas son la erosión y la dilatación. En la ecuación (8) se define la erosión, donde *S* es el kernel de 3x3 en configuración de cruz que será trasladado por cada subconjunto de píxeles de la imagen *X*.

$$Y = X \ominus S = \{z | (S)_z \subseteq X\} \quad (8)$$

La operación morfológica de dilatación añade píxeles a los límites de los objetos segmentados en una imagen, es decir, expande las geometrías. El valor del píxel de salida es el valor máximo de todos los píxeles dentro del kernel para una imagen a color o en escala de grises. En el caso de las imágenes binarias, si alguno de los píxeles posee el valor de 1, entonces la salida se establece en 1 (González & Woods, 2018). En la

ecuación (9) se define matemáticamente la dilatación, donde *S* es el kernel de 3x3 en configuración de cruz que será trasladado por cada subconjunto de píxeles de la imagen *X*.

$$Y = X \oplus S = \{z | (S_z) \cap X \neq \emptyset\} \quad (9)$$

2.5. Momentos de las imágenes

En el procesamiento de imágenes, los momentos son una medida de la dispersión de una región de puntos, en la que se realiza un promedio ponderado de la intensidad de los píxeles en una imagen. Estos permiten calcular propiedades específicas de una imagen como el área de un objeto de interés (González & Woods, 2018). En la ecuación (10) se definen los momentos. En este trabajo se utiliza el momento de orden cero (Barranco et al., 2018).

$$M_{ij} = \sum_x \sum_y x^i y^j I(x, y) \quad (10)$$

Aplicando el momento simple de orden cero *M₀₀*, descrito por (11), es posible simplificar la ecuación al realizar la operación de los exponentes. La ecuación (12) representa la sumatoria de las intensidades de los píxeles de una imagen, es decir, el área binarizada.

$$M_{00} = \sum_x \sum_y x^0 y^0 I(x, y) \quad (11)$$

$$M_{00} = \sum_x \sum_y I(x, y) \quad (12)$$

2.6. Clasificación de la cereza del café

Generalmente, la cereza del café se clasifica de acuerdo con sus características morfológicas: color y tamaño. La ecuación (13) muestra la condición de tamaño que se requiere para que el producto sea aceptado, donde *área_{objeto}* es el área de la imagen binarizada obtenida con *M₀₀*; *área_{min}* y *área_{max}*, son los valores para el umbral del área.

$$\text{Cereza aceptada si: } \text{área}_{min} \leq \text{área}_{objeto} \leq \text{área}_{max} \quad (13)$$

3. Resultados

Para evaluar el sistema de visión artificial se utilizó cereza de café previamente clasificada: 41 muestras maduras (aceptadas) y 128 no maduras (rechazadas: verde, pinto y sobremaduro). Utilizando la herramienta “selector de color” de paint.net se establecieron los rangos para cada uno de los canales HSV en que se encuentran las cerezas de café previamente elegidas y clasificadas por un experto en cosecha de café cereza de la región. Los umbrales de dicho conjunto de cerezas aceptadas como maduras se pueden visualizar en la Tabla 2.

HSV canales	Umbral inferior	Umbral superior
H ₁	0	10
H ₂	160	180
S	0	255
V	130	255

Utilizando las operaciones de momentos (12) para calcular el área, se calculó y estableció el rango de valores de área para el conjunto de cerezas clasificadas como aceptables, sin presentar efecto de traslape entre granos de café. Los rangos generados se pueden apreciar en la Tabla 3.

Tabla 3: Rangos de umbral por área

Parámetro	Umbral inferior	Umbral superior
Área	38,000	60,000

Los resultados obtenidos en la clasificación se evalúan calculando la exactitud (14) y la precisión (15); donde los datos verdaderos positivos ($VP = 38$) son la clasificación correcta de muestras aceptadas; los verdaderos negativos ($VN = 120$), correcta clasificación de las rechazadas; falsos positivos ($FP = 8$) y falsos negativos ($FN = 3$) son datos mal clasificados. Estos datos son evaluados en (14) y (15). En la Figura 4 se muestra la matriz de confusión representando los porcentajes correspondientes.

$$Exactitud = (VP + VN) / (VP + VN + FP + FN) \quad (14)$$

$$Precisión = VP / (VP + FP) \quad (15)$$

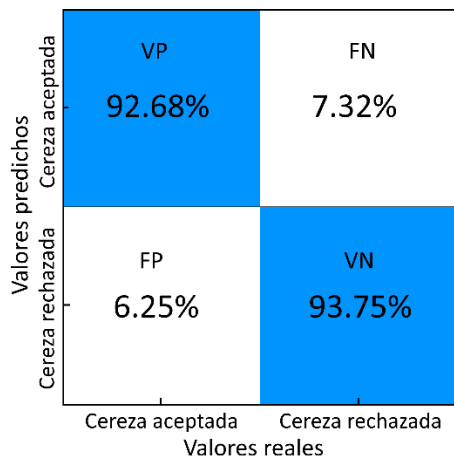


Figura 4: Evaluación del rendimiento del clasificador con matriz de confusión

El sistema de visión artificial obtuvo una exactitud de 93.49% y una precisión de 82.6% sobre las imágenes segmentadas en el espacio de color HSV. Se utilizaron los parámetros de clasificación por color y tamaño con la finalidad de generar una evaluación en tiempo reducido, permitiendo aumentar la velocidad de clasificación actual 2500 granos en promedio por hora, a clasificar 3600 granos por hora con un posible error tipo II (FP) de 6.25%.

Algunos de los trabajos homólogos al aquí presentado son: Montes et al. (2015) quienes diseñaron un clasificador cerezas de café maduras en tiempo real utilizando un FPGA y el parámetro de color. Bazame et al. (2021) que implementaron un sistema de visión artificial para detectar y clasificar cereza de café utilizando YOLOv3 para la clase de cereza de café madura. Eustaquio & Jr, (2020) quienes desarrollaron un sistema para la clasificación de cereza de café usando el espacio de color RGB y algoritmos de aprendizaje automático de Matlab. La Tabla 3 presenta un breve comparativo basándose en el método de clasificación y la exactitud de los trabajos expuestos.

Tabla 4. Comparación de resultados con otros autores

Autores	Método de clasificación	Exactitud
Montes (2015)	Procesamiento de imágenes	75.7%
Bazame et al. (2021)	Redes neuronales	85%
Eustaquio & Jr, (2020)	Aprendizaje automático con aplicaciones de Matlab	94%
Este trabajo	Procesamiento de imágenes	93.49%

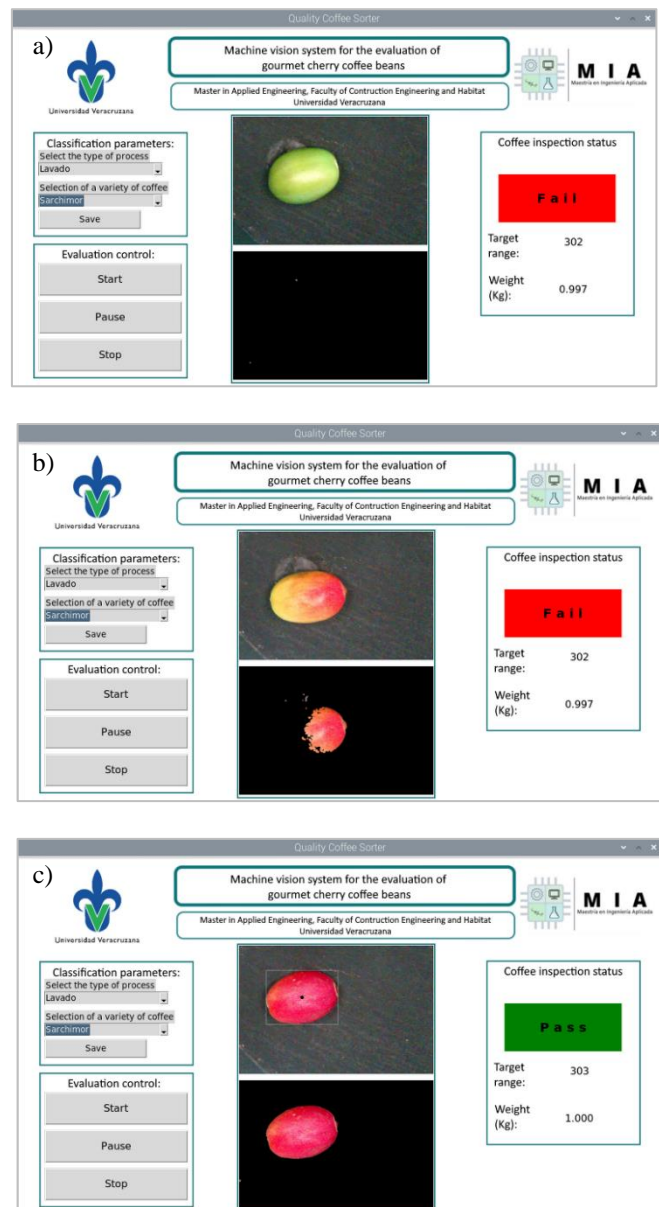


Figura 5: Clasificación de cereza de café respecto a su maduración, a) Cereza verde, b) Cereza pinta, c) Cereza madura

El trabajo propuesto presenta una confiable exactitud en la clasificación a pesar de utilizar únicamente técnicas de procesamiento y análisis de imágenes. Asimismo, se desarrolló una interfaz gráfica de usuario para el control de la

clasificación de cereza de café. En la Figura 5 se muestra la interfaz gráfica de usuario con 3 ejemplos en secuencia de la clasificación.

En la Figura 6 se muestra la implementación del sistema de visión artificial para la clasificación de cereza de café.

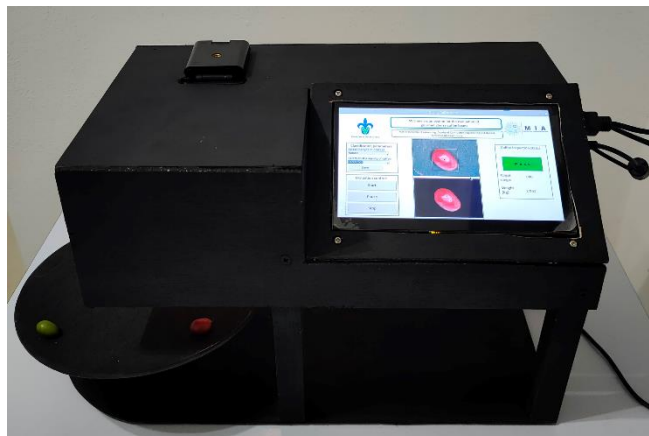


Figura 6: Sistema de visión artificial implementado

4. Conclusiones y trabajo futuro

Se presentó un sistema de visión artificial para clasificar la cereza de café *Coffea Arábica L.* respecto a su grado de maduración y tamaño, además de la construcción de un prototipo funcional que presenta una velocidad de clasificación de 11.880 kg/h aproximadamente.

Los resultados obtenidos demuestran una exactitud superior al 93% y una precisión del 82.6%, el algoritmo desarrollado fue verificado con una base de datos compuesta por 169 imágenes obtenidas mediante una cámara SH003. Se destaca la metodología de desarrollo empleada contribuyendo positivamente a un sistema portable de bajo coste. En este conjunto de datos de prueba, la tasa de errores tipo II, falsos positivos, es de 6.25%, la cual es considerada suficientemente satisfactorio para el factor de calidad promedio establecido para la cereza de café.

La estrategia a futuro es incorporar nuevos procesos de tratado (natural y honey), añadiendo nuevos rangos de umbral para la clasificación de la cereza de café, así como agregar variedades de café, utilizando el criterio de expertos clasificadores para el etiquetado de frutos, desarrollando una base de datos de cuáles son aceptables y cuáles no (aprendizaje supervisado), con la finalidad de reducir aún más el error tipo II. Se propone el uso de técnicas más sofisticadas de

clasificación basadas en redes neuronales o máquinas de soporte vectorial para mejorar la exactitud y precisión del clasificador.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) otorgado a través de la beca nacional asociada al número CVU 1092487. Así como a la Universidad Veracruzana y al TecNM en Celaya por sus programas de posgrado.

Referencias

- Bazame, H., Molin, J., Althoff, D., & Martello, M. (2021). Detection, classification, and mapping of coffee fruits during harvest with computer vision. *Computers and Electronics in Agriculture*.
- Castro, W., Oblitas, J., De-La-Torre, M., Cotrina, C., Bazan, K., & Avila-George, H. (2019). Classification of cape gooseberry fruit according to its level of ripeness using machine learning techniques and different color spaces. *IEEE Access*, 7.
- Centro de estudios para el desarrollo rural sustentable y la soberanía alimentaria. (2018). *El café en México diagnóstico y perspectiva*.
- Eustaquio, W., & Jr, J. (2020). Classification of Immature and Mature Coffee Beans Using RGB Values and Machine Learning Algorithms. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*.
- García, M., Candelo, J., & Hoyos, F. (2019). *Quality and defect inspection of green coffee beans using a computer vision system*.
- González, R., & Woods, R. (2018). *Digital image processing* (Pearson (ed.); 4th ed.).
- Lal, H., & Fukai, H. (2022). Peaberry and normal coffee bean classification using CNN, SVM, and KNN: their implementation in and the limitations of Raspberry Pi 3. *AIMS Agriculture and Food*.
- Marín, R. (2020). *¿Qué es OpenCV? Instalación en Python y ejemplos básicos*. Revista Digital INESEM. <https://revistadigital.inesem.es/informatica-y-tics/opencv/>
- Mery, D. (2015). *Computer vision for X-ray testing. Imaging, system, image databases and algorithms*. Springer.
- Montes, N. (2015). *Real-time classification of coffee fruits using FPGA*. 91. <http://www.bdigital.unal.edu.co/50617/>
- Moore, A. (2018). *Python GUI Programming with Tkinter: Develop responsive and powerful GUI applications with Tkinter*. 442.
- SAGARPA. (2018). *Café Mexicano: planeación agrícola nacional del 2017 al 2030*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256426/B_sico-Caf_.pdf
- Sandoval, Z., & Prieto, F. (2007). Caracterización de café cereza empleando técnicas de visión artificial. *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 60(2).
- Shih, F. (2010). *Image Processing and Pattern Recognition: Fundamentals and Techniques* (IEEE (ed.)). John & Sons, Inc.
- Susanibar, G., Ramirez, J., Sanchez, J., Ramirez, R., & Arroyo, D. (2021). Development of an automated machine for green coffee beans classification by size and defects. *Journal of Advanced Agricultural Technologies*, 8.