



Sistema de visión artificial para la identificación del estado de madurez de frutas (granadilla)

Artificial vision system for the identification of ripeness of passion fruit (granadilla)

Diego escobar Figueroa¹ Edgar Roa Guerrero²

Para citar este artículo: Figueroa, D. y Roa, E. (2016). Sistema de visión artificial para la identificación del estado de madurez de frutas (granadilla). *Revista Redes de Ingeniería*. 7(1), 84-92. Doi: 10.14483/udistrital.jour.redes.2016.1.a08

Recibido: 9-febrero-2016 / **Aprobado:** 20-junio-2016

Resumen

El manejo adecuado de frutas se ha convertido en una de las actividades económicas más importantes en la agricultura colombiana [1]. A la fecha, la identificación del estado de maduración de frutas se realiza manualmente [2], presentando variabilidad por la subjetividad producida debido a la fatiga ocular del experto. El propósito de esta investigación fue desarrollar una herramienta computacional para la identificación del estado de maduración de granadillas a partir del reconocimiento de imágenes. El área en píxeles de las imágenes perteneciente a la fruta fue extraída mediante la técnica de Otsu usando librerías de OpenCv en Python. Finalmente, la tarea de clasificación se realizó a través del análisis de agrupamiento, en el cual fueron asignados 110 puntos RGB pertenecientes a cada estado de maduración de la granadilla. Los resultados obtenidos muestran 92,6% de aciertos en la identificación del estado de maduración, a partir de un conjunto de 90 imágenes obtenidas de 90 frutas en

diferentes estados de maduración, en comparación con el análisis manual acorde a lo establecido por la Norma técnica colombiana NTC 4101.

Palabras clave: agricultura colombiana, aplicación de visión artificial, frutas, procesamiento de imágenes, Python, segmentación Otsu.

Abstract

The proper handling of fruits has become one of the most important economic activities in the Colombian agriculture [1]. Actually, the identification of the ripeness of fruit is made manually [2], which induces variability due to subjectivity by expert eye strain. The purpose of this research was to develop a computational tool for identifying the state of ripeness of passion fruit (granadilla) through images recognition. The area in pixels of the fruit images was extracted by a technique called Otsu, using OpenCv libraries in Python. Finally, the task of classification was conducted through cluster analysis, here were assigned 110 points RGB belonging to each state of maturity

1. Estudiante del programa de ingeniería electrónica de la Universidad de Cundinamarca en Colombia. Correo electrónico: daescobar@mail.unicundi.edu.co
2. Ingeniero Electrónico de la Universidad Francisco de Paula Santander en Colombia; MsC en automatización y control industrial del Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín; docente de tiempo completo y director del semillero de investigación en procesamiento de señales y visión artificial (Kinestasis) de la Universidad de Cundinamarca en Colombia. Correo electrónico: eeduardoroa@mail.unicundi.edu.co

of passion fruit. The results showed 92, 6% of accuracy for identifying the state of ripeness, from a set of 90 images obtained from 90 fruits in different stages of maturity, which was compared with traditional analysis (conducted by experts) according to the provisions of the Colombian Technical Standard NTC 4101.

Keywords: application of artificial vision, colombian agriculture, fruit, image processing, Otsu segmentation, Python.

INTRODUCCIÓN

Colombia es un país con enorme potencial en la producción de frutas exóticas, en parte, debido a su posición geográfica y a su diversidad climática que le permite producir frutas de diferentes especies durante todo el año, desde el nivel del mar hasta los 2800 metros de altitud, lo cual le otorga la posibilidad de ser un productor con gran potencial y poder competitivo en los mercados internacionales [3], contribuyendo a la sostenibilidad del país, pues para el año 2012, Colombia exportó más de 48,6 millones de dólares en frutas exóticas como la Uchuva, la Gulupa, la Granadilla y la Pitahaya [4].

El estado de maduración es un factor determinante para obtener frutas de alta calidad y cubrir las necesidades, no solo del mercado local sino también la demanda de los mercados internacionales. El análisis manual por parte del técnico experto es el único procedimiento que brinda una perspectiva del estado de maduración de la fruta sin destruirla, en este se evalúan aspectos como color, tamaño, forma, textura o presencia de daños [5]. Asimismo, son utilizados otros métodos invasivos como penetrómetro, el cual determina la resistencia a la penetración o tenderómetro que mide la resistencia al corte de las frutas [6]; sin embargo, la aplicación de estas técnicas solo son desarrolladas de forma controlada en laboratorios para evaluar diferentes técnicas de producción, dado el grado de dificultad en la determinación del estado de maduración de las frutas.

Por esta razón, las técnicas de procesamiento digital de imágenes surgen como una solución prometedora para soportar los análisis en la identificación del estado de maduración de frutas tipo exportación en la industria agroalimentaria, debido a su velocidad y precisión contribuyen en la disminución de los errores subjetivos producidos por el experto luego de análisis extensos, también se ha utilizado con éxito en el análisis de las características de alimentos tales como carnes, queso y pizza entre otros como se evidencia en [7]. A continuación, se describe la metodología empleada en este trabajo de investigación, para determinar el estado de maduración de las granadillas mediante técnicas de procesamiento de imágenes.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología propuesta para la identificación del estado de madurez de las granadillas se muestra en la figura 1. Se halla compuesta por una etapa de adquisición de la imagen; posteriormente sigue una etapa de pre-procesamiento, la cual tiene como objetivo disminuir las variaciones bruscas entre píxeles; sigue la etapa de segmentación, la cual consiste en extraer los objetos de interés en este caso las frutas del fondo; finalmente, la etapa de clasificación o reconocimiento, que evalúa cada uno de los objetos para clasificarlos de acuerdo al color o la forma como se evidencia en [8].

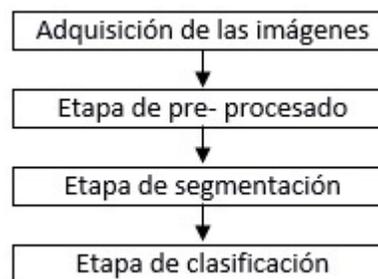


Figura 1. Diagrama de bloques para el sistema de visión artificial de este trabajo.

Previo a realizar cualquier prueba o implementación, se llevó a cabo la selección del entorno de

desarrollo para la realización de los algoritmos con la librería de código abierto OpenCv, el entorno que se eligió fue Python, que es un lenguaje de programación interpretado de alto nivel con licencia libre y multiplataforma. Se elige la librería OpenCv de código abierto ya que está orientada a aplicaciones de procesamiento de imágenes, debido a su interacción con diferentes sistemas operativos con distribuciones diversas, en este caso sobre el sistema operativo Gnu Linux.

Adquisición de las imágenes

Para la adquisición de las imágenes se utilizó un Módulo Picamera de Raspberry pi con una resolución de 5 mega píxeles para diferenciar las frutas en la escena, el cual tiene compatibilidad con la plataforma de procesamiento tanto en el hardware (conexión), como en el software (controladores y programas). Con la ayuda de estas herramientas de hardware y software se obtuvieron 90 imágenes de frutas en diferentes estados de maduración en el espacio del color RGB (Red, Green, Blue). Se empleó iluminación direccional, que es utilizada a menudo en la fase de adquisición de imágenes digitales y que consiste en colocar la cámara apuntando al objeto e iluminándolo en la misma dirección de la cámara, con un bajo ángulo de incidencia como se muestra en la figura 2. De este modo la cámara recibe la mayor parte de la luz reflejada por el objeto, además se seleccionó iluminación Led (diodos emisores de luz) con fondo negro opaco.

Pre procesamiento de imágenes

Posterior a la captura de las imágenes se debe efectuar el pre-procesamiento con el propósito de eliminar o disminuir el ruido presente por la falta de calidad y poca iluminación, así como disminuir las variaciones bruscas de color en los píxeles vecinos. Durante este trabajo se realizaron pruebas con el filtro de convolución el cual minimiza el efecto de objetos indeseados según las características de la imagen [9], este filtro identifica la media de los

píxeles en la imagen definidos por la ventana rectangular de tamaño $N \times M$ de acuerdo a la ecuación (1):

$$\mu = \frac{1}{N \times M} \sum_{i=1}^{i=n1+n2} V(n1, n2) \quad (2)$$

Donde $n1$ y $n2$ son todos los píxeles definidos por la ventana $N \times M$.

La convolución se calcula multiplicando cada uno de los píxeles de la ventana definida por el kernel de convolución, se identifica el promedio y se reemplaza el píxel central de la ventana con el nuevo valor medio, como se muestra en la figura 3.

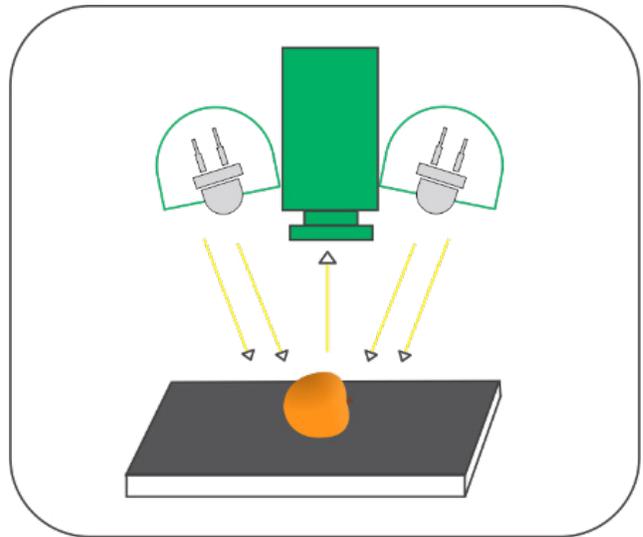


Figura 2. Esquema de iluminación direccional utilizado.

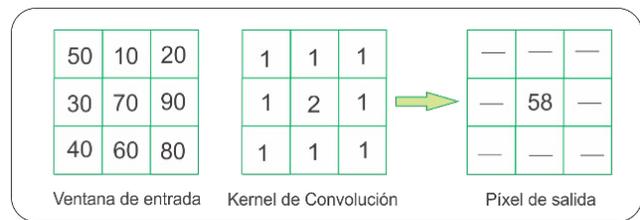


Figura 3. Ventanas del filtro de convolución.

Proceso de segmentación de imágenes

Para la clasificación del estado de maduración de las granadillas fueron probadas las técnicas de segmentación de Otsu [12] y análisis del histograma [13]. Se optó por utilizar la umbralización por el método de Otsu, el cual permite encontrar un nivel de umbral en imágenes con un fondo diferente, el cual se basa en los pesos, la media y la varianza para cada clase, mediante las ecuaciones (2), (3), (4) y (5) respectivamente.

$$W_0 = \frac{\sum_{q=0}^{K-1} P_q}{\sum_{q=0}^{L-1} P_q} \quad \mu_0 = \frac{\sum_{q=0}^{K-1} P_q r(q)}{\sum_{q=0}^{K-1} P_q} \quad (2) \quad (3)$$

$$\mu_0^2 = \frac{\sum_{q=0}^{K-1} P_q (r(q) - \mu_0)^2}{\sum_{q=0}^{K-1} P_q} \quad \sigma_1^2 = W_0 \mu_0^2 + W_1 \mu_1^2 \quad (4) \quad (5)$$

Donde W_0 son los pesos de cada clase, μ_0 la media de cada clase, $p(q)$ es la cantidad de píxeles pertenecientes a un nivel, $r(q)$ son los niveles de gris en la imagen y σ_1^2 la varianza

El método describe un procedimiento no paramétrico el cual selecciona el umbral óptimo como la menor variación entre clases, obteniendo como resultado una imagen binarizada en la cual se encuentran los objetos de interés con color diferente al fondo, objetos de color blanco y fondo de color negro [12]. Las ventajas de este método de segmentación basada en umbral óptimo, es que posee una buena respuesta frente a la mayoría en situaciones del mundo real como imágenes con presencia de ruido, con histogramas planos, mal iluminadas, etc., además de no precisar de supervisión humana u otra información acerca de la imagen.

Caracterización y clasificación de granadillas: aplicación del agrupamiento K-medias

Posterior a la extracción de las regiones pertenecientes a las granadillas en la imagen original RGB,

se procedió a clasificarlas mediante la aplicación de técnicas de agrupamiento K-medias, debido a que su representación gráfica y estadística posee significados relevantes [10]. El método consiste en determinar la distancia euclidiana del valor en el espacio RGB de cada píxel de la imagen segmentada, con respecto a cada centroide de las clases. Finalmente, se asigna cada píxel a la clase correspondiente cuya distancia euclidiana es la mínima [11].

Con el propósito de clasificar las frutas se identifican las características de las granadillas en estado de maduración verde, verde purpura y madura en las imágenes a través de la toma de puntos (componentes de color BGR) que pertenecen a cada clase para diferentes imágenes. Cada una de las clases está conformada por 110 puntos BGR, donde las granadillas maduras pertenecen a la clase 1, las granadillas verdes pertenecen a la clase 2 y las granadillas verde purpura pertenecen a la clase 3.

Validación de los resultados

Con el fin de evaluar la metodología propuesta en la herramienta computacional para la identificación del estado de maduración de granadillas, el algoritmo implementado se aplicó a 90 imágenes que pertenecen a 90 granadillas en los diferentes estados de maduración.

En primer lugar, se obtuvieron tres bases de datos con 110 puntos en el espacio del color BGR para cada clase, seguidamente para su validación se tomaron 77 puntos para entrenamiento equivalentes al 70% de los datos y 33 puntos para validación del algoritmo equivalentes al 30% de los datos obtenidos. En segundo lugar, se validó la herramienta con respecto a la evaluación manual por parte del técnico experto para 90 granadillas, de las cuales 30 pertenecen a cada una de las clases, a través de la matriz de confusión, con el fin de obtener un porcentaje de exactitud y precisión de la herramienta computacional para clasificar las granadillas.

Por otra parte, la herramienta computacional también fue validada mediante un análisis de correlación con las medidas obtenidas por el técnico experto, con el fin de determinar el grado de concordancia que presentó la herramienta computacional con respecto a la evaluación visual por parte del técnico experto.

RESULTADOS

Con el propósito de desarrollar la herramienta computacional para la identificación del estado de maduración de granadillas, fueron analizadas 90 imágenes en diferentes estados de maduración con parámetros controlados. La primera etapa probada de la metodología propuesta fue el proceso de filtrado, para ello se utilizó el filtro de convolución, el cual brinda homogeneidad en todos los píxeles además de disminuir posibles ruidos como se evidencia en la figura 4.

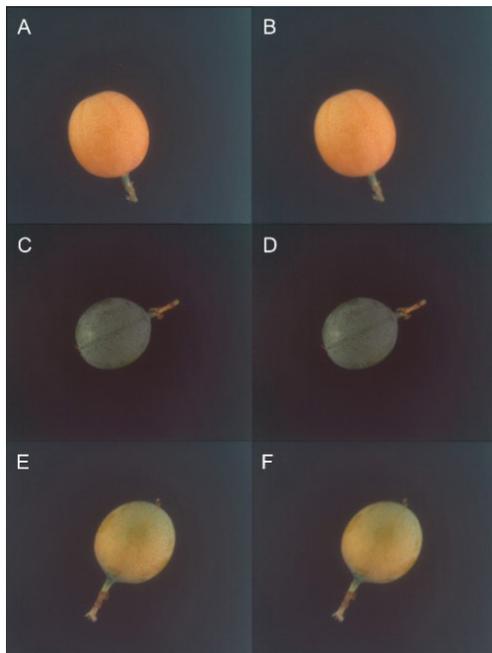


Figura 4. Proceso de Filtrado. A) granadilla madura, B) granadilla madura con filtro de convolución, C) granadilla verde, D) granadilla verde con filtro de convolución, E) granadilla verde púrpura, F) granadilla verde púrpura con filtro de convolución.

La segunda etapa probada fue el proceso de segmentación como se evidencia en la figura 5. El método de segmentación por umbral Otsu, presentó resultados favorables en la extracción de los objetos con respecto del fondo en las imágenes.

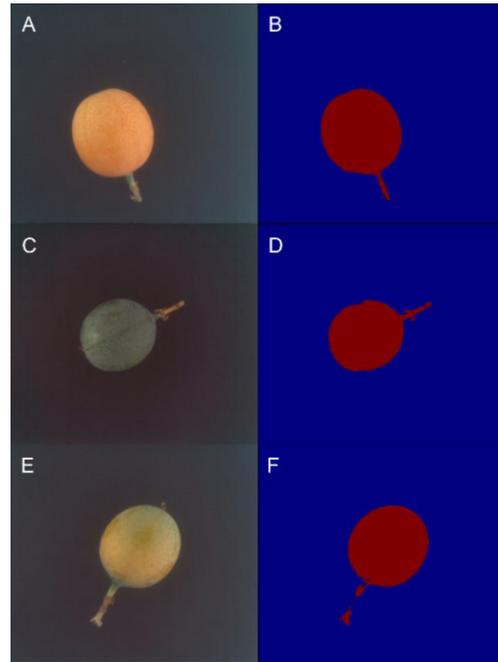


Figura 5. Proceso de Segmentación. A, C y E Imagen original Granadillas, B) granadilla madura segmentada, D) granadilla verde segmentada, F) granadilla verde púrpura segmentada.

Posteriormente, para la etapa de caracterización y clasificación de las granadillas se aplicó el método de análisis de agrupamiento K-medias, para separar las granadillas por su estado de maduración, a continuación, en la figura 6 se muestran los puntos en el espacio del color BGR pertenecientes a las granadillas en los estados de maduración.

El análisis de agrupamiento se realizó con el fin de separar las granadillas verdes de las maduras y verde púrpura. La figura 6 muestra 330 puntos de los cuales 110 pertenecen a granadillas maduras representadas por rombos amarillos, 110 pertenecen a granadillas verdes representados por asteriscos verdes y 110 que pertenecen a granadillas verde púrpura representados

por estrellas púrpura, evidenciando que las granadillas son fácilmente separables mediante las componentes de color BGR. Asimismo, en la figura 7 se presentan los resultados de la clasificación de las granadillas, en ella se evidencian las áreas pertenecientes a las granadillas en estado de maduración maduro con un porcentaje de puntos mayor al 75% en color amarillo, las áreas pertenecientes a las granadillas en estado de maduración verde con un porcentaje mayor al 75% en color verde y las áreas pertenecientes a las granadillas en estado de maduración verde púrpura aquellas que presentan los dos colores con porcentajes inferiores al 75%.

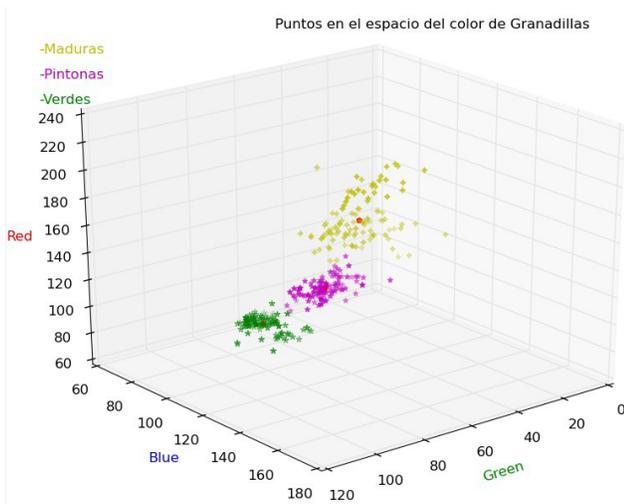


Figura 6. Separación de los puntos que representan granadillas maduras (rombos amarillos), pintonas (estrellas púrpura) y verdes (asteriscos verdes).

La validación de la herramienta se realizó mediante tres pruebas: inicialmente se validó el algoritmo mediante la clasificación K-medias, mediante el cual se realizó la estimación del error a través de la técnica de "Bootstrapping", esta técnica permite evaluar la capacidad que tiene el algoritmo de identificar los estados de maduración de

las granadillas a partir de la información del color BGR, seleccionando el 70% de los datos aleatoriamente para el entrenamiento y el 30% para prueba, esta prueba fue realizada 10 veces y se determinó que en promedio la herramienta identifica el 92.6% de los puntos correctamente, como se evidencia a continuación en la tabla 1.

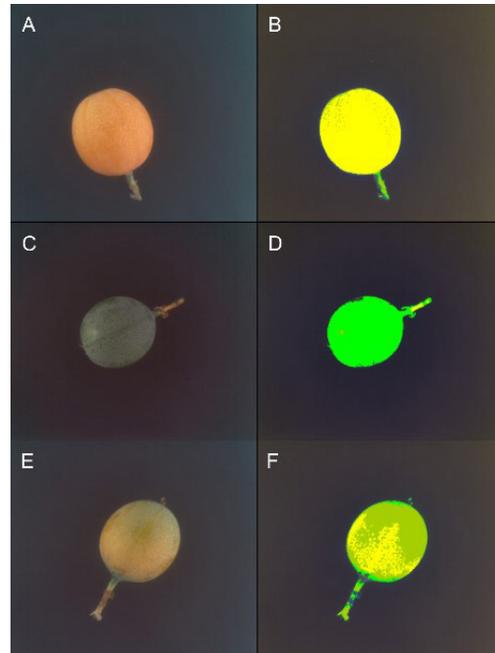


Figura 7. A, C y E: granadillas maduras, verdes y pintonas respectivamente (izquierda). B, D y F clasificación de granadillas utilizando la clustering.

Posteriormente, se compararon las medidas obtenidas por el técnico experto y la herramienta computacional, a través de la matriz de confusión como se muestra en la tabla 2 definida como una herramienta de visualización para determinar los porcentajes de error en las mediciones. Dos parámetros importantes son la exactitud y precisión en la clasificación, los cuales son definidos como el grado de concordancia entre la clase asignada

Tabla 1. Validación del algoritmo

	Test1	Test2	Test3	Test4	Test5	Test6	Test7	Test8	Test9	Test10
% acierto	93.9%	94.9%	92.9%	93.9%	86.8%	90.9%	91.9%	93.9%	97.9%	88.9%
promedio	92.6%									

por la herramienta computacional, con respecto a la clase asignada por el técnico experto a cada granadilla para este caso, obtenidos mediante las ecuaciones 6 y 7 respectivamente.

Tabla 2. Matriz de confusión.

	Herramienta computacional	
Técnico experto	Clase referencia	Clase de no referencia
Clase referencia	Vp	Fn
Clase de no referencia	Fp	Vn

$$Exactitud = \frac{V_p + V_n}{V_p + V_n + F_p + F_n} \quad (6)$$

$$Precisión = \frac{V_p}{V_p + V_n} \quad (7)$$

Dónde:

Vp son los verdaderos positivos; Vn son los verdaderos negativos; Fp son los falsos positivos; Fn son los falsos negativos.

Para la clasificación se usaron 90 imágenes que pertenecen a 30 granadillas por cada clase verdes, maduras y verde purpura, en la que se obtiene un 93% de acierto con relación al técnico experto de manera manual, de igual forma, la precisión para determinar las granadillas maduras fue del 96,6% con un error en la clasificación, para granadillas verde purpura fue de 86,6% con cuatro errores y para granadillas verdes fue de 96,6% con un error, lo que evidencia que el porcentaje de error es significativamente bajo como se ve en la tabla 3.

Técnico experto	Herramienta computacional		
	Maduras	Verde purpura	Verdes
Maduras	29	4	0
Verde purpura	1	26	1
Verdes	0	0	29
Precisión	96,6%	86,6%	96,6%
Exactitud	93%		

Tabla 3. Resultados correlación técnico experto y herramienta computacional.

Finalmente, se realizó la validación mediante los diagramas de correlación, que representan la diferencia entre los métodos implementados con respecto al método manual, no se encontró variabilidad significativa entre la medida manual y el algoritmo implementado, en la figura 8 se puede observar claramente que la medida de la herramienta (línea roja) presentó valores muy similares a los de un técnico experto (barras azules).

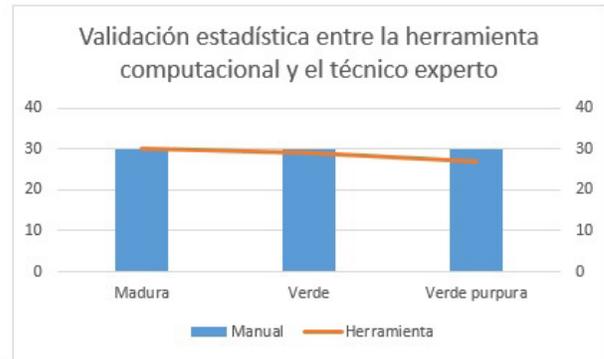


Figura 8. Correlación estadística de la herramienta computacional frente al técnico experto.

DISCUSIÓN

La detección del estado de maduración de frutas es una actividad de vital importancia en los procesos de exportación debido a que deben cumplir con los parámetros de calidad exigidos. Actualmente la evaluación convencional es subjetiva y se ve afectada por la experiencia del técnico experto, por el cansancio físico y la fatiga ocular. Mediante la herramienta computacional propuesta en este manuscrito se obtuvo 92.6% de probabilidad para clasificar correctamente las granadillas, mediante el algoritmo a partir de los datos de validación.

En cuanto a la metodología de segmentación propuesta, se pudieron obtener regiones bien definidas a partir de las imágenes, logrando clasificar de forma correcta las granadillas con un 93% de acierto, a pesar de las variaciones de intensidad entre píxeles debido a la luz ambiente.

Asimismo, la herramienta computacional desarrollada aquí contribuye a la identificación objetiva del estado de maduración de las granadillas, convirtiéndose en una alternativa para los productores en Colombia. Además, se pretende desarrollar un sistema portable para la identificación del estado de maduración de forma no destructiva directamente en las plantaciones, así como detección de enfermedades tanto en la granadilla como para otro tipo de frutas.

CONCLUSIONES

El desarrollo de la herramienta computacional permitió determinar el estado de maduración de las granadillas, con un alto porcentaje de acierto 93% como se evidenció en las pruebas con respecto al técnico experto y además, podría ser adaptada para clasificar otros tipos de frutas o vegetales.

Durante el proceso de filtrado y segmentación de las imágenes se presentaron problemas con las condiciones de iluminación de la escena, disminuyendo la calidad de la imagen, este proceso es de vital importancia y se propone trabajar con parámetros controlados de iluminación de tal manera que no afecte la clasificación.

La técnica de Clustering K-medias permitió hacer la validación mediante imágenes con granadillas maduras, verdes y verde purpura a través de la mínima distancia, con un porcentaje del 92,6% en la clasificación de granadillas por medio de sus componentes en color BRG.

Los resultados fueron validados con respecto a la prueba manual por parte del técnico experto, la prueba evidenció alta correlación entre la clasificación de las granadillas indicando el buen desempeño del algoritmo con un 93% de aciertos. Sin embargo, es necesaria la validación con un mayor número de granadillas para su uso en campo.

La herramienta computacional presenta ventajas con respecto al análisis manual por basarse en

datos reales de color, no presenta cansancio y presenta alta repetitividad en sus resultados, mientras que la técnica manual por el técnico experto es subjetiva debido a diferentes juicios de una persona a otra y propensa a errores debido a estrés visual y cansancio del técnico experto, dando como resultado decisiones imprecisas y subjetivas.

REFERENCIAS

- [1] Centro de investigación económica y social, Fedesarrollo. *Políticas para el desarrollo de la agricultura en Colombia*, 2013 [En línea] http://www.fedesarrollo.org.co/wp-content/uploads/2012/08/Pol%C3%ADticas-para-el-desarrollo-de-la-agricultura-en-Colombia-Libro-SAC_Web.pdf
- [2] Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Corpoica, Manual de manejo cosecha y pos-cosecha de granadilla. *Corpoica*, 62-68, 2008.
- [3] Ministerio de agricultura y desarrollo rural, *Plan frutícola nacional de Colombia*, 5 de junio de 2006 [En línea] http://www.frutasyhortalizas.com.co/archivos/biblioteca/biblioteca_18_DIAGNOSTICO%20FRUTICOLA%20NACIONAL.pdf
- [4] Legiscomex.com, Inteligencia de mercados/Exportación de frutas exóticas colombianas *Uchuvas y gulupa, las frutas más vendidas en mercados internacionales*, 15 de mayo de 2013 [En línea] <http://www.legiscomex.com/BancoMedios/Documentos%20PDF/estudio-frutas-exoticas-colombia-completo.pdf>
- [5] Cubero, S., Aleixos, N., Moltó, E., Gómez-Sanchis, J., & Blasco, J. Advances in Machine Vision Applications for Automatic Inspection and Quality Evaluation of Fruits and Vegetables. *Food Bioprocess Technol*, 487-504, 2010.
- [6] Kneea, M., Hatfielda, S., & Smitha, S. Evaluation of various indicators of maturity for harvest of apple fruit intended for long-term storage. *Journal of Horticultural Science*, 403-411, 1989.
- [7] Tadhg, B., & Da-Wen, S. Inspection and grading of agricultural and food products by computer

- vision systems—a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 193-213, 2002.
- [8] Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. *Digital image processing*, 2008.
- [9] García Mateos, G. *Procesamiento audiovisual*, 5 de junio de 2006 [En línea] <http://alereimondo.no-ip.org/OpenCV/uploads/41/tema3.pdf>
- [10] Xu, R., & Wunsch, D. Clustering Algorithms in Biomedical Research: A review. *IEEE Reviews In Biomedical Engineering*, 120-154, 2010.
- [11] Solem, J. *Programming computer vision with python*. Unite states of America: O'Reilly median, inc., 2013.
- [12] Otsu, N., A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 62-66, 1979.
- [13] OpenCv. *Procesamiento de imágenes OpenCv*, 5 de junio de 2006 [En línea] <http://docs.opencv.org/2.4/modules/imgproc/doc/histograms.html>

