

ORIGINAL

Classification of tomato ripeness in the agricultural industry using a computer vision system

Clasificación de la madurez de tomates en la industria agrícola mediante un sistema de visión artificial

Mateo Valencia Buitrago¹ , Olga Lucía Torres Vargas² 

¹Universidad del Quindío, Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingeniería. Colombia.

²Universidad del Quindío, Ingeniería de Alimentos, Instituto Interdisciplinario de las Ciencias. Colombia.

Citar como: Valencia Buitrago M, Torres Vargas OL. Classification of tomato ripeness in the agricultural industry using a computer vision system. LatIA. 2024; 2:105. <https://doi.org/10.62486/latia2024105>

Recibido: 05-02-2024

Revisado: 11-05-2024

Aceptado: 15-08-2024

Publicado: 16-08-2024

Editor: Prof. Dr. Javier González Argote 

ABSTRACT

Machine vision systems (SVA) occupy an important place in the field of food and agriculture, these techniques are performed in situ, are efficient, non-invasive, time-saving and more economical than traditional techniques. Tomatoes (*Solanum lycopersicum*) are extensively cultivated throughout the world, are essential in the agricultural and culinary fields and are recognized for their beneficial contributions to health. Lack of knowledge about fruit maturity, proper harvesting and postharvest handling are factors responsible for large postharvest losses. Therefore, the objective of this research was the construction of a VAS that allows establishing relationships between color and maturity stage of the Chonto Roble F1 tomato. The VAS built is composed of hardware and software duly synchronized through the application of computer vision algorithms in Python 3.9 software that allow it to perform the acquisition and segmentation of the image and present the user with the color coordinates in the CIEL*a*b* system. Finally, color measurements were performed on tomato samples at different stages of ripening in the VAS and a HunterLab ColorQuest XE (EHL) spectrophotometer. The results obtained indicated that there are no significant differences in both measurement systems for L* values, the changes produced in b* and a* were statistically significant for tomato samples. The results obtained indicated the potential use of the constructed VAS for the determination of the degree of maturity of tomatoes in real time, in a non-invasive and low-cost way.

Keywords: Image Analysis; CIEL*a*b*; Spectrophotometer; Machine Vision System; Tomato.

RESUMEN

Los sistemas de visión artificial (SVA) ocupan un lugar importante en el campo de la alimentación y la agricultura, estas técnicas se realizan in situ, son eficientes, no invasivas, ahorran tiempo y son más económicas que las técnicas tradicionales. Los tomates (*Solanum lycopersicum*), son cultivados extensivamente en todo el mundo, son esenciales en el ámbito agrícola y culinario y son reconocidos por sus aportes benéficos a la salud. La falta de conocimiento sobre la madurez del fruto, una cosecha adecuada y el manejo postcosecha son factores responsables de grandes pérdidas postcosecha. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue la construcción de un SVA que permite establecer relaciones entre el color y el estado de madurez del tomate Chonto Roble F1. El SVA construido está compuesto por un hardware y un software debidamente sincronizados mediante la aplicación de algoritmos de visión computacional en el software Python 3.9 que le permiten realizar la adquisición y segmentación de la imagen y presentar al usuario las coordenadas de color en el sistema CIEL*a*b*. Finalmente fueron realizadas medidas de color en muestras de tomate con diferentes estados de maduración en el SVA y un espectrofotómetro HunterLab ColorQuest XE (EHL). Los resultados obtenidos indicaron que no hay diferencias significativas en ambos sistemas de medida para los valores de L*, los cambios producidos en b* y a* fueron estadísticamente significativos para las muestras de

tomate. Los resultados obtenidos indicaron el potencial uso del SVA construido, para la determinación el grado de madurez de tomates en tiempo real, de una forma no invasiva y a bajo costo.

Palabras clave: Análisis de Imagen; CIEL*a*b*; Espectrofotómetro; Sistema de Visión Artificial; Tomate.

INTRODUCCIÓN

Los tomates, son cultivados extensivamente en todo el mundo, son valiosos no solo por el sustento que brindan a los agricultores y consumidores sino también por sus beneficios para la salud, contienen vitamina C y licopeno (Ciptaningtyas et al., 2022), este último puede reducir el riesgo de cáncer de mama y próstata, osteoporosis, enfermedades cardiovasculares y reducir la presión arterial alta (Przybylska & Tokarczyk, 2022). Sin embargo, la falta de conocimiento sobre la madurez y el manejo de postcosecha, son factores responsables de las enormes pérdidas que sufren los agricultores en la actualidad. La evaluación de la madurez y la calidad del tomate depende en gran medida de las características externas del fruto, su evaluación puede hacerse empleando métodos no invasivos (Ninja & Manuj-Kumar, 2022). Evaluar la madurez y cosechar un producto en la etapa correcta es un arte y difiere de un cultivo a otro, la madurez es un proceso irreversible que afecta directamente a la calidad interna y externa del fruto (Prasad et al., 2018). Durante el cultivo de tomate es común considere seis etapas para la maduración del color del tomate (Etapas de madurez y maduración): verde, quebradizo, torneado, rosado, rojo claro y rojo, además del desarrollo del sabor, la textura y el aroma, estas etapas de maduración en los tomates ocurren desde el invernadero o parcela de cultivo, el transporte, la compra, el estante, la refrigeración hasta el consumo. (Hongli et al., 2023).

Los sistemas electrónicos de visión artificial (SVA) representan una técnica emergente en la alimentación y la agricultura, desempeñan un papel importante en la solución de problemas prácticos de clasificación y reconocimiento automáticos. Estas técnicas han superado el trabajo manual, no son invasivas, ahorran tiempo, son económicas, rigurosas y precisas. Investigaciones utilizando SVA para la evaluación del color en alimentos, se han centrado en la conversión de las imágenes obtenidas mediante el sistema de medida de color RGB al sistema CIEL*a*b* (Larraín et al., 2008), en este campo se han explorado varios enfoques, incluido el examen de los índices de color en relación con la madurez del tomate y el empleo de procesamiento de imágenes. Khan et al. 2011 realizaron estudios para el reconocimiento de madurez de tomate con transformadores convolucionales, Konagaya et al. 2020 monitorearon la calidad del tomate maduro (etapa roja) durante el almacenamiento mediante imágenes de fluorescencia visible inducida por luz ultravioleta, Changxia et al. (2021) formularon un algoritmo de reconocimiento de madurez de tomate basado en una red residual profunda de múltiples niveles, Nassiri et al. (2022) utilizaron la clasificación de lógica difusa en tomates maduros basada en la fusión de propiedades físicas. Sharma et al. (2020) implementaron un índice de maduración para la evaluación basada en el color del comportamiento de maduración de los frutos de tomate. La evaluación del color debe realizarse de manera coherente y objetiva, para obtener resultados fiables y reproducibles que reflejen la percepción humana y puedan realizarse de una manera no invasiva (Wu et al. 2013). Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue la construcción de un SVA que permite establecer relaciones entre las imágenes de color en coordenadas CIEL*a*b* y el estado de madurez del tomate Chonto Roble F1.

MÉTODO

Para el desarrollo de la investigación que se presenta a continuación, se construyó e implementó un sistema de visión artificial (SVA) para clasificar tomates por su estado de madurez, fundamentados en los espacios de color CIEL*a*b* (1986).

Materia prima

Como materia prima fueron utilizados tomate (*Solanum lycopersicum*) variedad chonto Roble F1, cosechados en fincas de la región del Quindío, los cuales representan un importante reglón en la economía del departamento. Los tomates fueron clasificados, visualmente por el color del pericarpio, aplicando los criterios de estados de maduración establecidos por la Normas Técnicas Colombianas ICONTEC, para tomate (NTC 1103- 1). Una vez seleccionados, éstos fueron analizados en el SVA y en EHL.

Sistema de visión artificial (SVA)

Para llevar a cabo el proceso de toma de las imágenes de color en las muestras de tomate fue construido un SVA, utilizando una cámara digital de bajo costo LogiTech PRO C920 Full HD, unidades de procesamiento gráfico (GPU), dispositivos de almacenamiento de datos y un dispositivo de iluminación (serie de LEDs). La programación del sistema de medida hardware fue realizada en el sistema Python 3.9. Ambos sistemas debidamente sincronizados se encargan de presentar al usuario las coordenadas CIEL*a*b* en las muestras de tomate con diferentes días de maduración.

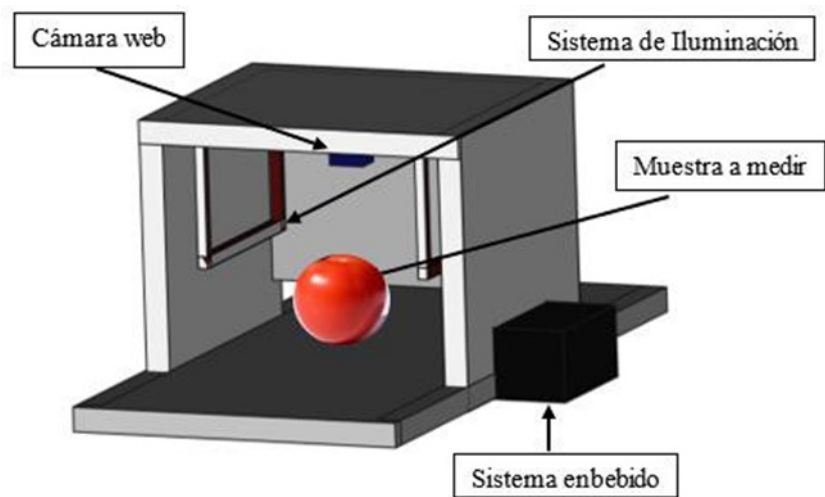


Figura 1. Sistema de Visión Artificial (SVA) para la medición y análisis de color en muestras de tomate

Para la implementación del SVA, se planteó el diseño de un software que permita la calibración de la cámara y la detección del color de los tomates con diferente grado de maduración, siguiendo las etapas que se presentan en la figura 2.



Figura 2. Etapas establecidas en el diseño y construcción del software para el Sistema de Visión Artificial (SVA)

El eje central del SVA está conformado por un sistema embebido, implementado en una Raspberry Pi 4, que ejecuta el sistema operativo Raspberry Pi OS, que se encargan de capturar la imagen, segmentarla, redimensionarla, almacenarla y entregar una respuesta en términos de coordenadas CIEL*a*b* al usuario (Valencia, 2023).

Previa a la captura de la imagen, fue realizada una etapa de calibración. El color fue determinado utilizando una cámara Logitech PRO C920, que ofrece ventajas como la captura de una gran cantidad de información espacial, la capacidad de medir superficies de diversos tamaños, disponibilidad de una amplia gama de modelos a precios más accesibles, y no requieren contacto directo con la superficie a medir. Sin embargo, la información se obtiene en el espacio de color: Rojo, Verde, Azul (RGB) debe transformarse al espacio de color CIEL*a*b*, usando modelos teóricos (Castellanos et al., 2022). Los parámetros y las ecuaciones que se utilizaron en esta etapa se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Caracterización del color en tomate: ecuaciones y equipo especializado

Parametros	Ecuaciones	Equipo de medida de color
Luminosidad: L*	$L^* = 116 (Y^{1/3}/Y_n) - 16$ Ec.(1)	 Espectrofotómetro HunterLab ColorQuest XE (EHL).
Coordenadas cromáticas: a*	$a^* = 500 [(X^{1/3}/X_n) - (Y^{1/3}/Y_m)]$ Ec. (2)	
Coordenadas cromáticas: b*	$b^* = 200 [(Y^{1/3}/Y_n) - (Z^{1/3}/Z_n)]$ Ec. (3)	

Con el propósito de establecer un parámetro de comparación, fueron realizadas medidas de color en el SVA y el EHL a los tomates con diferente grado de maduración (tabla 3). Las coordenadas L^* , a^* , b^* en el sistema EHL fueron tomadas empleando una lámpara D65, apertura de 1 cm de diámetro y un observador estándar 2°, en cinco puntos del pericarpio de cada muestra de tomate y los valores reportados fueron calculados como el promedio de estas medidas. La determinación y expresión del color fue realizada con base a las coordenadas CIEL*a*b* (tabla 1), y a los valores de reflectancia (CIE, 1986) obteniendo los parámetros de Luminosidad (L), rojo-verde (a^*), amarillo-azul (b^*) directamente del equipo.

Análisis estadístico

Con el propósito de establecer si existen diferencias entre las mediciones de color realizadas por el SVA y el EHL, fue realizado un análisis de varianza (ANOVA- Multifactorial) por diferencia mínima significativa (LSD) con valor $p \leq 0,05$, con tres factores de interacción, tomando como variables de respuesta las coordenadas L^* , a^* , b^* , y como factor: el grado de maduración. Este análisis fue realizado utilizando el paquete estadístico Statgraphic ® Plus, Centurion.15.2.12 XV (Numagistics Ltda).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez finalizadas la construcción del sistema electrónico y la programación del sistema de medida hardware del SVA en su forma estructural, se construyó un compartimiento para la adquisición de las imágenes, que funciona como la estructura principal del equipo, soporta la muestra de tomate que se va a analizar y los demás componentes, como se puede observar en la figura 1.

La imagen es capturada mediante la cámara Logitech PRO C920 y sometida a un proceso de análisis para reducir el ruido y mejorar su calidad, también fueron realizados ajustes de contraste y corrección de color, para optimizar su utilidad en análisis posteriores. Finalizada la etapa anterior, fue realizada la segmentación de la imagen con el propósito de identificar la región de interés (ROI) dentro de la imagen de tomate obtenida. Esta segmentación implicó la utilización de técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes, como umbralización y detección de características que permitieran distinguir la ROI del fondo y otros elementos irrelevantes. La región de interés identificada se convierte en el foco principal de análisis y aplicaciones posteriores, permitiendo la detección de características, reconocimiento de patrones y toma de decisiones basadas en una información visual precisa y relevante.

La imagen adquirida es procesada por el software Python 3.9 y convertida del espacio RGB al espacio CIEL*a*b*, utilizando las ecuaciones (1), (2) y (3) que se presentan en la tabla 1. El sistema computa la media de las coordenadas Luminosidad (L^*), rojo-verde (a^*), amarillo-azul (b^*). Finalmente, el usuario podrá visualizar en la interfaz ambas componentes enfrentadas a la imagen original de tomate, esta información es almacenada en el computador.

En la tabla 2 se presentan las coordenadas L^* , a^* y b^* obtenidas en los epicarpios de las 6 muestras de tomates analizadas con diferentes grados de maduración en el SVA y el EHL. El proceso de maduración del tomate se caracteriza por una alta síntesis de carotenoides que genera cambios en las coordenadas L^* , a^* y b^* (Artés-Calero & Artés- Hernández, 2004). La coordenada a^* presentó cambios significativos, las muestras 1 y 2 presentaron valores negativos (color verde) que progresivamente fueron positivos (color rojo). López-Camelo et al., (2003) señalan que durante la maduración del tomate inicialmente se sintetiza el fitoeno (incoloro), para posteriormente dar lugar al ζ -caroteno (amarillo pálido), licopeno (rojo), β -caroteno (anaranjado) y xantofilas y carotenoides hidroxilados (amarillos); como podemos observar en las muestras 3 y 4.

La síntesis de pigmentos amarillentos precede a la de los rojizos, pero la masiva acumulación de éstos últimos enmascara a los primeros. Cuando los pigmentos rojos comenzaron a ser sintetizados ocurrió una disminución de los valores de la coordenada L^* que indicó un oscurecimiento o disminución de la luminosidad como se puede observar en las muestras 5 y 6 (tabla 3). Los cambios en la coordenada b^* no fueron significativos.

Los resultados obtenidos permitieron evaluar el uso del SVA construido, para la determinación del color como un parámetro de clasificación del estado de maduración en tomates de una forma no invasiva, económica y en tiempo real. Esta herramienta tecnológica podrá ser utilizada por los agricultores para inspeccionar, clasificar, estimar la madurez de los productos hortofrutícolas y determinar el tiempo óptimo de recolección de los frutos, aumentando su productividad y fortaleciendo la cadena hortofrutícola colombiana.

En la tabla 3 se presentan los valores para las coordenadas L^* , a^* y b^* obtenidas en los SVA y el EHL para tomates con diferentes niveles de maduración. Los valores obtenidos no presentan diferencias significativas, indicando el uso potencial del SVA en la selección de los tomates por el grado de madurez.

Tabla 2. Imágenes obtenidas por el SVA para los diferentes estados de maduración de tomate variedad chonto Roble F1.

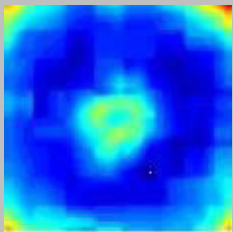
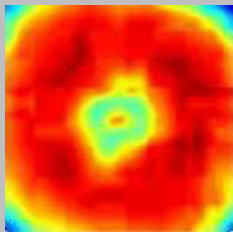
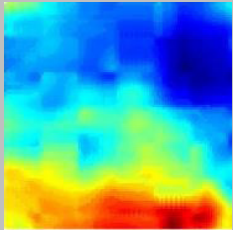
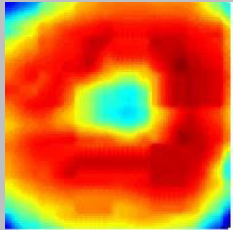
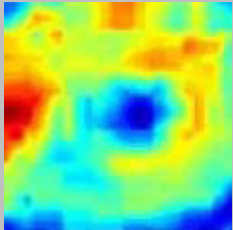
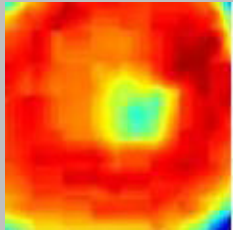
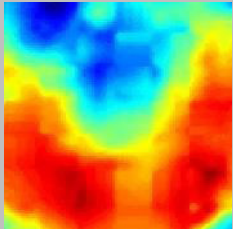
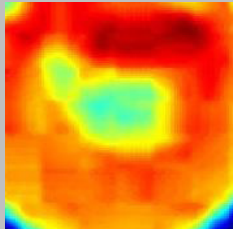
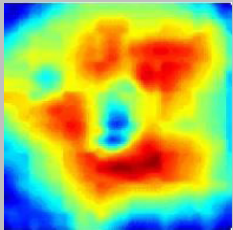
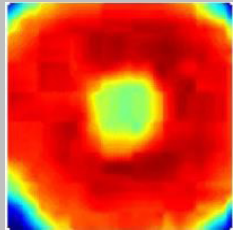
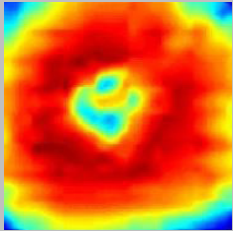
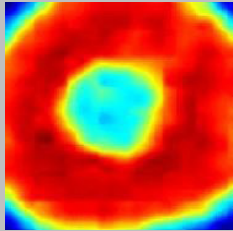
Muestras	Coordenadas CIEL*a*b*	
		
1	a* -10,06	b* 70,73
		
2	a* -5,68	b* 71,25
		
3	a* 12,56	b* 72,25
		
4	a* 21,64	b* 73,80
		
5	a* 31,47	b* 73,28
		
6	a* 42,93	b* 70,41

Tabla 3. Resultados para las coordenadas L*, a* y b* obtenidas en los SVA y el EHL para tomates con diferentes niveles de maduración

Sistema de Visión Artificial				Espectrofotómetro HunterLab		
Muestras	L*	a*	b*	L*	a*	b*
1	85,42±0,35	-10,06±0,16	70,73±0,68	82,19±0,44	-9,06±0,09	68,21±0,08
2	81,58±0,19	-5,68±0,13	71,25±1,05	80,71±0,70	-6,25±0,72	67,17±1,20
3	78,99±0,59	12,56±0,98	72,25±0,74	76,14±0,04	8,56±0,95	69,54±0,91
4	70,23±0,52	21,68±0,53	73,80±0,60	69,4±0,06	20,15±0,90	68,70±0,08
5	66,05±0,27	31,47±0,31	73,28±0,94	65,97±0,19	33,62±1,06	69,12±0,02
6	62,28±0,03	43,93±0,07	70,41±0,70	60,57±1,05	44,08±1,53	68,32±0,21

CONCLUSIONES

La metodología empleada por el SVA desarrollado, permite analizar el color global de la muestra y su heterogeneidad, captura, procesa, analiza las imágenes y evalúa el color de forma no invasiva, utilizando las coordenadas CIEL*a*b*. Este sistema ofrece la posibilidad de analizar toda la superficie del producto, sus características y defectos, permitiéndole estimar el estado de madurez de forma rápida, simple y a un bajo costo, factores que lo diferencian de un espectrofotómetro comercial. Las imágenes obtenidas le permiten al agricultor clasificar el fruto que este inmaduro, maduro y demasiado maduro, para su posterior comercialización o transformación agroindustrial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Artés-Calero, F., Artés-Hernández, F. 2004. Tratamientos postrecolección del tomate fresco. Tendencias e innovaciones, Capítulo 10, pp. 109-120. In: Tomates. Producción y comercio. Ediciones de Horticultura S.L. Reus, España. ISBN 84- 87729-48-7.
2. Castellanos Tolosa, N y Sánchez Jiménez, M. (2022). Desarrollo de carne de hamburguesa a base de harina de grillo. Universidad de los Andes. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/55654>.
3. Changxia Li, Xuemei Hou, Nana Qi, Huwei Liu, Yihua Li, Dengjing Huang, Chunlei Wang, Weibiao Liao. (2021). Insight into ripening-associated transcription factors in tomato: A review, *Scientia Horticulturae*, Volume, 288, 110363. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110363>
4. Ciptaningtyas, D., N. Benyakart, H. Umehara, M. Johkan, N. Nakamura , M. Nagata , T. Orikasa , M. Thammawong , T. Shiina. (2022) Modelado del patrón de maduración metacrónica del tomate verde maduro afectado por el cultivo y la temperatura de almacenamiento *Ciencia. Rep.*, 12, pág. 8241 , <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12219-z>. CIE (1986) *Colorimetry*. 2nd Ed. CIE 15.2: Viena
5. Larraín, R., Schaefer, D., Reed, J. (2008). Use of digital images to estimate CIE color coordinates of beef. *Food Research International*, 41(4), 380-385.
6. Hongli Li, Gangshuai Liu, Daqi Fu. (2023). Transcriptional regulation of tomato fruit quality, *Postharvest Biology and Technology*, Volume 202, 112393, <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112393>.
7. López-Camelo, A.L., Gómez, P., Artés, F. (2003). Use of a* and b* colour parameters to assess the effect of some growth regulators on carotenoid biosynthesis during postharvest tomato ripening. *Acta Horticulturae* 599:305-308.
8. Nassiri, S. M., Tahavoor, A., & Jafari, A. (2022). Fuzzy logic classification of mature tomatoes based on physical properties fusion. *Information Processing in Agriculture*, 9(4), 547-555. DOI: 10.1016/j.inpro.2022.100038
9. Ninja Begum, Manuj Kumar Hazarika. (2022). Maturity detection of tomatoes using transfer learning, *Measurement: Food*, Volume 7, 100038. <https://doi.org/10.1016/j.meaf.2022.100038>.
10. Instituto Colombiano de Norma Técnica y Certificación. Industria Alimentaria: Tomate de Mesa. Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1995. Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1976. (Norma Técnica Colombiana; NTC- 1103-1).

11. Khan, A., Hassan, T., Shafay, M., Fahmy, I., Werghe, N., Mudigansalage, S., & Hussain, I. (2023). Tomato maturity recognition with convolutional transformers: Scientific Reports. Sci. Rep., 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50129-w>
12. Konagaya, Keiji., Dimas Firmanda Al Riza, Sen Nie, Minoru Yoneda, Takuya Hirata, Noriko Takahashi, Makoto Kuramoto, Yuichi Ogawa, Tetsuhito Suzuki, Naoshi Kondo. (2020), Monitoring mature tomato (red stage) quality during storage using ultraviolet-induced visible fluorescence image, Postharvest Biology and Technology, Volume 160,111031. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.111031>.
13. Prasad, K., Sanu Jacob, Mohammed Wasim Siddiqui, Chapter 2 - Fruit Maturity, Harvesting, and Quality Standards, Editor(s): Mohammed Wasim Siddiqui, Preharvest Modulation of Postharvest Fruit and Vegetable Quality, Academic Press, 2018, Pages 41-69, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809807-3.00002-0>.
14. Przybylska, S., & Tokarczyk, G. (2022). Lycopene in the Prevention of Cardiovascular Diseases. International journal of molecular sciences, 23(4), 1957. <https://doi.org/10.3390/ijms23041957>
15. Sharma, L. K. Ramesh , V. Paul , R. Pandey.(2020). Índice de maduración: un mejor parámetro para la evaluación basada en el color del comportamiento de maduración de los frutos de tomate. Fisiol vegetal. Rep. , 25, págs . 171-177 , <https://doi.org/10.1007/s40502-020-00499-4>
16. Valencia, M. (2023).Desarrollo de un sistema de visión artificial para el monitoreo de los cambios de color en lomos de bovino. [Tesis,Universidad del Quindío]. bdigital.uniquindio.edu.co.
17. Wu, D., Sun, D. (2013). Colour measurements by computer vision for food quality control A review. Trends in Food Science and Technology, 29(1), 5-20. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.08.004>.

FINANCIACIÓN

No existe financiación para el presente trabajo.

CONFLICTO DE INTERES

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Mateo Valencia Buitrago, Olga Lucía Torres Vargas.

Investigación: Mateo Valencia Buitrago, Olga Lucía Torres Vargas.

Metodología: Mateo Valencia Buitrago, Olga Lucía Torres Vargas.

Administración del proyecto: Mateo Valencia Buitrago, Olga Lucía Torres Vargas.

Redacción-borrador original: Mateo Valencia Buitrago, Olga Lucía Torres Vargas.

Redacción-revisión y edición: Mateo Valencia Buitrago, Olga Lucía Torres Vargas.