

<https://doi.org/10.69639/arandu.v11i2.276>

Modelado cinético del cambio de color en mango utilizando OpenCV y Python

Kinetic modeling of color change in mango using OpenCV and Python

Diana Martínez-Hernández

martinezhernandezdiana681@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0004-2794-296X>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Hidalgo – México

Elizabeth Contreras López

elizac@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-9678-1264>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Hidalgo – México

Jesús Guadalupe Pérez-Flores

jesus_perez@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-9654-3469>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Hidalgo – México

Laura García Curiel

laura.garcia@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0001-8961-2852>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Hidalgo – México

Emmanuel Pérez-Escalante

emmanuel_perez@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-4268-9753>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Hidalgo – México

Israel Oswaldo Salinas-Ocampo

iocampo@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-5507-4889>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Hidalgo – México

Luis Guillermo González-Olivares

lgonzales@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-4707-8935>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Hidalgo – México

Artículo recibido: 20 julio 2024

-

Aceptado para publicación: 26 agosto 2024
Conflictos de intereses: Ninguno que declarar

RESUMEN

El mango Ataúlfo es altamente valorado por su color amarillo intenso, el cual es un indicador clave de su madurez y calidad. El objetivo de este estudio fue modelar los cambios de color en el mango Ataúlfo durante el almacenamiento, utilizando modelos cinéticos y técnicas de procesamiento de imágenes con OpenCV en Python, para cuantificar y describir el proceso de cambio de color y así mejorar la predicción de su vida útil y calidad. Para ello, se capturaron imágenes del mango en diferentes días de almacenamiento, se procesaron para extraer el valor del canal Hue del espacio de color HSV, y se aplicaron modelos cinéticos de diferentes órdenes para modelar los datos experimentales. Los principales resultados mostraron que el modelo de conversión fraccional de primer orden fue el que mejor describió la dinámica de cambio de color, con un R^2 de 0.93 y un MSE de 2.11, superando a los modelos de orden cero, primer orden, y segundo orden, que mostraron ajustes menos precisos. Los hallazgos subrayan la importancia de utilizar modelos más complejos para capturar adecuadamente la dinámica del cambio de color en productos frescos como el mango Ataúlfo, siendo esencial para optimizar su almacenamiento y mejorar su comercialización.

Palabras clave: mango, cambio de color, modelado cinético, procesamiento de imágenes, opencv

ABSTRACT

The Ataulfo mango is highly valued for its vibrant yellow color, a key indicator of its ripeness and quality. This study aimed to model the color changes in Ataulfo mangoes during storage using kinetic models and image processing techniques with OpenCV in Python, aiming to quantify and describe the color change process to improve the prediction of shelf life and quality. Images of the mangoes were captured over several storage days and processed to extract the Hue channel value from the HSV color space. Different kinetic models were applied to fit the experimental data. The main findings indicated that the first-order fractional conversion model best described the color change dynamics, with an R^2 of 0.93 and an MSE of 2.11, outperforming zero-order, first-order, and second-order models, which showed less accurate fits. These results highlight the importance of using more complex models to accurately capture the color change dynamics in fresh products like Ataulfo mangoes, essential for optimizing storage conditions and enhancing commercialization.

Keywords: mango, color change, kinetic modelling, image processing, opencv

Todo el contenido de la Revista Científica Internacional Arandu UTIC publicado en este sitio está disponible bajo licencia Creative Commons Attribution 4.0 International. 

INTRODUCCIÓN

El mango Ataúlfo es apreciado por su color amarillo intenso, piel delgada, semilla pequeña, y sabor dulce y aromático (Cancino-Vázquez et al., 2020). Su alto contenido de vitamina C preserva el color de la pulpa y evita la oxidación de compuestos fenólicos (Robles-Sánchez et al., 2009). Este mango tiene un perfil de carotenoides único, destacando el β -caroteno, violaxantina y neoxantina (De J. Ornelas-Paz et al., 2010).

México, principal exportador de mangos, considera al Ataúlfo una variedad de gran relevancia económica (A. Quirós-Sauceda et al., 2017). Nutricionalmente, destaca por su alto contenido de compuestos fenólicos, siendo la variedad con mayor cantidad de fenoles totales (Noratto et al., 2010). Durante su maduración, su perfil sensorial mejora, incrementando el aroma, la dulzura y la jugosidad, lo que lo hace muy atractivo para los consumidores (Nassur et al., 2015).

El control de la maduración es clave para mantener la calidad, ya que afecta compuestos bioactivos y antioxidantes (Huang et al., 2018; A. E. Quirós-Sauceda et al., 2019). La actividad antioxidante y el contenido de fenoles totales cambian con la maduración, resaltando la importancia de su monitoreo (Robles-Sánchez et al., 2009). Además, la evolución del aroma, sabor y textura requiere un control preciso para garantizar tanto calidad nutricional como organoléptica (Appiah et al., 2011).

El cambio de color es un indicador clave de maduración en las frutas, asociado con la síntesis y degradación de pigmentos como carotenoides y antocianinas (Duong et al., 2023; Ratprakhon et al., 2020). En el mango Ataúlfo, el paso de verde a amarillo intenso señala madurez y calidad (Adainoo et al., 2022), influenciando la percepción de los consumidores, que asocian colores brillantes con madurez y dulzura (Janurianti et al., 2021). Este cambio también está relacionado con la síntesis de vitamina C y carotenoides, importantes para la salud y el valor nutricional (Da Silva Nunes et al., 2011).

Los métodos tradicionales utilizados para evaluar la madurez de frutas, como la evaluación sensorial y el uso de colorímetros, presentan limitaciones como su naturaleza lenta, sus altos costos, su intensidad de mano de obra y su susceptibilidad a las imprecisiones. En respuesta, se han propuesto sistemas de detección y clasificación basados en máquinas, que ofrecen una mayor eficiencia al aprovechar los avances tecnológicos para analizar atributos de la fruta como el color, la textura, la apariencia física, el tamaño y la forma (Filoteo-Razo et al., 2023; Trinh & Nguyen, 2023). El procesamiento de imágenes, junto con la ciencia de datos, ha revolucionado esta evaluación, permitiendo un análisis preciso de color en frutas y su clasificación por madurez usando algoritmos de aprendizaje automático (Ballester et al., 2009; Castro et al., 2019; De-la-Torre et al., 2019). De hecho, se ha determinado la vida útil de alimentos basados en frutas a través de su color, haciendo uso del procesamiento de imágenes (Contreras-López et al., 2022) y utilizando redes neuronales artificiales (García-Curiel et al., 2023).

OpenCV es una herramienta poderosa para el análisis de color en imágenes. Esta biblioteca de visión por computadora de código abierto ofrece funciones como detección de bordes, segmentación y seguimiento de objetos, lo que la hace ideal para estudios de color (Suresh & Niranjnamurthy, 2021; Viola & Jones, 2001). Python, popular por su flexibilidad, se integra eficientemente con OpenCV para implementar algoritmos de procesamiento de imágenes y análisis de datos, apoyado por bibliotecas como NumPy, SciPy y scikit-learn (Cervera, 2020). Juntas, estas herramientas permiten convertir espacios de color, segmentar regiones y aplicar aprendizaje automático para modelar fenómenos cinéticos en imágenes, ofreciendo un análisis visual integral (García-Curiel et al., 2023).

Los modelos cinéticos son herramientas clave para predecir y controlar los cambios de color en alimentos durante el almacenamiento, permitiendo evaluar la calidad y seguridad alimentaria (Contreras-López et al., 2022; Jaimez-Ordaz et al., 2019). En el mango, estos modelos explican la degradación de clorofila y la síntesis de pigmentos como antocianinas y carotenoides. Al cuantificar la velocidad de estos cambios y los factores que los influyen, los modelos de primer orden, cero orden y conversión fraccional optimizan el control de calidad y conservación, asegurando la aceptabilidad del producto en la industria alimentaria (Xiao et al., 2014).

Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue modelar los cambios de color en el mango Ataúlfo a través de su canal Hue del espacio de color Hue, mediante el ajuste de modelos cinéticos, utilizando técnicas de ciencia de datos y análisis de imágenes digitales con OpenCV en Python, con la finalidad de cuantificar y describir el proceso de cambio de color durante el almacenamiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestras

Las muestras de mango Ataúlfo utilizadas en esta investigación se adquirieron en la central de abastos de Pachuca de Soto, Hidalgo, México. Previo al estudio, los mangos fueron lavados, desinfectados y secados. Dado que el mango es una fruta climatérica sensible al etileno y propensa a daños por frío, no se puede almacenar a temperaturas inferiores a 10-15°C (Tavassoli-Kafrani et al., 2022). Por esta razón, en este estudio los mangos se almacenaron a $25 \pm 1.0^\circ\text{C}$ y 65% de humedad relativa (Kittur et al., 2001).

Captura de imágenes

Se tomaron fotografías del mango Ataúlfo utilizando una cámara digital en diferentes días de almacenamiento (cada 3 días: 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21) bajo condiciones controladas de iluminación en una cabina fotográfica, justo como se describe en investigaciones anteriores (Contreras-López et al., 2022; García-Curiel et al., 2023). Las imágenes fueron almacenadas en formato JPEG para su análisis.

Configuración del entorno de programación

Para asegurar un manejo adecuado de las dependencias y la reproducibilidad del análisis, se creó un entorno virtual aislado con Anaconda, denominado ‘opencv_env’, basado en Python 3.8. Este entorno se configuró para incluir todas las herramientas necesarias para el procesamiento de imágenes, análisis de datos y ajuste de modelos cinéticos. El desarrollo se realizó en Visual Studio Code (v1.92.2), un entorno de desarrollo integrado que facilitó la gestión del proyecto y la edición del código.

El entorno se creó en la terminal del sistema operativo elementary OS 7.1 Horus (basado en Ubuntu 22.04.3 LTS, Linux 6.5.0-44-generic) utilizando el comando ‘conda create --name opencv_env python=3.8’ y se activó con ‘conda activate opencv_env’, lo que permitió aislar las bibliotecas específicas del proyecto. Se instalaron las librerías requeridas utilizando los canales ‘conda-forge’ y ‘anaconda’, incluyendo OpenCV, Seaborn, Matplotlib, SciPy, scikit-learn, Numpy, Pandas, Joblib, Pathlib2 y Glob2.

Una vez configurado el entorno, se creó el archivo ‘color_mangos.ipynb’, que integra la segmentación de imágenes, la extracción de valores del canal Hue en el espacio de color HSV (Hue, Saturation, Value) y el ajuste de los modelos cinéticos.

El *script* ejecutado para generar los resultados presentados en este artículo, fue subido a un repositorio en GitLab. Estará disponible para su descarga, análisis e implementación por parte de otros investigadores y desarrolladores interesados en reproducir o adaptar la metodología descrita (https://gitlab.com/FoodChem-DataSci-Lab/modelado_cinetico_color_mango).

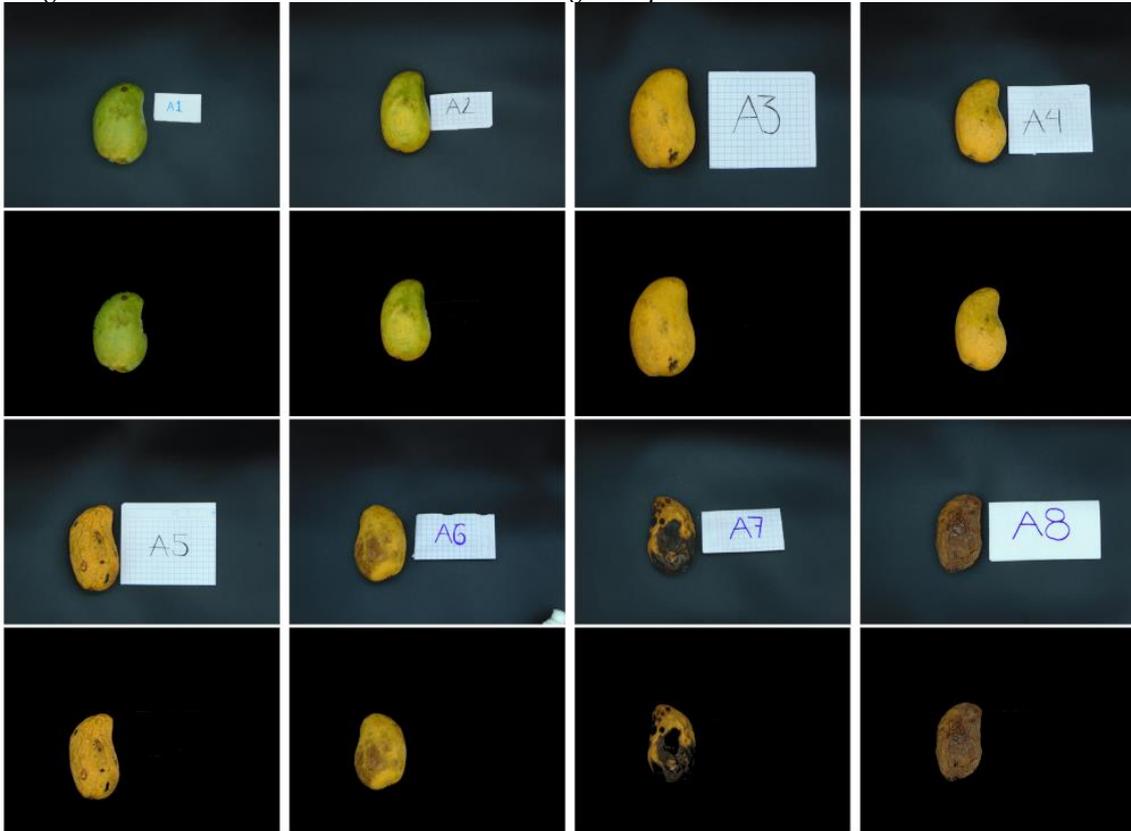
Procesamiento de imágenes con OpenCV

Para extraer la información de color, las imágenes se procesaron utilizando la librería OpenCV (‘cv2’), ampliamente empleada en tareas de visión por computadora. Primero, las imágenes se convirtieron del espacio de color BGR, con el que OpenCV trabaja por defecto, al espacio de color HSV (Hue, Saturation, Value) mediante la función ‘cv2.cvtColor’. El canal Hue (H), que representa la tonalidad dominante, es especialmente relevante para el análisis del color (Salinas-Moreno et al., 2021).

Se utilizaron técnicas de segmentación de imágenes mediante la función ‘cv2.inRange’, que permitió definir un rango de valores HSV para aislar las áreas de interés en la imagen. En este caso, se identificaron los colores asociados al mango en distintas etapas de maduración, incluyendo las regiones más oscuras del fruto. Esto facilitó la identificación y extracción de las áreas relevantes para el análisis posterior. Las imágenes segmentadas se guardaron en formato PNG utilizando la función ‘cv2.imwrite’, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1

Fotografías del mango Ataulfo en distintas etapas de maduración, junto con las imágenes procesadas mediante segmentación con OpenCV para aislar las áreas relevantes del fruto. Estas imágenes ilustran la evolución del color a lo largo del período de almacenamiento.



Análisis numérico y ajuste de modelos cinéticos con SciPy

Para modelar los cambios de color, se utilizaron ecuaciones cinéticas de diferentes órdenes: cero, primero, segundo, conversión fraccional de orden cero y conversión fraccional de primer orden (Ecuaciones (1) a (5)) (Contreras-López et al., 2022; García-Curiel et al., 2023; Xiao et al., 2014).

$$H(t) = C_0 - kt \quad (1)$$

$$H(t) = C_0 e^{-kt} \quad (2)$$

$$H(t) = \frac{C_0}{1 + ktC_0} \quad (3)$$

$$H(t) = C_0(1 - kt)^\alpha \quad (4)$$

$$H(t) = C_0 e^{-kt^\alpha} \quad (5)$$

Donde $H(t)$ es el valor de Hue en el tiempo t , C_0 es el valor inicial de Hue y k es la constante de velocidad.

La función ‘curve_fit’ de la librería SciPy (‘scipy.optimize’) se utilizó para ajustar estas ecuaciones a los datos experimentales, estimando los parámetros cinéticos k , C_0 y α (en los

modelos de conversión fraccional). El ajuste de estos modelos permitió obtener una representación matemática del cambio de color en los mangos a lo largo del tiempo, lo que facilitó la cuantificación y análisis del proceso de maduración durante el almacenamiento.

Visualización de datos con Matplotlib y Seaborn

La visualización de los resultados se realizó utilizando las librerías Matplotlib ('matplotlib.pyplot') y Seaborn ('sns'). Seaborn es una librería basada en Matplotlib que facilita la creación de gráficos estadísticos atractivos y personalizados. Se generaron gráficos de línea superpuestos sobre los gráficos de dispersión para comparar los valores observados del canal Hue con los predichos por los modelos cinéticos. Además, se incluyeron gráficos de dispersión con los puntos de datos individuales coloreados según sus valores de Hue convertidos a RGB, lo que proporcionó una representación visual del cambio de color. Estos gráficos pueden ser observados en la Figura 2.

Evaluación del ajuste de los modelos con scikit-learn

Para evaluar la precisión y adecuación de los modelos cinéticos ajustados a los datos experimentales, se emplearon dos métricas: el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (MSE), calculados con la biblioteca scikit-learn ('sklearn.metrics'), utilizando las funciones 'r2_score' y 'mean_squared_error'. Estas métricas cuantificaron la calidad del ajuste y permitieron comparar la capacidad predictiva de los diferentes modelos cinéticos evaluados. Con estos resultados se identificó el modelo que mejor describía la dinámica de cambio de color en los mangos Ataúlfo durante el almacenamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 presenta un resumen del análisis de los cambios de color en el mango Ataúlfo, evaluados en función de los cambios en el canal Hue del espacio de color HSV. Los parámetros de los modelos cinéticos descritos en las Ecuaciones 1 a 5 se detallan en la misma tabla, junto con las métricas R^2 y MSE, que son indicadores del ajuste de los modelos evaluados a los datos experimentales.

Tabla 1

Resumen de modelos cinéticos ajustados, coeficientes de determinación (R^2) y errores cuadráticos medios (MSE) para el modelado del cambio de color (Hue) en mango Ataúlfo.

Modelo	Ecuación	R^2	MSE
Orden cero	$H(t) = 31.09 - 0.73461t$	0.83	5.28
Primer orden	$H(t) = 32.21e^{-0.033075t}$	0.87	4.03
Segundo orden	$H(t) = \frac{33.36}{1 + 0.0014408t}$	0.90	2.95

Conversión fraccional de orden cero	$H(t) = 32.21(1 - 7.1962 \times 10^{-6}t)^{4595.86}$	0.87	4.03
Conversión fraccional de primer orden	$H(t) = 34.77e^{-0.11877t^{0.58}}$	0.93	2.11

Entre los modelos evaluados, el de conversión fraccional de primer orden demostró el mejor desempeño, con un R² de 0.93 y un MSE de 2.11, lo que indica un ajuste preciso a los datos experimentales. Este modelo capturó de manera más efectiva la complejidad del cambio de color en el mango, gracias a la inclusión de un exponente fraccional (α), que proporcionó mayor flexibilidad al modelar procesos no lineales.

El modelo de segundo orden también presentó un buen ajuste con un R² de 0.90 y un MSE de 2.95, lo que sugiere que la variación del canal Hue siguió una dinámica que puede estar influenciada por interacciones cuadráticas con el tiempo. Por otro lado, los modelos de primer orden y de conversión fraccional de orden cero mostraron un ajuste razonable pero no óptimo, ambos con un R² de 0.87. Estos resultados indican que, aunque capturan algunos aspectos del cambio de color, no son tan precisos como los modelos de segundo orden y de conversión fraccional de primer orden.

El modelo de orden cero, aunque el más simple, presentó el menor ajuste con un R² de 0.83 y un MSE de 5.28, indicando que una aproximación lineal es insuficiente para describir adecuadamente la evolución del color en el mango Ataúlfo durante el almacenamiento a través de los valores del canal Hue.

Adicionalmente, la Figura 2 ofrece una representación visual de los diferentes modelos cinéticos ajustados a los datos experimentales sobre la evolución del canal Hue en mango Ataúlfo durante el almacenamiento. En la Figura 2a, se presentan los datos experimentales sin modelar, revelando una tendencia general decreciente en el canal Hue, aunque con variaciones no lineales. Las Figuras 2b y 2c muestran los ajustes realizados con modelos de orden cero y primer orden, respectivamente, que intentan describir esta tendencia mediante enfoques lineales y exponenciales. Sin embargo, ambos modelos no logran capturar adecuadamente la complejidad de los datos, como lo refleja la notable dispersión alrededor de la línea de ajuste, respaldada por sus valores de R² y MSE.

En la Figura 2d, el modelo de segundo orden mejora el ajuste al seguir más de cerca la curva de los datos, lo que sugiere la relevancia de considerar interacciones cuadráticas. Sin embargo, las Figuras 2e y 2f muestran que los modelos de conversión fraccional de orden cero y de primer orden proporcionan un ajuste superior, siendo este último el más preciso al describir la dinámica del cambio en el canal Hue. Este modelo captura tanto la tendencia general como las variaciones no lineales observadas en el proceso de maduración. Estudios previos también han

demostrado la eficacia del modelo de conversión fraccional de primer orden para predecir alteraciones de color en alimentos durante el almacenamiento (Buvé et al., 2018; Contreras-López et al., 2022; Da Silva Simão et al., 2022; Ochoa et al., 2001; Sonar et al., 2019), lo que respalda la capacidad de este enfoque para describir dinámicas complejas en productos alimentarios en donde el cambio de color es el atributo crítico de calidad.

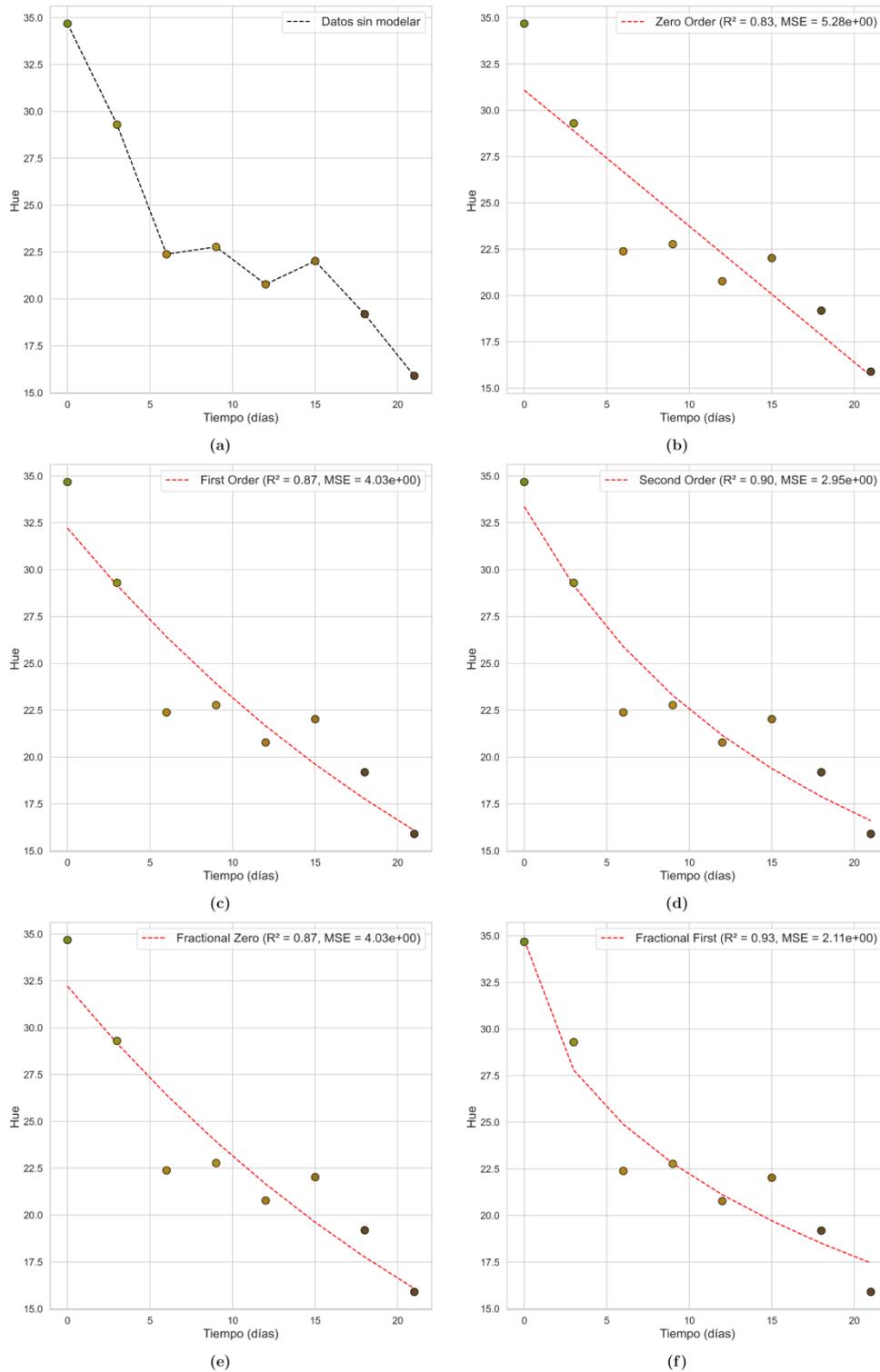
La información combinada en la Tabla 1 y la Figura 2 resalta que los modelos más complejos, como el de conversión fraccional de primer orden, son los más precisos para describir los cambios de color en el mango Ataúlfo evaluados a través del canal Hue bajo condiciones de almacenamiento. Este modelo proporciona una representación más fiel de los datos, lo cual es clave para aplicaciones prácticas en la predicción de la vida útil y calidad del producto. La superioridad de los modelos no lineales se atribuye a la complejidad de la dinámica del cambio de color en el mango, influenciada por la degradación de clorofila, la síntesis de carotenoides y la acumulación de pigmentos como el β -caroteno y la vitamina C (Nunes et al., 2007; Zhang et al., 2024). Estos modelos capturan con mayor precisión la interacción de estos procesos bioquímicos durante la maduración del mango (Ayustaningwarno et al., 2020; Corzo & Álvarez, 2014).

Investigaciones han demostrado que recubrimientos como quitosano, goma arábica, almidón de yuca y ácido cítrico pueden preservar la calidad del mango, modulando la maduración y la actividad enzimática (Chiumarelli et al., 2010; Rastegar et al., 2019; Saikaew et al., 2023; Zhu et al., 2008). Estos recubrimientos influyen en la permeabilidad de gases y la humedad, afectando así la velocidad del cambio de color y la retención de compuestos bioactivos (Chaux-Gutiérrez et al., 2017; Vilvert et al., 2023).

Los resultados de este estudio podrían aplicarse en la evaluación de la vida útil de productos basados en frutas o en productos en donde el color sea un atributo crítico de calidad. En futuras investigaciones sobre el cambio de color en productos vegetales, la integración de modelos cinéticos de conversión fraccional con tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial y la monitorización en tiempo real, ofrecería una vía prometedora. Estos modelos, una vez validados en condiciones reales de almacenamiento, permitirían un monitoreo continuo y preciso de los cambios de color durante la distribución, reduciendo el desperdicio de alimentos y mejorando la eficiencia en la cadena de suministro mediante la predicción anticipada de variaciones indeseadas en la calidad.

Figura 2

Gráficos de dispersión de la evolución del canal Hue del mango Ataúlfo en función del tiempo. Las líneas rojas representan los modelos cinéticos utilizados: (a) Datos sin modelar, (b) modelo de orden cero, (c) modelo de primer orden, (d) modelo de segundo orden, (e) modelo de conversión fraccional de orden cero, (f) modelo de conversión fraccional de primerorden.



CONCLUSIONES

Este estudio logró modelar eficazmente los cambios de color en el mango Ataúlfo durante el almacenamiento, en función de su canal Hue, utilizando técnicas de procesamiento de imágenes con OpenCV y modelos cinéticos de distintos órdenes. El modelo de conversión fraccional de primer orden demostró ser el más adecuado, capturando con precisión la complejidad de la dinámica de color. Estos resultados subrayan la capacidad de los modelos cinéticos avanzados para describir de manera detallada los procesos de maduración en productos frescos, lo cual es esencial para mejorar la predicción de la vida útil y optimizar la calidad del producto.

El enfoque utilizado en este estudio, tiene un gran potencial para ser integrado con tecnologías emergentes como la inteligencia artificial y el Internet de las cosas. Al combinar estos métodos con algoritmos de aprendizaje automático, es posible desarrollar sistemas más avanzados que modelen y predigan con mayor precisión los cambios de color y la calidad en tiempo real. Por ejemplo, cámaras inteligentes conectadas a una red de Internet de las cosas podrían capturar imágenes de frutas en diferentes puntos de la cadena de suministro, mientras que modelos de inteligencia artificial entrenados con grandes conjuntos de datos podrían analizar estos cambios al instante, ajustando parámetros de almacenamiento para optimizar la calidad del producto en cada etapa. Esta integración permitiría automatizar y mejorar significativamente el control de calidad en la agroindustria, además de que permitiría una toma de decisiones más informada y en tiempo real, aumentando la eficiencia y reduciendo el desperdicio de alimentos. Este enfoque holístico, que une la potencia del procesamiento de imágenes con la inteligencia artificial y el Internet de las cosas, representa un paso importante hacia la agricultura 4.0, donde la innovación tecnológica maximiza la sostenibilidad y rentabilidad de la producción alimentaria.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por el soporte brindado. Finalmente, los autores dedican esta investigación a la memoria del Dr. Santiago Ricardo Tomás Filardo Kerstupp (1945-2021).

REFERENCIAS

- Adainoo, B., Crowell, B., Thomas, A. L., Lin, C.-H., Cai, Z., Byers, P., Gold, M., & Krishnaswamy, K. (2022). Physical characterization of frozen fruits from eight cultivars of the North American pawpaw (*Asimina triloba*). *Frontiers in Nutrition*, 9, 936192. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.936192>
- Appiah, F., Kumah, P., & Idun, I. (2011). Effect of ripening stage on composition, sensory qualities and acceptability of keitt mango (*mangifera indica* L.) chips. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 11(5), 5096-5109. <https://doi.org/10.4314/ajfand.v11i5.70439>
- Ayustaningwarno, F., Van Ginkel, E., Vitorino, J., Dekker, M., Fogliano, V., & Verkerk, R. (2020). Nutritional and Physicochemical Quality of Vacuum-Fried Mango Chips Is Affected by Ripening Stage, Frying Temperature, and Time. *Frontiers in Nutrition*, 7, 95. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.00095>
- Ballester, A.-R., Molthoff, J., De Vos, R., Hekkert, B. T. L., Orzaez, D., Fernández-Moreno, J.-P., Tripodi, P., Grandillo, S., Martin, C., Heldens, J., Ykema, M., Granell, A., & Bovy, A. (2009). Biochemical and Molecular Analysis of Pink Tomatoes: Deregulated Expression of the Gene Encoding Transcription Factor SIMYB12 Leads to Pink Tomato Fruit Color. *Plant Physiology*, 152(1), 71-84. <https://doi.org/10.1104/pp.109.147322>
- Buvé, C., Kebede, B. T., De Batselier, C., Carrillo, C., Pham, H. T. T., Hendrickx, M., Grauwet, T., & Van Loey, A. (2018). Kinetics of colour changes in pasteurised strawberry juice during storage. *Journal of Food Engineering*, 216, 42-51. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.08.002>
- Cancino-Vázquez, R., Salvador-Figueroa, M., Hernández-Ortiz, E., Grajales-Conesa, J., & Vázquez-Ovando, A. (2020). Gamma Irradiation of Mango 'Ataulfo' at Low Dose: Effect on Texture, Taste, and Odor Fruit. *Food Science and Technology Research*, 26(1), 59-64. <https://doi.org/10.3136/fstr.26.59>
- 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, 27389-27400. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2898223>
- Cervera, E. (2020). GPU-Accelerated Vision for Robots: Improving System Throughput Using OpenCV and CUDA. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 27(2), 151-158. <https://doi.org/10.1109/MRA.2020.2977601>
- Chaux-Gutiérrez, A. M., Santos, A. B., Granda-Restrepo, D. M., & Mauro, M. A. (2017). Foam mat drying of mango: Effect of processing parameters on the drying kinetic and product

- quality. *Drying Technology*, 35(5), 631-641.
<https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1201486>
- Chiumarelli, M., Pereira, L. M., Ferrari, C. C., Sarantópoulos, C. I. G. L., & Hubinger, M. D. (2010). Cassava Starch Coating and Citric Acid to Preserve Quality Parameters of Fresh-Cut “Tommy Atkins” Mango. *Journal of Food Science*, 75(5).
<https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01636.x>
- Contreras-López, E., Jaimez-Ordaz, J., Ugarte-Bautista, I., Ramírez-Godínez, J., González-Olivares, L. G., García-Curiel, L., & Pérez-Flores, J. G. (2022). Use of image analysis to determine the shelf-life of an apple compote with wine. *Food Science and Technology*, 42, e04122. <https://doi.org/10.1590/fst.04122>
- Corzo, O., & Álvarez, C. (2014). Color Change Kinetics of Mango at Different Maturity Stages during Air Drying: Color Kinetics of Mango. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(1), 508-517. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2012.00801.x>
- Da Silva Nunes, R., Kahl, V. F. S., Da Silva Sarmiento, M., Richter, M. F., Costa-Lotufu, L. V., Rodrigues, F. A. R., Abin-Carriquiry, J. A., Martinez, M. M., Ferronato, S., De Barros Falcão Ferraz, A., & Da Silva, J. (2011). Antigenotoxicity and Antioxidant Activity of Acerola Fruit (*Malpighia glabra* L.) at Two Stages of Ripeness. *Plant Foods for Human Nutrition*, 66(2), 129-135. <https://doi.org/10.1007/s11130-011-0223-7>
- Da Silva Simão, R., De Moraes, J. O., Lopes, J. B., Frabetti, A. C. C., Carciofi, B. A. M., & Laurindo, J. B. (2022). Survival Analysis to Predict How Color Influences the Shelf Life of Strawberry Leather. *Foods*, 11(2), 218. <https://doi.org/10.3390/foods11020218>
- De J. Ornelas-Paz, J., Yahia, E. M., Gardea, A. A., & Failla, M. L. (2010). Carotenoid Composition in «Ataulfo» Mango and Their Bioavailability and Bioconversion to Vitamin A. *Acta Horticulturae*, 877, 1245-1252.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.877.170>
- De-la-Torre, M., Zatarain, O., Avila-George, H., Muñoz, M., Oblitas, J., Lozada, R., Mejía, J., & Castro, W. (2019). Multivariate Analysis and Machine Learning for Ripeness Classification of Cape Gooseberry Fruits. *Processes*, 7(12), 928.
<https://doi.org/10.3390/pr7120928>
- Duong, T. N. D., Pham, N. T., & Hoang, Q. B. (2023). Effects of heat treatment on the physicochemical parameters of acerola fruit (*Malpighia emarginata* DC.) juice over maturity indexes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1155(1), 012023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1155/1/012023>
- Filoteo-Razo, J. D., Elizondo-Leal, J. C., Martinez-Angulo, J. R., Barron-Zambrano, J. H., Díaz-Manriquez, A., Saldivar-Alonso, V. P., Estudillo-Ayala, J. M., & Rojas-Laguna, R. (2023). Non-Invasive Optoelectronic System for Color-Change Detection in Oranges to

- Predict Ripening by Using Artificial Neural Networks. *IEEE Photonics Journal*, 15(5), 1-10. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2023.3312212>
- García-Curiel, L., Pérez-Flores, J. G., Contreras-López, E., Pérez-Escalante, E., & Hernández-Hernández, A. A. (2023). Anthocyanin content prediction in frozen strawberry puree. *Italian Journal of Food Science*, 35(2), 88-97. <https://doi.org/10.15586/ijfs.v35i2.2315>
- Huang, X., Lv, R., Wang, S., Aheto, J. H., & Dai, C. (2018). Integration of computer vision and colorimetric sensor array for nondestructive detection of mango quality. *Journal of Food Process Engineering*, 41(8), e12873. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12873>
- Jaimez-Ordaz, J., Pérez-Flores, J. G., Castañeda-Ovando, A., González-Olivares, L. G., Añorve-Morga, J., & Contreras-López, E. (2019). Kinetic parameters of lipid oxidation in third generation (3G) snacks and its influence on shelf-life. *Food Science and Technology (Brazil)*, 39(suppl 1), 136-140. <https://doi.org/10.1590/fst.38917>
- Janurianti, N. M. D., I Made Supartha Utama, & Ida Bagus Wayan Gunam. (2021). Colour and Quality of Strawberry fruit (*Fragaria x ananassa* Duch.) at Different Levels of Maturity. *SEAS (Sustainable Environment Agricultural Science)*, 5(1), 22-28. <https://doi.org/10.22225/seas.5.1.3166.22-28>
- Kittur, F., Saroja, N., Habibunnisa, & Tharanathan, R. (2001). Polysaccharide-based composite coating formulations for shelf-life extension of fresh banana and mango. *European Food Research and Technology*, 213(4-5), 306-311. <https://doi.org/10.1007/s002170100363>
- Nassar, R. D. C. M. R., González-MoscOSO, S., Crisosto, G. M., Lima, L. C. D. O., Vilas Boas, E. V. D. B., & Crisosto, C. H. (2015). Describing Quality and Sensory Attributes of 3 Mango (*Mangifera indica* L.) Cultivars at 3 Ripeness Stages Based on Firmness. *Journal of Food Science*, 80(9). <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12989>
- Noratto, G. D., Bertoldi, M. C., Krensek, K., Talcott, S. T., Stringheta, P. C., & Mertens-Talcott, S. U. (2010). Anticarcinogenic Effects of Polyphenolics from Mango (*Mangifera indica*) Varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(7), 4104-4112. <https://doi.org/10.1021/jf903161g>
- Nunes, M. C. N., Emond, J. P., Brecht, J. K., Dea, S., & Proulx, E. (2007). Quality Curves for Mango Fruit (cv. Tommy Atkins and Palmer) Stored at Chilling and Nonchilling Temperatures. *Journal of Food Quality*, 30(1), 104-120. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2007.00109.x>
- Ochoa, M. R., Kessler, A. G., De Michelis, A., Mugridge, A., & Chaves, A. R. (2001). Kinetics of colour change of raspberry, sweet (*Prunus avium*) and sour (*Prunus cerasus*) cherries preserves packed in glass containers: Light and room temperature effects. *Journal of Food Engineering*, 49(1), 55-62. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00184-9](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00184-9)
- Quirós-Sauceda, A., Chen, C.-Y., Blumberg, J., Astiazaran-Garcia, H., Wall-Medrano, A., & González-Aguilar, G. (2017). Processing ‘Ataulfo’ Mango into Juice Preserves the

- Bioavailability and Antioxidant Capacity of Its Phenolic Compounds. *Nutrients*, 9(10), 1082. <https://doi.org/10.3390/nu9101082>
- Quirós-Sauceda, A. E., Sañudo-Barajas, J. A., Vélez-de La Rocha, R., Domínguez-Avila, J. A., Ayala-Zavala, J. F., Villegas-Ochoa, M. A., & González-Aguilar, G. A. (2019). Effects of ripening on the in vitro antioxidant capacity and bioaccessibility of mango cv. ‘Ataulfo’ phenolics. *Journal of Food Science and Technology*, 56(4), 2073-2082. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03685-x>
- Rastegar, S., Hassanzadeh Khankahdani, H., & Rahimzadeh, M. (2019). Effectiveness of alginate coating on antioxidant enzymes and biochemical changes during storage of mango fruit. *Journal of Food Biochemistry*, 43(11). <https://doi.org/10.1111/jfbc.12990>
- Ratprakhon, K., Neubauer, W., Riehn, K., Fritsche, J., & Rohn, S. (2020). Developing an Automatic Color Determination Procedure for the Quality Assessment of Mangos (*Mangifera indica*) Using a CCD Camera and Color Standards. *Foods*, 9(11), 1709. <https://doi.org/10.3390/foods9111709>
- Robles-Sánchez, R. M., Islas-Osuna, M. A., Astiazarán-García, H., Vázquez-Ortiz, F. A., Martín-Belloso, O., Gorinstein, S., & González-Aguilar, G. A. (2009). Quality Index, Consumer Acceptability, Bioactive Compounds, and Antioxidant Activity of Fresh-Cut “Ataulfo” Mangoes (*Mangifera Indica* L.) as Affected by Low-Temperature Storage. *Journal of Food Science*, 74(3). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01104.x>
- Saikaew, K., Siripornadulsil, W., & Siripornadulsil, S. (2023). Improvements in the color, phytochemical, and antioxidant properties of frozen ripe mango pieces using calcium chloride dipping and chitosan coating. *Journal of Food Science*, 88(8), 3239-3254. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16699>
- Salinas-Moreno, Y., Ramírez Díaz, J. L., Alemán De La Torre, I., Bautista Ramírez, E., & Ledesma-Miramontes, A. (2021). Evaluación de dos procedimientos de medición de color en granos de maíces pigmentados. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(7), 1297-1303. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i7.2276>
- Sonar, C. R., Rasco, B., Tang, J., & Sablani, S. S. (2019). Natural color pigments: Oxidative stability and degradation kinetics during storage in thermally pasteurized vegetable purees. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(13), 5934-5945. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9868>
- Suresh, H. S., & Niranjanamurthy, M. (2021). Image Processing Using OpenCV Technique for Real World Data. En M. N. Favorskaya, S.-L. Peng, M. Simic, B. Alhadidi, & S. Pal (Eds.), *Intelligent Computing Paradigm and Cutting-edge Technologies* (Vol. 21, pp. 285-296). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65407-8_24

- Tavassoli-Kafrani, E., Gamage, M. V., Dumée, L. F., Kong, L., & Zhao, S. (2022). Edible films and coatings for shelf life extension of mango: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(9), 2432-2459. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1853038>
- Trinh, T. H., & Nguyen, H. H. C. (2023). Implementation of YOLOv5 for Real-Time Maturity Detection and Identification of Pineapples. *Traitement du Signal*, 40(4), 1445-1455. <https://doi.org/10.18280/ts.400413>
- Vilvert, J. C., De Freitas, S. T., Ferreira, M. A. R., Costa, C. D. S. R., Leite, R. H. D. L., Dos Santos, F. K. G., & Aroucha, E. M. M. (2023). Preservation of Quality and Bioactive Compounds in Mangoes Using Chitosan-Graphene-Oxide-Based Biodegradable Packaging. *Horticulturae*, 9(10), 1145. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9101145>
- Viola, P., & Jones, M. (2001). Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001*, 1, I-511-I-518. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2001.990517>
- Xiao, H.-W., Law, C.-L., Sun, D.-W., & Gao, Z.-J. (2014). Color Change Kinetics of American Ginseng (*Panax quinquefolium*) Slices During Air Impingement Drying. *Drying Technology*, 32(4), 418-427. <https://doi.org/10.1080/07373937.2013.834928>
- Zhang, D., Liu, B., Wu, S., Li, C., Fang, T., & Tian, M. (2024). Assessing the Role of Gaseous Chlorine Dioxide in Modulating the Postharvest Ripening of Keitt Mangoes through the Induction of Ethylene Biosynthesis. *Foods*, 13(2), 316. <https://doi.org/10.3390/foods13020316>
- Zhu, X., Wang, Q., Cao, J., & Jiang, W. (2008). Effects of Chitosan Coating on Postharvest Quality of Mango (*Mangifera Indica* L. Cv. Tainong) Fruits. *Journal of Food Processing and Preservation*, 32(5), 770-784. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2008.00213.x>