



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

PREDICCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE MADUREZ, Y MÉTODO PARA
“INDUCIR” EL DESPRENDIMIENTO DEL FRUTO DE MANGO

TESIS

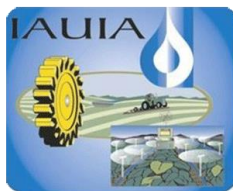
Que como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

Presenta:

DAVID VARGAS CANO

Bajo la supervisión de: JOSÉ LUIS RODRÍGUEZ DE LA O, DR.



Chapingo, Estado de México, agosto de 2024

APROBADA



PREDICCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE MADUREZ, Y MÉTODO PARA
"INDUCIR" EL DESPRENDIMIENTO DEL FRUTO DE MANGO

Tesis realizada por **DAVID VARGAS CANO** bajo la supervisión del Comité Asesor
indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener
el grado de:

DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

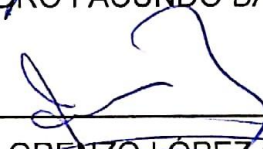
DIRECTOR:


DR. JOSÉ LUIS RODRÍGUEZ DE LA O

ASESOR:


DR. ALEJANDRO FACUNDO BARRIENTOS PRIEGO

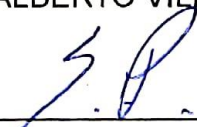
ASESOR:


DR. IRINEO LORENZO LÓPEZ CRUZ

ASESOR:


DR. CARLOS ALBERTO VILLASEÑOR PEREA

LECTOR EXTERNO:


DR. MIGUEL SERVÍN PALESTINA

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN GENERAL.....	15
1.1	Importancia del problema investigado	15
1.2	Antecedentes.....	16
1.3	Justificación	18
1.4	Objetivo general	18
1.5	Objetivos particulares	18
1.6	Estructura de la tesis	19
1.7	Literatura citada.....	19
2	ESTADO DEL ARTE EN LA PREDICCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE MADUREZ, Y TÉCNICAS PARA EL DESPRENDIMIENTO DEL FRUTO DE MANGO	22
2.1	Introducción	23
2.2	Madurez del mango.....	24
2.2.1	Madurez basada en parámetros biofísicos.....	25
2.2.2	Madurez basada en parámetros bioquímicos.....	26
2.3	Métodos de predicción y clasificación de la madurez del mango	27
2.3.1	Métodos destructivos.....	27
2.3.2	Métodos no destructivos.....	28
	Espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR)	28
	Visión artificial y procesamiento de imágenes.....	30
	Ultrasonido	30

2.4	Técnicas para el desprendimiento del fruto de mango	31
2.4.1	Métodos manuales	31
2.4.2	Métodos mecánicos.....	32
2.4.3	Métodos químicos	33
2.5	Conclusiones	35
2.6	Referencias	36
3	'ATAULFO' MANGO MATURITY INDEX PREDICTION USING THE AS7262 SPECTRAL SENSOR.....	43
3.1	Introduction.....	44
3.2	Material and methods	46
3.2.1	Equipment Design	46
3.2.2	Experimental design	47
3.2.3	Data analysis.....	48
3.3	Results and discussion	50
3.3.1	RGB/AS7262 ratio	50
3.3.2	Fruit measurements.....	50
3.3.3	Dry matter prediction	51
3.3.4	Soluble solids content prediction	51
3.3.5	Firmness prediction	52
3.3.6	Dry matter Classification.....	53
3.3.7	Soluble solids content classification	54
3.3.8	Firmness classification	55

3.4	Conclusions	56
3.5	Acknowledgements.....	56
3.6	References	56
4	MANGO FRUIT DETACHMENT OF TREES AFTER APPLYING A BLEND COMPOSED OF HNO ₃ AND CHARCOAL ACTIVATED	59
4.1	Introduction.....	60
4.2	Materials and Methods	62
4.2.1	Nitric acid (HNO ₃), phosphoric acid (H ₃ PO ₄) and hydrochloric acid (HCL) application at the pedicel-peduncle	63
4.2.2	Mango fruit and pedicel-peduncle measurements	65
4.2.3	Data analysis	67
4.3	Results.....	68
4.3.1	AC blend.....	68
4.3.2	Pedicel.....	70
4.3.3	Firmness, TSS and weight measurements	71
4.3.4	Fruit detachment.....	72
4.3.5	Acid-activated carbon performance	74
	Effect of ripeness in AC blend fruit detachment.....	75
	Effect of firmness, diameter, and weight in AC blend fruit detachment...	76
4.4	Discussion	78
4.5	Conclusions	79
4.6	Future work.....	79
4.6.1	Canopy and fruit management	80

4.6.2	Technology for fruit detection.....	80
4.7	Patents	81
4.8	References	81
5	APÉNDICES	87
5.1	Apéndice 1. Inducción del desprendimiento del mango mediante tratamiento químico.....	87
5.2	Apéndice 2. Método y composición para inducir el desprendimiento de frutos de mango de los árboles y otros frutos similares	91
5.3	Apéndice 3. Análisis de detección de tomates en ambiente de invernadero mediante procesamiento de imágenes RGB	92

LISTA DE CUADROS

CAPÍTULO 3

Table 1. Quality parameter statistical results including minimums, maximums, means, training set means, and evaluation set means, along with statistical significance assessed by the Student's t-test and its corresponding p-value.... 51

CAPÍTULO 4

Table 1. Statistical analysis of fruit weight, diameter, TSS and firmness, evaluated by the Kruskal-Wallis test ($P < 0.05$). 72

Table 2. Log-Rank test results with and without Bonferroni adjustment for categorical and continuous variables. 77

CAPÍTULO 5

Tabla 1. Tiempo desprendimiento del fruto y porcentaje de frutos dañados durante la aplicación de ácidos durante la primera y segunda etapa del experimento. . 89

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 3

Figure 1. Components (a) used by the final prototype and (b) fitting inside the box showing the power switch (1), OLED screen (2), LED activation switch (3), buttons to perform the reading (4), to save data (5) and to restart the equipment (6). .. 47

Figure 2. 'Ataulfo' mango fruits (a) in the market and (b) hanging on the tree. . 47

Figure 3. Measurements taken in areas previously marked on both intact and peeled fruits using the prototype and the AS7262 sensor. 48

Figure 4. AS7262 spectral variables (a) related to RGB values (b) measured and predicted from 27 samples with linear regression. 50

Figure 5. Linear relationship between predicted and SSC (°Brix) measurements in a) intact b) peeled fruits..... 52

Figure 6. Linear relationship between predicted and firmness measurements (Kg cm^{-2}) in a) intact b) peeled fruits..... 53

Figure 7. CART model for the classification of mango fruits into two SSC categories. 54

Figure 8. CART model for the classification of mango fruits. 55

CAPÍTULO 4

Figure 1. Net structure catches fruits falling from the tree..... 61

Figure 2. Keitt mango (a) fruits hanging from the tree, (b) showing pedicel. 62

Figure 3. Fruit (a) with phosphoric acid applied at the fruit-pedicel, (b) drops of nitric acid after being atomized at the pedicel, (c) runoff of hydrochloric acid on the surface of the fruit, d) fruit with severe damage caused by the atomization and runoff of nitric acid..... 63

Figure 4. AC blend (a) preparation, and (b) application to the fruit pedicel. 64

Figure 5. Temperature measurement a) before and b) after applying the three different AC blends to the sensors.	65
Figure 6. 'Keitt' mango fruits collected at the net after pedicel breakdown.....	66
Figure 7. AC blend temperature (a) after preparation, and (b) during and after application to the digital sensors.	69
Figure 8. Thermal image a) after applying AC blend to the fruit pedicel, b) of the detached fruit, and c) pedicel after fruit detachment.	69
Figure 9. Pedicel rupture with AC blend a) made at the abscission zone, b) letting conducting tissues, c) with bark cauterization after xylem and phloem destruction, d) fruit surface burn-out due to acid runoff, e) stalk end after fruit detachment and f) fruit showing acid and latex flow.	70
Figure 10. Microphotography of untreated pedicel-peduncle to the left and of treated pedicel-peduncle on the right. C: Cortex that contains from outside to inside; epidermis (e), parenchyma (p), lactiferous channels (lc), phloem (ph) and cambium (ca). X: Xylem and pith, D: damage area that includes mainly the cortex and part of the xylem, where a large constriction is evident.....	71
Figure 11. Mango fruits affected by latex or paste contact with latex.	73
Figure 12. Survival analysis of the three blend treatments a) with Kaplan-Meier curves, and b) hazard functions.	74
Figure 13. Survival plots of maturity stage and AC blends applied together with p-values obtained with the Log-Rank test.	76
Figure 14. Survival plots for weight and AC blends applied together with p-values obtained with the Log-Rank test.....	77
Figure 15. Block diagram showing technologies that will be applied to automatize the process.	81

CAPÍTULO 5

Figura 1. A) Módulo ESP-CAM instalado en campo; Mangos Haden 2 horas después de aplicarles el ácido B) HNO ₃ , C) H ₃ PO ₄ y D) HCL.	88
--	----

DEDICATORIAS

Mi madre,
Margarita Cano Marcial,
por su amor incondicional y su apoyo constante.

Mis hermanas,
Elizabeth y Dulce,
por su compañía y aliento a lo largo de este viaje.

Mis queridas sobrinas,
“Metz” e “Itza”,
por su alegría y cariño que me han inspirado.

Y a mi amada pareja,
Ilse,
por su comprensión, apoyo y amor inquebrantable.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT), por el apoyo de beca para la realización de mis estudios de maestría.

En este apartado me permito agradecer a las personas e instituciones que hicieron posible mi formación y la realización del presente trabajo, entre ellos:

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), por el apoyo brindado para la realización de mis estudios de maestría.

Al programa de Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de UACH, por permitirme formar parte de su proyecto educativo.

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Federico F. Hahn Schlam, que en paz descanse. Su dirección experta, así como sus valiosos consejos y sugerencias, han sido fundamentales para la culminación exitosa de este trabajo de investigación. Su apoyo constante y su capacidad para proporcionar orientación acertada en cada etapa del proceso no solo facilitaron el avance de mi proyecto, sino que también enriquecieron significativamente mi aprendizaje y desarrollo profesional. La dedicación y el compromiso del Dr. Hahn fueron cruciales para superar los desafíos y alcanzar los objetivos planteados. Su legado en el campo de la investigación sigue inspirando y guiando a quienes tuvimos el honor de conocerlo y trabajar con él.

Al Dr. José Luis Rodríguez de la O y Dr. Alejandro F. Barrientos Priego, ya que, gracias a su gran ayuda, consejos y sugerencias se hizo posible la culminación de este trabajo de investigación.

A todas aquellas personas que de manera desinteresada me brindaron su apoyo durante la realización de este trabajo.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	David Vargas Cano
Fecha de nacimiento	29 de diciembre de 1993
Lugar de nacimiento	Santiago Choapam, Oaxaca
CURP	VACD931229HOCRNV06
Profesión	Estudiante de doctorado
Cédula profesional	12707119

Desarrollo académico

Bachillerato	Bachillerato Integral Comunitario 05
Licenciatura	Ingeniería Mecánica Agrícola
Maestría	Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua

RESUMEN GENERAL

PREDICCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE MADUREZ, Y MÉTODO PARA “INDUCIR” EL DESPRENDIMIENTO DEL FRUTO DE MANGO¹

El cultivo del mango (*Mangifera indica* L.) es una actividad agrícola importante en México, contribuyendo sustancialmente a la economía del país a través del consumo interno y de las exportaciones. Es de gran importancia cosechar el fruto en su etapa de madurez óptima y reducir los daños durante la cosecha. Por lo tanto, esta investigación tuvo como objetivo, desarrollar y evaluar un sistema integral para la predicción y clasificación de la madurez del mango, desarrollar un método innovador para el desprendimiento del fruto que pueda emplearse como técnica de cosecha. Para esto, se llevó a cabo una extensa revisión para identificar los principales parámetros fisicoquímicos y los métodos más eficaces para predecir madurez del mango, posteriormente se desarrolló un equipo basado en un sensor espectral y se correlacionó con las principales variables fisicoquímicas. Finalmente se desarrolló un método innovador de cosecha de mango, el cual consiste en la aplicación de una emulsión ácida sobre el pedicelo del fruto. Con el equipo construido y el uso de Mínimos cuadrados parciales, se predijo sólidos solubles totales (SST) y firmeza con un R^2 de 0.61 y 0.76, respectivamente. La raíz cuadrada del error cuadrático medio de predicción fue de 0.91 (°Brix) para SST y de 0.67 (kg cm⁻²) para la firmeza. Mediante árboles de clasificación y regresión, la precisión de la clasificación fue del 90 % para SST y del 87 % para firmeza en frutos de mangos intactos. Además, la emulsión ácida aplicada al pedicelo del fruto ocasionó un desprendimiento del fruto en un tiempo máximo de 4 horas. Los experimentos de desprendimiento de mango utilizando una mezcla media indicaron que es posible desprender la fruta en un tiempo promedio de 2 horas. Sin embargo, la mezcla densa redujo la exudación de látex, la cual solo se presentó en el 7% del total de los frutos cosechados.

Palabras clave: Sensor espectral, ESP32, HNO₃, mezcla ácida, pedicelo-pedúnculo.

¹Tesis de Doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Vargas-Cano David

Director de Tesis: Federico F. Hahn Schlam† y José Luis Rodríguez de la O

GENERAL ABSTRACT

PREDICTION AND CLASSIFICATION OF MATURITY, AND METHOD TO "INDUCE" MANGO FRUIT DETACHMENT²

The cultivation of mango (*Mangifera indica* L.) is an important agricultural activity in Mexico, which contributes to the economy of the country through internal consumption as well as exports. Harvesting the fruit at its optimum maturity stage and reducing damage during harvest are of great importance. Therefore, the objective of this research was to develop and evaluate an integral system for the prediction and classification of mango maturity, and to develop an innovative method for fruit detachment that can be used as a harvesting technique. For this purpose, an extensive review was carried out to identify the main physicochemical parameters and the principal methods for predicting mango maturity, then an equipment based on a spectral sensor was developed and correlated with the main physicochemical variables. In addition, an innovative method of mango harvesting was developed, which consists in the application of an acid blend on the pedicel of the fruit. Using the developed device and partial least squares, total soluble solids (TSS) and firmness were predicted with an R^2 of 0.61 and 0.76, respectively. The root mean square error of prediction was 0.91 (°Brix) for TSS and 0.67 (kg cm⁻²) for firmness. Through classification and regression trees, the classification accuracy was 90 % for TSS and 87 % for firmness in intact mango fruit. In addition, acid blend applied to the fruit pedicel caused fruit detachment up to 4 hours. Mango detachment experiments using a medium mixture indicated that it is possible to detach the fruit in an average time of 2 hours. By contrast, the dense mixture reduced latex exudation, which was only observed in 7 % of the total harvested fruits.

Keywords: Spectral sensor, ESP32, HNO₃, acid blend, pedicel-peduncle.

Thesis, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Vargas-Cano David

Advisor: Federico F. Hahn Schlam[†] and José Luis Rodríguez de la O

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Importancia del problema investigado

La producción del cultivo de mango (*Mangifera indica* L.) es una actividad agrícola importante en México, contribuyendo sustancialmente a la economía del país a través del consumo interno y las exportaciones, particularmente a Estados Unidos (Ariza-Flores et al., 2024). Según el informe de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SAGARPA, 2017), el plan estratégico 2017-2030 prevé un aumento de la demanda mundial de 3.23 hasta 4.06 millones de toneladas métricas, lo que significa un crecimiento acumulado del 25.66 %. Al mismo tiempo, se prevé que el potencial de producción de mango aumente de 1.89 a 2.69 millones de toneladas métricas, lo que refleja un crecimiento acumulado del 42.69 %. En los últimos años, México se ha posicionado en los primeros lugares como productor y exportador de mango, con las variedades 'Ataulfo', 'Tommy Atkins', 'Kent', 'Keitt' y 'Haden', entre otros (Contreras et al., 2024). La variedad Ataulfo, originaria de la región del Soconusco en Chiapas, destaca particularmente por su alta demanda exportadora debido a sus deseables propiedades organolépticas, como sabor dulce y pulpa carnosa, convirtiéndola en una de las favoritas en los mercados norteamericano y japonés (Mendoza-Hernández et al., 2020). La cadena de valor del mango en México involucra diversas etapas desde la producción hasta el consumo, con puntos críticos como la floración y el manejo de enfermedades (Santos-Villalobos et al., 2011). Además, se presentan desafíos importantes como la reducción de pérdidas en postcosecha cuyas principales causas se le atribuyen a la recolección en etapas de madurez incorrectas, tratamientos poscosecha y, almacenamientos inadecuados, empaque deficiente y mala distribución. Lo anterior que resulta en daños mecánicos, quemaduras de savia, tejido esponjoso

pérdida de peso, ablandamiento de frutos, descomposición y lesiones por frío (Le et al., 2022). La pérdida total poscosecha de mangos desde la cosecha hasta el comercio minorista en México se ha estimado en alrededor del 30.65 % con pérdidas significativas en todas las etapas de la cadena de suministro (Roy et al., 2019). Este alto nivel de pérdida subraya la necesidad de mejorar las prácticas de manejo para mitigar estas pérdidas, partiendo en la cosecha para garantizar la calidad de los frutos y la aceptación del consumidor final de los mangos mexicanos.

1.2 Antecedentes

El mango, al ser un fruto climatérico, es altamente perecedero y susceptible a diversas enfermedades poscosecha y condiciones ambientales que conducen a la degradación de la calidad y pérdidas económicas a lo largo de la cadena de suministro (Le et al., 2022). En los frutos de mango, la madurez fisiológica es de gran importancia durante la cosecha, ya que una fruta inmadura nunca alcanza una buena calidad (Osuna-García et al., 2021). A medida que la maduración de la fruta avanza, la materia seca permanece relativamente constante (Marques et al., 2016), por esta razón es ampliamente usado como índice de madurez por las empacadoras. Otros atributos usados para medir la calidad de la fruta son los sólidos solubles totales (SST), firmeza, acidez titulable y niveles de vitamina C (Costa et al., 2019), no obstante, la firmeza y los SST determinan el grado de madurez de acuerdo con la norma mexicana NMX-FF-058-SCFI (2006). Los métodos tradicionales para determinar la madurez del mango, como la inspección manual y el análisis fisicoquímico destructivo, requieren mucha mano de obra y requieren mucho tiempo (Upadhyay & Gupta, 2024). Los avances recientes han introducido varias técnicas no destructivas para mejorar la precisión y la eficiencia. Entre los métodos más usados en la determinación de las variables fisicoquímicas, que no son destructivos, se encuentran las técnicas ópticas como el análisis de imágenes, visión artificial y técnicas espectroscópicas (Yahaya et al., 2015). Por ejemplo, se ha desarrollado un método especializado de meta aprendizaje para clasificar imágenes de cultivos de mango con datos limitados,

mejorando significativamente la precisión de la detección de madurez a través de la segmentación de imágenes y la extracción de características fisicoquímicas del fruto (Upadhyay & Gupta, 2024). La espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR) combinada con regresión polinómica local con múltiples predictores (MLPR) también se ha mostrado prometedora en la predicción del pH y SST con alta precisión, proporcionando una técnica rápida y no destructiva para evaluar la calidad del mango (Ulya et al., 2024). Además, de espectroscopia NIR y lógica difusa para clasificar los índices de madurez del mango, logrando una alta correlación con los parámetros; acidez total, SST, firmeza y almidón (Khumaidi et al., 2022). También, se ha propuesto un modelo híbrido que utiliza una red neuronal Feed-Forward (FFNN) multicapa para determinar la madurez del mango en base a características internas y externas como longitud, anchura, defecto, peso, densidad y color, logrando un error medio cuadrado de 0.259 en la predicción de madurez (Trieu & Thinh, 2022). También, se ha explorado el uso de grados días de desarrollo (GDD) para estimar el tiempo de cosecha en función de las unidades de calor acumuladas desde la floración hasta la madurez del fruto, estableciéndose objetivos específicos de GDD para diferentes cultivares de mango (Amaral et al., 2023). Se han aplicado técnicas de procesamiento de imágenes y algoritmos de redes neuronales, como la retro propagación, para detectar la madurez del mango en el árbol, aunque con niveles de precisión variables (Sanjaya & Karo, 2023). Estos diversos enfoques mejoran colectivamente la precisión y la eficiencia de la predicción de la madurez del mango, ofreciendo beneficios significativos para la gestión de la cosecha,

La cosecha de mango en México es un proceso multifacético que varía según el uso previsto de la fruta, la región y las prácticas de cultivo. Para el consumo en fresco, los mangos generalmente se cosechan manualmente para garantizar la calidad de la fruta y minimizar el daño, lo cual es crucial para garantizar su comercialización y la vida útil de la fruta (Mayans Céspedes, et al., 2015). Sin embargo, no está exento a daños como la quemadura por látex, un líquido viscoso con un pH bajo y alto contenido de aceite exudado por el pedicelo de la

fruta al momento de la cosecha, además, causa zafira o manchas oscuras en la cáscara. Estos daños reducen significativamente la aceptación del consumidor y la vida útil del fruto (Secretaria et al., 2021). Los tratamientos efectivos de “deslechado” como el uso de alumbre, detergente, cal o agua, pueden mitigar las lesiones de la savia, siendo el agua particularmente eficaz para reducir el daño (Secretaria et al., 2021). A pesar de estos avances, el impacto económico del daño causado por el látex sigue siendo significativo, lo que requiere una investigación continua para desarrollar mejores técnicas de recolección y manejo poscosecha para mejorar la calidad y aumentar la vida útil del fruto.

1.3 Justificación

Conocer el estado de madurez de los frutos de mango permite cosecharlos en su punto óptimo (madurez fisiológica), garantizando así un fruto de alta calidad y atractivo para los consumidores. La adopción de un método de cosecha selectiva que minimice los daños durante la recolección es crucial para maximizar la calidad del fruto y reducir las pérdidas económicas asociadas a la cosecha y el manejo poscosecha. Implementar métodos precisos para predecir la madurez y técnicas eficientes para el desprendimiento del fruto, podrá mejorar la eficiencia operativa en la etapa de producción y contar con frutos de mayor calidad, así, generar beneficio a los productores y consumidores. Además, este trabajo contribuirá al avance del conocimiento científico en el ámbito de la fruticultura.

1.4 Objetivo general

Desarrollar y evaluar un sistema integral para la predicción y clasificación de la madurez del mango, utilizando métodos no destructivos (ópticos y espectroscópicos), y proponer un método innovador para el desprendimiento del fruto, que minimice el daño durante la cosecha y garantice la calidad del mango.

1.5 Objetivos particulares

- Realizar una revisión exhaustiva del estado actual de la predicción y clasificación de la madurez del mango.

- Desarrollar y evaluar un dispositivo óptico basado en el sensor espectral AS7262 para determinar de manera no destructiva la madurez del mango.
- Desarrollar y evaluar una metodología para inducir el desprendimiento del mango mediante la aplicación de una mezcla ácida sobre el pedicelo, sin dañar el fruto.

1.6 Estructura de la tesis

El trabajo de investigación se desarrolló en tres etapas. La primera (Capítulo 2) consistió en llevar a cabo una revisión del estado del arte en la predicción y clasificación de madurez, y las técnicas para el desprendimiento del fruto de mango. En este apartado se describen cuáles son los parámetros usados como indicadores de madurez y que métodos de predicción existen, además de cuáles son las técnicas empleadas para causar el desprendimiento del fruto con fines de cosecha. La segunda etapa (Capítulo 3), consistió en desarrollar un equipo óptico para medición de variables del mango con un sensor espectral capaz de determinar y clasificar frutos de acuerdo con su estado de madurez. En la tercera etapa (Capítulo 4), se desarrolló un método innovador para causar el desprendimiento del fruto, se evaluó la efectividad de la técnica y los daños causados a los frutos al emplearlo. Por último, se presenta un apartado de Apéndices donde se anexan otros trabajos relacionados con el tema de investigación o derivados de este. En el apéndice 1, se presentan los resultados de las primeras pruebas realizadas en la fase experimental del capítulo 4. En el apéndice 2, se presenta la patente obtenida a partir de los resultados del estudio del capítulo 4. Para finalizar, en el apéndice 3 se presenta un resumen del trabajo relacionado con las etapas futuras de la línea de investigación.

1.7 Literatura citada

Amaral, M. H., McConchie, C., Dickinson, G., & Walsh, K. B. (2023). Growing degree day targets for fruit development of Australian mango cultivars. *Horticulturae*, 9(4), 489. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9040489>

- Ariza-Flores, R., Cano-García, M. A., Cadena-Iñiguez, P., Valle de la Paz, M., & Gálvez-Marroquín, L. A. (2024). Assessment and selection of flowering inducers to increase productivity of mango cv. Ataulfo (*Mangifera indica* L.). *Agro Productividad*, 17(1), 63-68. <https://doi.org/10.32854/agrop.v17i1.2561>
- Contreras, L. M. R., Espinosa, P. B., Reyes, G. D. A., & Cárdenas, C. A. K. (2024). *Mango deshidratado, una alternativa para el desarrollo de negocios para las familias de El Pozole, Rosario, Sinaloa*. Universidad Tecnológica de Escuinapa.
- Costa, M. D. S., Almeida, F. D. A. C., Costa, J. D. D. S., Neto, A. F., & Gomes, J. P. (2019). Characterization of quality attributes of mango cv. 'ataulfo' at different maturation stages. *Boletim Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos*, 37(1), 1–9. <https://doi.org/10.5380/bceppa.v37i1.62414>
- Khumaidi, A., Purwanto, Y. A., Sukoco, H., & Wijaya, S. H. (2022). Using fuzzy logic to increase accuracy in mango maturity index classification: Approach for developing a portable near-infrared spectroscopy device. *Sensors*, 22(24), 9704. <https://doi.org/10.3390/s22249704>
- Le, T. D., Viet Nguyen, T., Muoi, N. V., Toan, H. T., Lan, N. M., & Pham, T. N. (2022). Supply chain management of mango (*Mangifera indica* L.) fruit: A review with a focus on product quality during postharvest. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 799431. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.799431>
- Marques, E. J. N., De Freitas, S. T., Pimentel, M. F., & Pasquini, C. (2016). Rapid and non-destructive determination of quality parameters in the “Tommy Atkins” mango using a novel handheld near infrared spectrometer. *Food Chemistry*, 197, 1207–1214. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.11.080>
- Mayans Céspedes, P. R., López Cansteñs, G. D. J., Romanchik Kriuchkova, E., & Pérez Sobrevilla, L. (2015). Elastic properties of mango fruit-stalk system related to harvest by vibration. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(8), 1781-1790.
- Mendoza-Hernández, C., Rosas-Quijano, R., Vázquez-Ovando, A., & Gálvez-López, D. (2020). Retos y controversias del mango Ataulfo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(7), 1633-1645. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i7.2199>
- NMX-FF-058-SCFI. (2006). Non industrialized food products for human consumption – fresh fruit – mango (*Mangifera indica* L.) – specifications. NORMEX.

- Osuna-Garcia, J. A., Olivares-Figueroa, J. D., Toivonen, P. M., Pérez-Barraza, M. H., Goenaga, R., & Graciano-Cristóbal, M. J. (2021). Novel nondestructive technique to determine optimum harvesting stage of 'Ataúlfo' mango fruit. *Journal of Advances in Agriculture*, 12, 61–69.
- Roy, S., Hassan, M. K., Ahmed, Q. M., Rahman, M. M., Hasan, G. N., & Sarkar, M. N. (2019). Assessment of postharvest loss and constraints in the supply chain of mango. *International Journal of Business, Management and Social Research*, 7, 412-420. <https://doi.org/10.18801/ijbmsr.070119.43>
- Sanjaya, A., & Karo, I. M. K. (2023). Determination of mango fruit maturity on the tree based on digital image processing and artificial neural networks. *Journal of Software Engineering, Information and Communication Technology (SEICT)*, 4(1), 1-14.
- Santos-Villalobos, S. D. L., Folter, S. D., Délano-Frier, J. P., Gómez-Lim, M. Á., Guzmán-Ortiz, D. A., & Peña-Cabriales, J. J. (2011). Critical aspects on the integral management of mango: flowering, anthracnosis and industrial waste. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(2), 221-234.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SAGARPA, 2017). Potencial mango. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257078/Potencial-Mango.pdf>. SIAP, Anuario Estadístico de Producción Agrícola.
- Secretaria, L., Bayogan, E. R., Lubaton, C. D., Majomot, A. M. C., Ekman, J., & Goldwater, A. (2021). Effect of harvest time, delay in destemming and desapping treatment on the sap volume and visual quality of 'Carabao' mango fruit. *Walailak Journal of Science and Technology (WJST)*, 18(7), 9076. <https://doi.org/10.48048/wjst.2021.9076>
- Trieu, N. M., & Thinh, N. T. (2022). Development of self-training algorithm for predicting mango maturity. In *22nd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, (pp. 1559-1564). Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://doi.org/10.23919/ICCAS55662.2022.10003751>
- Ulya, M., Chamidah, N., & Saifudin, T. (2024). Mango quality prediction based on near-infrared spectroscopy using multi-predictor local polynomial regression modeling. *F1000Research*, 12, Article 656. <https://doi.org/10.12688/f1000research.130015.2>
- Upadhyay, N., & Gupta, N. (2024). Mango crop maturity estimation using meta-learning approach. *Journal of Food Process Engineering*, 47(6), Article 14649. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14649>
- Yahaya, O. K. M., Jafri, M. Z. M., Aziz, A. A., & Omar, A. F. (2015). Simplified optical fiber RGB system in evaluating intrinsic quality of Sala mango. *Optical Engineering*, 54(6), Article 067108. <https://doi.org/10.1117/1.oe.54.6.067108>

2 ESTADO DEL ARTE EN LA PREDICCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE MADUREZ, Y TÉCNICAS PARA EL DESPRENDIMIENTO DEL FRUTO DE MANGO

Resumen

Para garantizar la mayor calidad posible de los frutos de mango es de gran importancia cosechar los frutos en la etapa de madurez adecuada, lo que garantiza un alto valor de mercado y nivel de aceptación por parte de los consumidores. La etapa de madurez en la que se cosechan los mangos desempeña un papel crucial al influir en varios atributos fisicoquímicos de la fruta, incluidos, entre otros, el color de la piel y la pulpa, la firmeza y la concentración de sólidos solubles totales (SST). A lo largo de los años, se han desarrollado una gran cantidad de metodologías y se han realizado numerosos estudios para evaluar con precisión la madurez de los mangos, lo que destaca la importancia de este aspecto en la industria frutícola. En el contexto de este proyecto de investigación en particular, se realizó una exploración de los métodos predictivos y de clasificación existentes en relación con la madurez del mango. Además, se llevó a cabo un análisis sobre varias metodologías destinadas a facilitar el proceso de desprendimiento de la fruta, particularmente en el contexto de la cosecha del mango, lo que arroja más información sobre los enfoques innovadores en este campo. Cabe destacar que la tecnología de infrarrojo cercano (NIR) se perfila como una herramienta rápida y precisa para medir la madurez de la fruta de forma no destructiva. Al mismo tiempo, los avances en las técnicas de recolección de fruta han desempeñado un papel fundamental a la hora de minimizar los daños a la fruta durante la cosecha, lo que ha permitido la adquisición de mangos de calidad.

Palabras clave: Fruto, calidad, métodos no destructivos, cosecha de mango, automatización de la cosecha.

Tesis de Doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Vargas-Cano David

Director de Tesis: Federico F. Hahn Schlam† y José Luis Rodríguez de la O

2.1 Introducción

La predicción y clasificación de la madurez del mango abarca una variedad de enfoques y metodologías que han sido objeto de investigación en los últimos años. La maduración del mango está gobernada por una serie de reacciones bioquímicas que incluyen cambios en la textura, color, contenido de azúcares, ácidos y aromas, los cuales se transforman de manera lenta y progresiva hasta que el fruto alcanza las condiciones óptimas de aroma y jugosidad (Quintero et al., 2013). La cosecha del mango en la etapa óptima de madurez fisiológica es crucial ya que impacta directamente la calidad de la fruta y la vida útil posterior a la cosecha (Thakur et al., 2022). La madurez del mango se puede determinar evaluando parámetros biofísicos y bioquímicos, los cuales proporcionan una evaluación integral de los índices de calidad y madurez del fruto (Jaman et al., 2022). La madurez del mango es un atributo multifacético que se puede evaluar utilizando diversos índices y por métodos destructivos y no destructivos, lo cual es ventajoso por varias razones, principalmente girando en torno a la eficiencia, precisión y sostenibilidad. Las técnicas no destructivas, como la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR), la visión artificial y el procesamiento de imágenes, y los modelos de aprendizaje automático, permiten evaluar la madurez del mango sin dañar la fruta, preservando así su valor de mercado y reduciendo el desperdicio (Khumaidi et al., 2022).

La actividad de cosecha del mango implica una variedad de técnicas y consideraciones para asegurar la calidad y longevidad de la fruta postcosecha. Los métodos tradicionales, como la rotura de frutas con un gancho adherido a un poste largo, a menudo resultan en contusiones y lesiones, haciendo que las frutas sean poco atractivas y reduciendo su vida útil (Savita et al., 2010). Por lo tanto, la mecanización de la cosecha de mango ha sido objeto de estudio y se ha encontrado que reduce significativamente las pérdidas poscosecha, mejora la vida útil y mantiene la calidad de la fruta (Prasad et al., 2019). Sin embargo, se presentan varios desafíos, principalmente debido a la naturaleza compleja de la tarea y las características de la fruta y los árboles. La altura de los árboles de

mango plantea un desafío, ya que las herramientas manuales tradicionales son inadecuadas para llegar a ramas más altas, y las máquinas mecanizadas, si bien están disponibles, a menudo son pesadas, costosas e inadecuadas para los pequeños agricultores (Kolhe & Jadhav, 2011). Otra dificultad significativa es el mecanismo de agarre, que es crucial para el desprendimiento y manipulación exitosos de los mangos sin causar daños. La falta de especificaciones universalmente adoptadas para el rendimiento de la pinza complica el desarrollo de efectores finales efectivos, ya que se deben evaluar diferentes diseños para métricas como el área de recolección, el volumen de recolección y la fuerza de agarre para garantizar un daño poscosecha mínimo (Goulart et al., 2023b).

Sin embargo, el objetivo de este capítulo es realizar una revisión exhaustiva del estado actual de la predicción y clasificación de la madurez del mango. Esto implica describir los factores clave utilizados como indicadores de la madurez de la fruta, junto con las técnicas para cuantificar y aproximar estos factores. Estas técnicas se clasifican en destructivas o no destructivas, y estas últimas son particularmente dignas de mención debido a su eficiencia y falta de impacto en la estructura física de la fruta. Además, el capítulo profundiza en varias metodologías para inducir el desprendimiento de la fruta, específicamente en el contexto de la cosecha.

2.2 Madurez del mango

La determinación del estado de madurez de los mangos implica evaluar una combinación de parámetros biofísicos y bioquímicos, que varían significativamente entre los diferentes cultivares y condiciones ambientales. Físicamente, se evalúan comúnmente parámetros como tamaño, peso, volumen y firmeza. Químicamente, la materia seca (MS), los sólidos solubles totales (SST), la acidez titulable (AT), y su relación son indicadores críticos.

2.2.1 Madurez basada en parámetros biofísicos

La madurez del mango se refleja en cambios en varios atributos físicos del fruto, tales como el tamaño, la forma, el color, el peso y la firmeza. Estos atributos pueden variar significativamente entre las distintas variedades de mango y sus etapas de maduración. Por ejemplo, se destaca que las dimensiones, tamaño, peso, volumen, relación de aspecto y esfericidad de los mangos varían significativamente entre los cultivares y aumentan a medida que el mango pasa de etapas tempranas de maduración a etapas de sobre madurez (Patel & Kar, 2023). De manera similar, el estudio sobre las variedades Haden, Kent, Palmer y Keitt establece valores estándar de madurez de cosecha basados en peso, longitud, ancho, volumen y densidad, lo que indica que estos atributos físicos son variables no destructivas cruciales para determinar la madurez del fruto del mango (Abu et al., 2022). Thakur et al. (2022), encontraron que los mangos variedad “Amrapali” cosechados en la etapa madura (110 días desde la plena floración) exhibían mejores atributos de calidad y mayor vida de anaquel en comparación con los cosechados en etapas inmaduras o sobremaduras, enfatizando la importancia del tiempo de cosecha adecuado. Muiruri et al. (2022), señalaron que, si bien el tamaño aumentaba a medida que se desarrollaban los frutos, no era un índice de madurez confiable ya que algunas frutas de pequeño tamaño alcanzaron una madurez avanzada antes que las más grandes. El uso de un software móvil basado en Android para detectar el color de la cáscara para los índices de madurez en los mangos ‘Mallika’ respalda aún más el papel del color como un parámetro físico significativo, con diferentes etapas marcadas por distintos cambios de color (Jaman et al., 2022). Ahmad et al. (2019), aplicaron técnicas de procesamiento de imágenes para identificar el grado de madurez en los mangos ‘Harumanis’ con base a la forma, demostrando que la forma puede ser un indicador vital de madurez, especialmente cuando el tamaño y el color no son confiables. El estudio de Pereira et al. (2018), donde evaluaron los cambios físicos, químicos y fisiológicos en los mangos ‘Uba’, encontrando que el patrón de desarrollo se ajustaba a un modelo sigmoideal, con cambios significativos en

los parámetros de longitud, diámetro y color a lo largo de la maduración, respaldando de esta manera que estos atributos puedan emplearse como parámetros para estimación de madurez. En conjunto, estos estudios ilustran que, si bien los parámetros físicos como el tamaño, la forma, el color y la firmeza son esenciales para determinar la madurez del mango, deben usarse junto con índices computacionales y bioquímicos para una evaluación de madurez más precisa y confiable.

2.2.2 Madurez basada en parámetros bioquímicos

La materia seca, los SST, la AT y el pH son indicadores clave de la madurez del mango. El contenido de MS permanece constante durante la maduración mientras que el contenido de azúcar aumenta y el contenido de ácido disminuye, lo que lo convierte en un indicador confiable de madurez y calidad final (Subeidi et al., 2010). Los estudios han demostrado que el contenido de MS está estrechamente relacionado con los SST de la fruta completamente madura, lo que se correlaciona directamente con la dulzura de la fruta y la aceptabilidad general (Subeidi et al., 2010; Polinar et al., 2019). Adicionalmente, se ha encontrado que el contenido de MS se correlaciona bien con atributos sensoriales como el gusto y la apariencia, validando aún más su uso como indicador de madurez (Jha et al., 2013). Los estudios han demostrado que los SST, que incluye azúcares y otras sustancias solubles, aumenta con la madurez del fruto, convirtiéndolo en un índice de madurez confiable. Por ejemplo, el SST de los mangos puede oscilar entre 7.6 y 22.1 °Brix, con valores más altos que indican mayor madurez y mejor calidad (Jha et al., 2013). De igual manera, el pH de la pulpa de mango tiende a aumentar, mientras que la AT disminuye a medida que el fruto madura, reflejando la conversión de ácidos orgánicos en azúcares (Robin & Zannat, 2024). Los azúcares reductores y no reductores también aumentan durante la maduración, lo que contribuye a la dulzura de la fruta y al perfil general de sabor (Zagade & Relekar, 2014). La etapa de madurez afecta significativamente estas propiedades químicas, como se observa en diversos cultivares de mango. Por ejemplo, el mango 'Garífta-merah' muestra cambios en

el color de cáscara y pulpa, firmeza, y SST en diferentes niveles de madurez, recomendándose una cosecha óptima a un nivel de madurez superior al 75% (Widayanti et al., 2023). Adicionalmente, la interacción entre la etapa de cosecha y las condiciones de almacenamiento puede influir en estos parámetros químicos. Por ejemplo, los mangos tratados con 1-metilciclopropeno (1-MCP) y almacenados a 12.5 ± 1 °C exhibieron mayor SST y azúcares totales, lo que indica una maduración retardada y una vida útil prolongada (Kumar et al., 2012). Además, la composición bioquímica de los mangos, incluyendo carotenoides totales, clorofila y fenoles, varía con la madurez, afectando la calidad nutricional y el atractivo visual de la fruta (Partibha et al., 2020). La madurez de los mangos también está influenciada por factores ambientales y los constituyentes bioquímicos presentes en las hojas y brotes, que juegan un papel en la síntesis de estímulos florales y el momento de la floración (Kumar et al., 2013). En general, los parámetros químicos de SST, AT, pH y MS, junto con técnicas no destructivas y factores ambientales, proporcionan un enfoque integral para determinar la madurez del mango, asegurando un momento óptimo de cosecha y manejo de calidad poscosecha.

2.3 Métodos de predicción y clasificación de la madurez del mango

2.3.1 Métodos destructivos

Los métodos destructivos para predecir la madurez del mango implican diversas técnicas que requieren alteración física o muestreo del fruto, lo que a menudo lo vuelve inadecuado para la venta. Un método destructivo común es la medición del contenido de MS. Este método implica tomar una muestra central de la fruta y secarla para determinar el porcentaje de MS. Otro enfoque destructivo es el análisis químico del contenido de SST, contenido de ácido, y la relación sólidos-a-ácido, que son indicadores críticos de madurez. Estos parámetros se miden típicamente extrayendo jugo de la fruta y analizándolo, usando métodos de refractometría y titulación (Salengke & Mursalim, 2013). Otro método destructivo implica la evaluación del color de la pulpa. Este método requiere que la fruta se

corte, por lo que no es adecuada para su posterior venta o consumo (Amaral et al., 2023). A su vez, la técnica tradicional de flotación basada en la gravedad específica, que estima la madurez del mango comparando la densidad del fruto con la del agua, también se considera destructiva ya que a menudo conduce a daños en la fruta durante el proceso (Khalid et al., 2017). La evaluación sensorial, que implica probar la fruta para evaluar atributos como dulzura, acidez y aceptabilidad general, es otro método destructivo. Este enfoque, aunque subjetivo, proporciona retroalimentación directa sobre la calidad de la fruta y a menudo se utiliza junto con otros análisis químicos (Polinar et al., 2019). Estos métodos destructivos, aunque precisos, a menudo requieren mucha mano de obra y no son adecuados para aplicaciones a gran escala o en tiempo real, por lo que es necesario desarrollar técnicas no destructivas y confiables para la evaluación de la madurez del mango.

2.3.2 Métodos no destructivos

Los métodos tradicionales de clasificación manual son propensos a imprecisiones y altos costos de mano de obra, lo que genera la necesidad de sistemas automatizados (Rathore & Meena, 2024). La determinación no destructiva de la madurez es crucial para la industria agrícola, permitiendo a los productores evaluar la calidad del fruto sin comprometer su integridad física. Métodos avanzados como la espectroscopía de reflectancia visible e infrarroja cercana, junto con técnicas de ultrasonido y termografía infrarroja, ofrecen herramientas precisas para medir parámetros como el contenido de azúcares, la firmeza y otros indicadores clave de madurez.

Espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR)

La tecnología de infrarrojo cercano se ha convertido en una poderosa herramienta para predecir la madurez del mango debido a su naturaleza no destructiva y rápida. La espectroscopia NIR, combinada con diversas técnicas quimiométricas ha mostrado resultados prometedores en la predicción de parámetros como MS, SST y firmeza, que son cruciales para determinar el índice

de madurez de los mangos (Khumaidi et al., 2022). Por ejemplo, el uso de regresión polinómica local con múltiples predictores ha sido eficaz para predecir el pH y SST de los mangos intactos, logrando una alta precisión con valores de error porcentual absoluto medio inferiores al 10 % (Ulya et al., 2024). Igualmente, la espectroscopia NIR se ha aplicado con éxito para predecir contenido de MS, AT y ácido ascórbico (AA) en mangos, con modelos de regresión por mínimos cuadrados parciales (PLSR), que muestran un rendimiento robusto cuando se preprocesan con métodos como corrección de esparcimiento múltiple y normalización por vector estándar (Munawar, 2014). También se ha validado la aplicación de la espectroscopia NIR en la predicción de la madurez y calidad de los mangos 'Carabao', con modelos PLSR logrando altos valores de R^2 para MS y SST, indicando su potencial para aseguramiento de calidad y sistemas de clasificación automática (Polinar et al., 2019). Se ha empleado la tecnología de imágenes de fluorescencia hiperespectral para predecir el contenido de materia seca de los mangos, con los mejores resultados obtenidos utilizando una combinación de los algoritmos muestreo adaptativo ponderado competitivo y Random Frog (RF), logrando un coeficiente de correlación de $R_p^2 = 0.9658$ (Kang et al., 2022). Por otra parte, la integración del análisis de componentes principales (PCA) con el análisis discriminante lineal (LDA) ha sido efectiva en la clasificación de los mangos según etapas de madurez y aceptabilidad general, logrando tasas de éxito de hasta 88 % (Polinar et al., 2019). Además, se ha estudiado el impacto de los métodos de preprocesamiento en modelos de aprendizaje automático como redes neuronales artificiales (RNA) y componentes principales con RNA, mostrando que el suavizado Savitzky-Golay (SG) de segundo orden potencia la precisión y robustez de estos modelos en la predicción de la calidad del mango (Tan & Chia, 2023). También se ha investigado la identificación de los niveles de madurez del mango basados en compuestos volátiles utilizando picos de absorción infrarroja, con análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales, clasificando efectivamente el período de almacenamiento en distintas etapas de madurez (Jiao et al., 2017). También, el uso de imágenes infrarrojas para

clasificar la madurez de los mangos 'Harumanis' con base al análisis del espectro cromático ha logrado una precisión de clasificación de 90.5 % (Sa'ad et al., 2017).

Visión artificial y procesamiento de imágenes

La visión artificial y el procesamiento de imágenes juegan un papel crucial en la predicción de la madurez del mango al aprovechar diversas técnicas para analizar las características visuales y físicas de la fruta. Las técnicas de procesamiento de imágenes son fundamentales, ya que permiten la extracción de características críticas como el color, el tamaño y la forma, que son indicativos de la madurez del mango (Sahu & Potdar, 2017). Por ejemplo, el uso de valores de escala de grises para monitorear los cambios de color durante la maduración ha mostrado un cambio significativo, logrando una tasa de precisión de 90.9 % bajo condiciones de iluminación controladas (Rathore & Meena, 2024). Se ha empleado el método de clasificación Fuzzy C-Means para categorizar los mangos en etapas maduras, semimaduras e inmaduras, logrando una precisión del 88.33 % al transformar los valores RGB (Red, Green y Blue por sus siglas en inglés) en espacios de color HSI y YCbCr (Habiburrohman & Suryani, 2022). Por otro lado, un método de procesamiento de imágenes digitales utilizando un conjunto de datos de 1463 imágenes de mango clasificó las etapas de madurez con precisiones de 98.97 %, 98.46 % y 98.2 % utilizando clasificadores de máquinas de vectores de soporte, vecinos más cercanos y árbol de decisión, respectivamente (Prabhu & Mamatha, 2022). La integración de estas técnicas no solo mejora la precisión de la detección de madurez, sino que también facilita procesos de clasificación de alta velocidad y automatizados, haciéndolos adecuados principalmente en aplicaciones comerciales en supermercados y otros sectores (Sahu & Potdar, 2017).

Ultrasonido

Las pruebas fisicoquímicas han demostrado que a medida que los mangos maduran, su peso, tamaño, croma y sólidos solubles aumentan, mientras que la acidez, firmeza y humedad disminuyen, todo lo cual puede ser monitoreado

usando tecnología de ultrasonido (Rosas-Mendoza et al., 2015). El uso de ondas ultrasónicas permite la medición del contenido de agua y textura del fruto. Por ejemplo, la reflexión ultrasónica a diferentes frecuencias puede medir estos parámetros, y con lógica difusa determinar el nivel de madurez con base a estas mediciones, como se demostró en un estudio que involucró aguacates, mangos y papayas (Adhimantoro & Gaol, 2014). Además, la velocidad de propagación de las señales de ultrasonido en jugo de mango se ha correlacionado positivamente con SST y contenido de sacarosa y se correlaciona negativamente con la AT y la firmeza de la fruta, haciendo de la velocidad un parámetro relevante para predecir la madurez (Valente et al., 2012). También, se ha utilizado la técnica de resonancia acústica para medir el volumen del mango de manera no destructiva, con una relación lineal establecida entre el volumen y la frecuencia de resonancia, lo que ayuda aún más en la evaluación de la madurez (Puttipipatkajorn, 2013). No obstante, el tratamiento con ultrasonido en mangos frescos ha mostrado resultados mixtos, con reducciones iniciales en SST y contenido de azúcar y mayor suavidad después del almacenamiento, lo que indica que los parámetros del método necesitan optimización para evitar el deterioro de la calidad (Santos et al., 2015).

2.4 Técnicas para el desprendimiento del fruto de mango

2.4.1 Métodos manuales

Los métodos tradicionales para separar la fruta del mango del árbol implican principalmente técnicas manuales que pueden ser intensivas en mano de obra y potencialmente dañinas para la fruta. Un método común es la cosecha manual, donde los trabajadores trepan a los árboles o usan escaleras para recoger los mangos a mano. Este método, aunque preciso, lleva mucho tiempo y requiere una mano de obra significativa. La cosecha manual con el uso de un gancho unido a un poste largo a menudo resulta en daños físicos, hematomas y escurrimiento de la savia debido a la ausencia del pedicelo, lo que lleva a pérdidas postcosecha y una vida de anaquel reducida (Deepak et al., 2018;

Savita et al., 2010). Otro método tradicional es la sacudida del árbol, donde se sacuden las ramas para desalojar la fruta. Este método puede conducir a pérdidas significativas después de la cosecha debido al daño físico, la pudrición del extremo del tallo y el escurrimiento de la savia, ya que los frutos a menudo caen sin sus pedicelos, haciéndolos más susceptibles al deterioro (Sharma et al., 2019). Para mitigar estos problemas, se han desarrollado herramientas y métodos mejorados. Por ejemplo, la cosechadora de mango KVK BRD, que incluye un marco cónico, una cuchilla para el corte del pedicelo y una red de recolección, ha mostrado mayor eficiencia y menores requerimientos de mano de obra en comparación con los métodos tradicionales (Deepak et al., 2018; Savita et al., 2010). También, se ha demostrado que el uso de un poste de recolección mejorado, equipado con una manga larga de malla plástica reduce significativamente las lesiones físicas y la pérdida de peso, extendiendo la vida útil de los mangos cosechados (Elkashif et al., 2015). Además, el uso de agentes para eliminación del látex como el hidróxido de sodio y el alumbre después de la cosecha puede controlar eficazmente la lesión, mejorando el atractivo estético y la calidad de los mangos (Barman et al., 2015).

2.4.2 Métodos mecánicos

Se han desarrollado y evaluado cosechadoras mecánicas de fruta de mango para enfrentar los desafíos de la cosecha manual. Se han propuesto diversos diseños y mecanismos para optimizar el proceso de recolección. Por ejemplo, una máquina de recolección de mango que utiliza sierras circulares para el corte de tallo, ha demostrado una alta eficiencia, con un porcentaje correcto de tallo de corte del 95 % a una velocidad óptima de 8.34 m/s, reduciendo significativamente las lesiones de la fruta en comparación con la recolección manual (Mohamed, 2017). Otro enfoque innovador implica el uso de una escalera hidráulica montada en tractor, que puede girar 360 grados y alcanzar hasta 12 m, potenciando la eficiencia de las operaciones de cosecha y poda (Thiyagarajan et al., 2020). Este sistema ha demostrado una capacidad de campo de 5,400 mangos por día, demostrando su idoneidad para operaciones a gran escala (Kolhe & Jadhav,

2011). Además, el desarrollo de los *phantoms* de frutas utilizando silicona y almidón ha facilitado la prueba de efectores finales en entornos controlados, lo que permite la evaluación comparativa del rendimiento de la pinza en términos de métricas como área de recolección, volumen de recolección y fuerza de agarre (Goulart et al., 2023a; Goulart et al., 2023b). También se han diseñado ayudas mecánicas como cortadores de discos, tijeras eléctricas y ganchos de vanguardia para aumentar la productividad laboral y reducir las lesiones de la fruta, con tijeras eléctricas que muestran las tasas de lesiones más bajas y los períodos de validez más altos para las frutas cosechadas (El-Iraqi et al., 2010). Se ha explorado el uso de vibradores inerciales para la recolección mecánica, con estudios que determinan las frecuencias y amplitudes de vibración óptimas para el desprendimiento selectivo del fruto con base en las propiedades físico-mecánicas del sistema fruto-tallo (Mayans Céspedes et al., 2015a; Mayans Céspedes et al., 2015b). Además, se ha desarrollado un dispositivo de brazo mecánico equipado con garras de sujeción, una varilla de recolección motorizada y una herramienta de cizallamiento para realizar operaciones simultáneas de agarre, corte y recolección, mejorando significativamente la eficiencia de recolección y evitando daños en la fruta (Liao et al., 2018). La efectividad de los métodos de recolección mecánica ha sido validada a través de diversos ensayos, mostrando que la recolección mecánica controla las pérdidas cuantitativas y mantienen mejor la calidad postcosecha que los métodos manuales, como lo demuestran los estudios sobre diferentes cultivares de mango (Prasad et al., 2019).

2.4.3 Métodos químicos

El uso de sustancias químicas específicamente para causar el desprendimiento del fruto como un método de cosecha ha sido poco o nada estudiada. Sin embargo, existen algunas sustancias relacionadas con la abscisión frutícola, el cual es un problema importante que afecta a la producción de mango en todo el mundo, y varios reguladores del crecimiento de las plantas, incluido el ácido giberélico (GA_3), el ácido abscísico (ABA), el etileno y el etefón, juegan un papel crucial en este proceso. Se ha demostrado que el ácido giberélico influye en el

desarrollo de la fruta y la abscisión. Los estudios indican que GA₃ puede retrasar el inicio de la maduración y reducir las tasas de respiración, prolongando así la vida postcosecha de los mangos y manteniendo la firmeza y calidad de la fruta durante el almacenamiento (Siddiqui et al., 2013; Castro et al., 2012). No obstante, su papel en la abscisión frutícola es complejo; concentraciones más bajas de GA₃ se asocian con una reducción de la abscisión del fruto, mientras que las concentraciones más altas pueden conducir a una madurez más temprana y un posible aumento del desprendimiento (Nakorn et al., 2015). El ácido abscísico, en cambio, está estrechamente ligado al proceso de abscisión. La investigación ha demostrado que los frutos a punto de desprenderse exhiben concentraciones más altas de ABA en comparación con los frutos intactos, lo que sugiere que ABA promueve la abscisión (Bains et al., 1999). Adicionalmente, se ha encontrado que ABA juega un papel clave en la maduración del fruto del mango, con aplicación exógena acelerando el proceso de maduración a través de la regulación de factores de transcripción específicos como MiHY5 (Wu et al., 2022). El etileno es otro regulador crítico de la abscisión y maduración del fruto. Se sabe que desencadena el proceso de abscisión mediante la difusión a la zona de abscisión y la unión a receptores específicos, lo que activa varias respuestas fisiológicas, incluyendo la reducción del transporte de auxinas polares y la regulación positiva de genes receptores de etileno como MieTr1 y MierS1 (Hagemann et al., 2015). El etefón, un compuesto liberador de etileno se ha utilizado para estudiar el proceso de abscisión en los mangos. La aplicación de etefón aumenta significativamente la producción de etileno, lo que a su vez potencia la abscisión de los frutos al reducir la concentración de sacarosa y alterar los receptores de etileno (Hagemann et al., 2015). Además, el papel del etileno en la maduración del mango está bien documentado, con fuentes endógenas y exógenas que influyen en el proceso de maduración y la vida de almacenamiento de la fruta (Srividhya & Sujatha, 2017).

Otras sustancias químicas son empleadas con otros propósitos. Por ejemplo, los tratamientos previos a la cosecha con químicos como cloruro de calcio y bórax,

combinados con el acolchado, mejoran la calidad de la fruta y reducen la pérdida fisiológica de peso (Bhusan et al., 2015). El uso de un aerosol de cloruro de calcio al 2 % junto con un acolchado negro de polietileno de baja densidad minimizó la pérdida de peso y mejoró el valor comercial, mientras que los tratamientos con bórax aumentaron el contenido SST y azúcar, mejorando la calidad general de la fruta (Singh et al., 2012). Además, el uso de materiales biodegradables para el ensacado de frutas durante el desarrollo, como los elaborados a partir de almidón de yuca y succinato de polibutileno, ha mostrado resultados prometedores en el mantenimiento de la calidad de la fruta y la reducción del impacto ambiental (Tuates & Caparino, 2016). La aplicación de productos químicos como cloruro de calcio deshidratado y carbendazim también ha sido eficaz para aumentar los niveles de azúcar durante la maduración, lo cual es crucial para el sabor y mejora el valor comercial de la fruta (Lamba & Kumar, 2020).

2.5 Conclusiones

La cosecha de mangos en su etapa óptima de madurez es fundamental para asegurar la máxima calidad, valor de mercado y aceptación por parte de los consumidores. La madurez del fruto influye notablemente en varios atributos fisicoquímicos, como el color de la piel y la pulpa, la firmeza y la concentración de sólidos solubles totales. Los métodos no invasivos, como la tecnología de infrarrojo cercano, se han convertido en instrumentos rápidos y precisos para medir la madurez de la fruta sin causar daños. No obstante, para una evaluación confiable y precisa de la madurez, es esencial considerar diferentes parámetros fisicoquímicos. En conjunto, estos métodos avanzados resaltan la integración de diversas tecnologías para mejorar la precisión, eficiencia y escalabilidad en la predicción de la madurez del mango, apoyando una mejor toma de decisiones en el sector agrícola.

Además, los avances en las técnicas de recolección de fruta han sido fundamentales para minimizar los daños durante el proceso de cosecha, lo que permite obtener mangos de primera calidad. La automatización de la cosecha del

mango ha demostrado reducir considerablemente las pérdidas posteriores a la cosecha y aumentar la longevidad de la fruta, aunque enfrenta desafíos debido a la compleja naturaleza de la tarea y de las características específicas de los árboles y las frutas. La altura de los árboles de mango y el desarrollo de mecanismos de agarre eficientes son áreas clave que requieren una mayor innovación para aumentar la eficacia y reducir los daños a la fruta.

2.6 Referencias

- Abu, M., Olympio, N. S., & Darko, J. O. (2022). Harvest maturity for mango (*Mangifera Indica* L.) fruit based on accumulated day-degrees (C), rainfall amount (mm), and physical fruit development properties. *Research Highlights in Agricultural Sciences*, 1, 78–94. <https://www.doi.org/10.9734/bpi/rhas/v1/16805d>
- Adhimantoro, S., & Gaol, F. L. (2014). Application of ultrasonic and fuzzy logic to determine fruit maturity level. *International Journal of Control and Automation*, 7(1), 27-38. <https://www.doi.org/10.14257/IJCA.2014.7.1.03>
- Ahmad, K. A. b., Othman, M., Abdullah, S. L. S., Ali, N. R., & Dawam, S. R. M. (2019). Mango shape maturity classification using image processing. In *4th International Conference and Workshops on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)*, (pp. 1-5). Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://www.doi.org/10.1109/ICRAIE47735.2019.9037776>
- Amaral, M. H., McConchie, C., Dickinson, G., & Walsh, K. B. (2023). Growing degree day targets for fruit development of Australian mango cultivars. *Horticulturae*, 9(4), 489. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9040489>
- Bains, K. S., Bajwa, G. S., & Zora Singh, Z. S. (1999). Effects of indole-3-acetic acid, gibberellic acid, and abscisic acid on abscission of mango fruitlets. *Tropical Agriculture*, 76(2), 88-92.
- Barman, K., Asrey, R., Pal, R. K., Jha, S. K., & Sharma, S. (2015). Influence of different desapping agents on the incidence of sapburn, ripening behaviour and quality of mango. *Journal of Food Science and Technology*, 52, 161-170. <https://www.doi.org/10.1007/S13197-013-0995-X>
- Bhusan, L. P., Panda, C., & Dash, A. K. (2015). Effect of pre-harvest chemical treatments and mulching on marketability of mango (*Mangifera indica* L.) cv. Amrapali. *Journal Crop and Weed*, 11(1), 216-219.

- Brecht, J. K., Sargent, S. A., Kader, A. A., Mitcham, E. J., Maul, F., Brecht, P. E., & Menocal, O. (2020). *Mango postharvest best management practices manual*. National Mango Board.
- Castro, J. C., Marsolla, D. A., Kohatsu, D. S., & Hora, R. C. (2012). storage and fruit quality of mango (*Mangifera indica* L.) treated with acid gibberellic. *Agronomic Journal of Scienses*, 1(1), 76-83.
- Deepak, Teggelli, R.G. and Thakur, V. (2018). Assesment of scientifically designed mango harvester for drudgery reduction over conventional methods, *International Journal of Pure & Applied Bioscience*. 6(1), 1673-1676. <http://dx.doi.org/10.18782/2320-7051.6465>
- Elkashif, M. E., Mohamed, T. B., & Elamin, O. M. (2015). Physical injury reduction in mango fruit using improved harvesting methods. *Gezira Journal of Agricultural Science*, 13(2), 1728-9556.
- El-Iraqi, M. E., Sharibim, Y., & El Khawaga, S. E. (2010). Design and evaluation of mechanical aid tools for mango fruits harvesting. *Misir Journal of Agricultural Engineering*, 27(4), 1630-1650. <https://doi.org/10.21608/mjae.2010.105083>
- Goulart, R., Jarvis, D., & Walsh, K. B. (2023a). Fruit phantoms for robotic harvesting trials—Mango example. *Sustainability*, 15(3), 1789. <https://doi.org/10.3390/su15031789>
- Goulart, R., Jarvis, D., & Walsh, K. B. (2023b). Evaluation of end effectors for robotic harvesting of mango fruit. *Sustainability*, 15(8), 6769.
- Habiburrohman, I., & Suryani, E. (2022). Maturity classification of golek mango using fuzzy c means clustering method based on hsi and ycbcr color space transformation. In *2022 International Conference on Informatics, Multimedia, Cyber and Information System (ICIMCIS)*. (pp. 401-406). Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://doi.org/10.1109/ICIMCIS56303.2022.10017524>
- Hagemann, M. H., Winterhagen, P., Hegele, M., & Wünsche, J. N. (2015). Ethephon induced abscission in mango: physiological fruitlet responses. *Frontiers in Plant Science*, 6, 706. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00706>
- Jaman, M. J., Hasan, M. F., Robbani, M., Masumbillah, T. R., Ferdous, K., & Rajib, M. M. R. (2022). Maturity indices color chart and quality assessment of mango (*Mangifera indica* cv. Mallika). *International journal of Scientific and Research Publications*, 12(7), 230-238. <https://www.doi.org/10.29322/ijsrp.12.07.2022.p12728>
- Jha, S. N., Jaiswal, P., Narsaiah, K., Kumar, R., Sharma, R., Kaur, P., & Bhardwaj, R. (2013). Determination of maturity parameters of indian mango cultivars based on eating quality during natural ripening. *Journal of Agricultural Engineering*, 50(2), 26-35.

- Jiao, L., Dong, D., Han, P., Zhao, X., & Du, X. (2017). Identification of the mango maturity level by the analysis of volatiles based on long optical-path FTIR spectroscopy and a molecular sieve. *Analytical Methods*, 9(16), 2458-2463. <https://www.doi.org/10.1039/C7AY00149E>
- Kang, Z., Geng, J., Fan, R., Hu, Y., Sun, J., Wu, Y., ... & Liu, C. (2022). Nondestructive testing model of mango dry matter based on fluorescence hyperspectral imaging technology. *Agriculture*, 12(9), 1337. <https://doi.org/10.3390/agriculture12091337>
- Khalid, N. S., Abdullah, A. H., Shukor, S. A. A., AS, F. S., Mansor, H., & Dalila, N. D. N. (2017). Non-destructive technique based on specific gravity for post-harvest *Mangifera indica* L. cultivar maturity. In *2017 Asia Modelling Symposium (AMS)*, (pp. 113-117). Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://doi.org/10.1109/AMS.2017.26>
- Khumaidi, A., Purwanto, Y. A., Sukoco, H., & Wijaya, S. H. (2022). Using fuzzy logic to increase accuracy in mango maturity index classification: Approach for developing a portable near-infrared spectroscopy device. *Sensors*, 22(24), 9704. <https://doi.org/10.3390/s22249704>
- Kolhe, K. P., & Jadhav, B. B. (2011). Testing and performance evaluation of tractor mounted hydraulic elevator for mango orchard. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4(1). <https://www.doi.org/10.3844/AJEASSP.2011.179.186>
- Kumar, A. K., Reddy, K. C. S., Babu, J. D., Pratap, M., & Chaturvedi, A. (2012). Influence of postharvest chemical treatments on shelf life and quality of 'Baneshan' mango harvested at different maturity stages. *Acta Horticulturae*. 1012, 405-412. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1012.51>
- Kumar, M., Ponnuswami, V., Jeyakumar, P., Kennedy, R. R., & Saraswathy, S. (2013). Studies on influence of season for biochemical parameters in mango cultivars. *African Journal Agriculture Research*, 8(49), 6394-6400.
- Lamba, A. K., & Kumar, A. (2020). Effect of pre-harvest application of chemicals and pesticide on total sugars in mango under ambient condition. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(1), 2038-2040.
- Liao, K., Wan, B., Wang, H., Liu, W., Yu, D., Zhang, J., Zhang, X., He, Y., He, H. (2018). Mechanical arm device for fruit harvesting. *Patente CN202702251U*.
- Mayans Céspedes, P. R., López Cansteñs, G. D. J., Romanchik Kriuchkova, E., & Pérez Sobrevilla, L. (2015a). Propiedades dimensionales e inerciales del sistema fruto-pedicelo del mango relacionadas con la cosecha por vibración. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(1), 163-173.

- Mayans Céspedes, P. R., López Cansteñs, G. D. J., Romanchik Kriuchkova, E., & Pérez Sobrevilla, L. (2015b). Elastic properties of mango fruit-stalk system related to harvest by vibration. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(8), 1781-1790.
- Mohamed, T. (2017). An innovative system for picking mango fruit. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 8(9), 411-420. <https://dx.doi.org/10.21608/jssae.2017.37572>
- Muiruri, J., Ambuko, J., Nyankanga, R., & Owino, W. O. (2022). Maturity indices of specific mango varieties produced at medium altitude agro-ecological zone in Kenya. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 22(6), 20572-20774. <https://www.doi.org/10.18697/ajfand.111.22025>
- Munawar, A. A. (2014). Multivariate analysis and artificial neural network approaches of near infrared spectroscopic data for non-destructive quality attributes prediction of mango (*Mangifera indica* L.). [Tesis de Doctorado: Universität Göttingen]. <http://dx.doi.org/10.53846/goediss-4407>
- Nakorn, N., Somporn, S., & Apinan, I. (2015). Effects of gibberellic acid on fruit growth and fruit development of mangosteen (*Garcinia mangostana* Linn.). *Journal of Agricultural Technology*, 11(2), 335-340.
- Partibha, Gehlot, R., Rekha, Kumari, A., Sindhu, R., Singh, R., Manju, K. M. (2020) Physico-chemical characteristics of mature green mango fruit and mint leaves. *International Journal of Chemical Studies*, 8(6), 2607-2609. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i6ak.11177>
- Patel, K. K., & Kar, A. (2023). Studies on variability of physico-biochemical parameters of mango fruit. *Journal of AgriSearch*, 10(1), 29-36. <https://doi.org/10.21921/jas.v10i01.12253>
- Pereira, d. S. D. F., Chamhum, S. L. C., Pereira, L. D., Dias, d. V. K., Ferreira, d. A. H., & Silva, C. S. C. (2018). Development and maturation of mango fruits cv. 'Ubá' in Visconde do Rio Branco, Minas Gerais State, Brazil. *Revista Ceres*, 65(6), 507-516. <https://www.doi.org/10.1590/0034-737X201865060006>
- Polinar, Y. Q., Yaptenco, K. F., Peralta, E. K., & Agravante, J. U. (2019). Near-infrared spectroscopy for non-destructive prediction of maturity and eating quality of 'Carabao' mango (*Mangifera indica* L.) fruit. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 21(1), 209-219.
- Prabhu, A., & Mamatha, C. (2022). Computer vision system in identifying the ripening stages of mango—Alphonso cultivar. In *2022 IEEE International conference on data science and information system (ICDSIS)*, (pp. 1-6). Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://doi.org/10.1109/ICDSIS55133.2022.9915811>

- Prasad, K., Sharma, R. R., Sethi, S., & Srivastav, M. (2019). Influence of harvesting method on postharvest loss, shelf-life and quality of mango (*Mangifera indica*) fruits. *Indian Journal of Agriculture Science*, 89(3), 445-449.
- Puttipipatkajorn, A. (2013). Volume measurement of mango using acoustic resonance technique. *Engineering and Applied Science Research*, 40(3), 291-296.
- Quintero, V., Giraldo, G., Lucas, J., & Vasco, J. (2013). Caracterización fisicoquímica del mango común (*Mangifera indica* L.) durante su proceso de maduración. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 11(1), 10-18.
- Rathore, K. S. S., & Meena, O. P. (2024). Automation in fruit ripening through Image Processing. In *2024 IEEE International students' conference on electrical, electronics and computer science (SCEECS)*, (pp. 1-5). Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://doi.org/10.1109/SCEECS61402.2024.10481948>
- Robin, K. M. M., & Zannat, T. (2024). Chemical changes in mango (cv. Fazli) as affected by fruit maturity and condition of ripening. *International Journal of Nutrition and Food Sciences*, 13(2), 24-30. <https://doi.org/10.11648/j.ijnfs.20241302.13>
- Rosas-Mendoza, M. E., Meléndez-Pérez, R., & Arjona-Román, J. L. (2015). Characterization and sorption isotherms of Mexican mango (*Mangifera indica* L.) Ataulfo variety with ultrasound pretreatment. *International Journal of Research*, 2(4), 1-8.
- Sa'ad, F. S. A., Shakaff, A. Y., Zakaria, A., Abdullah, A. H., & Ibrahim, M. F. (2017). Maturity assessment of Harumanis mango using thermal camera sensor. In *AIP Conference proceedings*, Article 1808(1). Article 020044 <https://www.doi.org/10.1063/1.4975277>
- Sahu, D., & Potdar, R. M. (2017). Defect identification and maturity detection of mango fruits using image analysis. *American Journal of Artificial Intelligence*, 1(1), 5-14. <https://doi.org/10.11648/j.ajai.20170101.12>
- Salengke, S. & Mursalim. (2013). Non-destructive technique for determining mango maturity. *Acta Horticulturae*, 975, 505-512. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.975.66>
- Santos, J. G., Fernandes, F. A. N., de Siqueira Oliveira, L., & de Miranda, M. R. A. (2015). Influence of ultrasound on fresh-cut mango quality through evaluation of enzymatic and oxidative metabolism. *Food and Bioprocess Technology*, 8, 1532-1542. <https://www.doi.org/10.1007/S11947-015-1518-8>

- Savita, S. M., Srinivasappa, K. N., Suresha, S. V., Vasanthi, B. G., Anand, G. M., & Sujith, G. M. (2010). Drudgery reduction using scientifically designed mango harvesters over conventional methods. *Journal of Dairying, Foods and Home Sciences*, 29(3and4), 222-226.
- Sharma, M. K., Kumar, S., Kumar, A., & Kumar, S. (2019). Assessment of mango harvester for drudgery reduction over conventional methods. *International Journal of Chemical Studies*, SP6, 801-804.
- Siddiqui, M. W., Dutta, P., Dhua, R. S., & Dey, A. (2013). Changes in biochemical composition of mango in response to pre-harvest gibberellic acid spray. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 78(4), 331-335.
- Singh, A. K., Singh, C. P., & Chauhan, P. (2012). Effect of pre-harvest chemical treatments and mulching on quality and marketability of Dashehari mango. *Indian Journal of Horticulture*, 69(4), 462-466.
- Srividhya, V., & Sujatha, K. (2017). Role of ethylene in fruits ripening process. In *International conference on energy, communication, data analytics and soft computing (ICECDS)*, (pp. 1916-192). Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://doi.org/10.1109/ICECDS.2017.8389783>
- Subedi, P., Walsh, K., & Purdy, P. (2010). Determination of optimum maturity stages of mangoes using fruit spectral signatures. *Acta Horticulturae*, 992, 521-527. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.992.64>
- Tan, Y. P., & Chia, K. S. (2023). Effects of pre-processing and principal components for artificial neural network in non-destructive internal quality prediction of mango across different harvest periods. In *2023 IEEE 13th International conference on control system, computing and engineering (ICCSCE)*, (pp. 144-148). Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://doi.org/10.1109/ICCSCE58721.2023.10237167>
- Thakur, R. R., Mangaraj, S., Kate, A. E., Sami, R., Al-Mushhin, A. A., Maklad, M. F., Uguru, H., & Helal, M. (2022). Effect of harvesting stages and storage temperature on quality attributes and post-harvest shelf-life of mango (*Mangifera indica*). *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 16(5), 770-782. <https://www.doi.org/10.1166/jbmb.2022.2219>
- Thiyagarajan, R., Suthakar, B., & Tajuddin, A. (2020). Tractor mounted hydraulic ladder for mango fruit harvesting. *Biotica Research Today*, 2(10), 1046–1048.
- Tuates, A. M., & Caparino, O. A. (2016). Development of biodegradable plastic as mango fruit bag. *International Journal on Advanced Science and Engineering*, 6(5), 799-806. <https://www.doi.org/10.18517/IJASEIT.6.5.892>
- Ulya, M., Chamidah, N., & Saifudin, T. (2024). Mango quality prediction based on near-infrared spectroscopy using multi-predictor local polynomial

regression modeling. *F1000Research*, 12, Article 656.
<https://doi.org/10.12688/f1000research.130015.2>

- Valente, M., Laux, D., & Prades, A. (2012). Changes of ultrasound characteristics of mango juice during fruit ripening. In *Agro Ingenieria. International Conference of Agricultural Engineering CIGR-AgEng2012, Valencia, Spain*. European Society of Agricultural Engineers.
- Widayanti, S. M., Mulyawanti, I., Dewandari, K., Winarti, C., & Hayuningtyas, M. (2023). Effect of maturity stage on physico-chemical properties of Gariftamerah mango fruit. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1172(1), 012050-012050. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1172/1/012050>
- Wu, S., Wu, D., Song, J., Zhang, Y., Tan, Q., Yang, T., ... & Liu, A. (2022). Metabolomic and transcriptomic analyses reveal new insights into the role of abscisic acid in modulating mango fruit ripening. *Horticulture Research*, 9. Article uhac102. <https://doi.org/10.1093/hr/uhac102>
- Zagade, V. V., & Relekar, P. P. (2014). Chemical composition, ripening behavior and organoleptic quality of mango cv. Alphonso as influenced by the period of maturity. *Plant Archives*;14(2), 751-756.

3 'ATAULFO' MANGO MATURITY INDEX PREDICTION USING THE AS7262 SPECTRAL SENSOR

Abstract

'Ataulfo' mango is highly produced in Mexico, being harvested when it reaches its physiological maturity. This process takes at least another month for the fruit to reach consumption maturity. Warehouses and markets present important losses as the ready-to-eat status is unknown. Maturity status is determined by measuring slow and destructive physicochemical variables. An optical device based on the AS7262 spectral sensor was connected to the ESP32 microcontroller and measurements were correlated with soluble solids content (SSC), dry matter (DM) and firmness of mangoes obtained from the local market. Data analysis was carried out by partial least squares (PLS) regression, classification, regression tree (CART) and random forest (RF) models. With PLS, SST and firmness were predicted with R^2 of 0.61 and 0.76, respectively. The root mean squared error of prediction (RMSEP) was 0.91 for SSC and 0.67 for firmness. With the CART model, classification accuracy was 90% for SSC and 87% for firmness of intact mango fruits.

Keywords: Fruit ripeness, spectral analysis, CART model, nondestructive testing, peeled fruits.

Tesis de Doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Vargas-Cano David

Director de Tesis: Federico F. Hahn Schlam[†] y José Luis Rodríguez de la O

Publicado en : Revista Brasileira de Fruticultura

DOI : <https://doi.org/10.1590/0100-29452024048>

Predição do índice de maturidade da manga cultivar ‘Ataulfo’ usando o sensor espectral AS7262

Resumo

A manga cultivar ‘Ataulfo’ é altamente produzida no México e é colhida quando atinge maturidade fisiológica. Este processo leva pelo menos mais um mês para o fruto atingir maturidade de consumo. Armazéns e mercados apresentam perdas importantes porque o status “pronta para consumo” é desconhecido. O status de maturidade é determinado pela medição de variáveis físico-químicas lentas e destrutivas. Um dispositivo óptico baseado no sensor espectral AS7262 foi conectado ao microcontrolador ESP32 e suas medidas foram correlacionadas com o teor de sólidos solúveis (TSS), matéria seca (MS) e firmeza de mangas obtidas no mercado local. Análise dos dados foi realizada por meio de modelos regressão por mínimos quadrados parciais (PLS), árvore de classificação e regressão (CART) e floresta aleatória (RF). Com o modelo PLS, TSS e firmeza foram previstos com R^2 de 0,61 e 0,76, respectivamente. A raiz do erro quadrático médio de predição (RMSEP) foi de 0,91 para TSS e 0,67 para firmeza. Com o modelo CART, a precisão da classificação foi de 90% para TSS e 87% para firmeza de frutos intactos.

Termos de indexação: Maturação de frutos, análise espectral, modelo CART, testes não destrutivos, frutos sem pele.

3.1 Introduction

Mango (*Mangifera indica* L.) is the third most important tropical fruit worldwide, with Mexico being the fourth producer and the main exporting country. The fruit demand is increasing and an accumulated growth of 25.66% is estimated for the year 2030 (PALOMEQUE et al., 2023). ‘Ataulfo’ mango is native to Chiapas, Mexico, and has become commercially exploited in the national and international markets due to its organoleptic properties. These properties include sweet flavor, fleshy pulp, and excellent aroma (MENDOZA-HERNÁNDEZ et al., 2020), which

are dependent on harvest maturity. Mangos accumulate carbohydrate reserves until they reach a level associated with physiological maturation. These reserves are converted into soluble sugars as the fruit reaches the appropriate maturity for consumption (SUBEDI & WALSH, 2011). Therefore, mango harvested in immature state will not ripen normally, eventually becoming softer, and its flavor will not reach adequate levels (OSUNA-GARCÍA et al., 2021).

Producers harvest large amounts of immature fruits to achieve high prices at the beginning of the season. Indicators used to select fruits to be harvested are visual and subject to the farmer's experience. However, an instrument capable of determining fruit maturity status would improve fruit quality standards required by the market. Spectroscopy techniques have proven to be the most accurate in estimating maturity indices in a non-destructive manner. These techniques can predict dry matter content, soluble solids content, firmness, titratable acidity, color, and chlorophyll content (SHAH et al., 2020).

Most studies assessing the quality parameters of fruits and vegetables by spectroscopy use visible-near infrared (Vis-NIR) wavelengths (ULYA et al., 2023), which cover the range of 380 to 2500 nm in the electromagnetic spectrum. This option is used when is since signals from nearly all significant structures and functional groups in organic compounds can be detected within this spectrum (WANG et al., 2015). However, it is crucial to highlight that the visible spectrum (Vis) has been explored by researchers such as Jha et al. (2007) and Yahaya et al. (2015), who proposed the use of this cost-effective alternative. In this approach, predictions are inherently linked to the type of device and model used. Specifically, Jha et al. (2006) used color values obtained with a handheld colorimeter to determine mango ripeness by using an SSC maturity index. Yahaya et al. (2015) determined both mango SSC and firmness by using a system composed of red, green, and blue light-emitting diodes, along with a single visible light photodetector.

Currently, novel, and compact spectral sensors can be integrated with microcontrollers, simplifying the development of cost-effective and versatile devices suitable for a broad range of applications. Among these applications, a reliable determination of fruit ripeness indices should be highlighted. These economical and simple alternatives have limitations, such as their measurement range and precision (BOTERO -VALENCIA et al., 2021). However, these measurements can be compensated with the use of machine learning models. Therefore, the main objective of this study was the development and evaluation of an optical device based on the AS7262 spectral sensor, connected to an ESP32 microcontroller. This device was designed to perform rapid and non-destructive measurements aimed at determining crucial parameters such as dry matter (DM), soluble solids content (SSC), and firmness of 'Ataulfo' mangoes. This technology has the potential to enhance the quality of harvested mangoes, reduce losses in the supply chain, and improve production and distribution efficiency, benefiting both producers and consumers.

3.2 Material and methods

3.2.1 Equipment Design

The equipment based on ESP32 microcontroller (Espressif Systems, DEVKIT V1, China), communicates through the I2C protocol with an AS7262 sensor (SparkFun Electronics, Breakout AS7262, U.S.A.). This sensor is a six-wavelength detection device with 40 nm-bandwidths centered at 450 nm, 500 nm, 550 nm, 570 nm, 600 nm, and 650 nm. As light source, the sensor module incorporates a white Light Emitting Diode (LED) with color temperature of 5700K and irradiance of 600 $\mu\text{W cm}^{-2}$. The LED's spectrum is characterized by a wide double-peak pattern, spanning from 430 nm to 730 nm (STAMFORD et al., 2023). A micro-SD flash memory reader module was integrated with the equipment to save data, together with 128x64 pixel Organic Light Emitting Diode (OLED) screen to display readouts. The equipment was designed to operate with a 2200 mAh lithium battery (Figure 1).

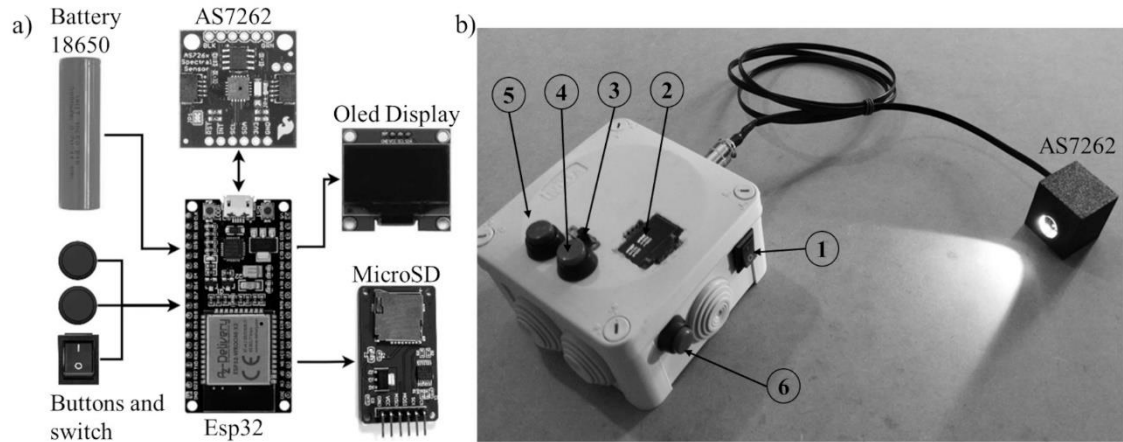


Figure 1. Components (a) used by the final prototype and (b) fitting inside the box showing the power switch (1), OLED screen (2), LED activation switch (3), buttons to perform the reading (4), to save data (5) and to restart the equipment (6).

3.2.2 Experimental design

In the local market of Texcoco, Mexico, 72 ‘Ataulfo’ mangoes were randomly acquired. The color of fruits obtained from the local market was from green to yellow (Figure 2a), being an indicator of acceptable physiological maturity according to the NMX-FF-058-SCFI (2006) standard. The mango color can be seen in fruits hanging on the tree where fruits are harvested (Figure 2b).



Figure 2. ‘Ataulfo’ mango fruits (a) in the market and (b) hanging on the tree.

Two circles were marked over the equatorial zone of both lateral sides of fruits to begin the sampling procedure. The peel area of one of the circles was removed before the equipment scanned fruit surface and pulp (Figure 3).

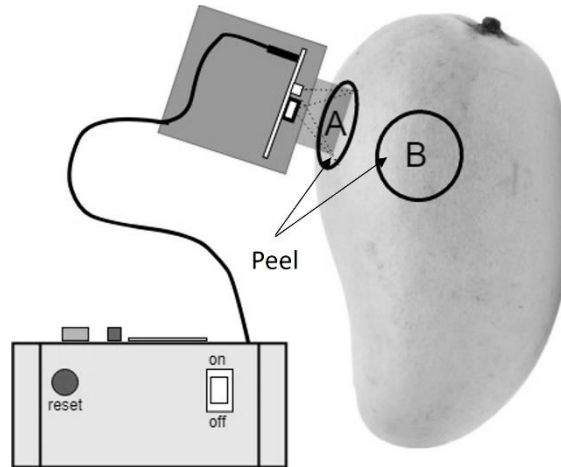


Figure 3. Measurements taken in areas previously marked on both intact and peeled fruits using the prototype and the AS7262 sensor.

In the first zone (region A) dry matter content was obtained, while in the second (region B) firmness and soluble solids contents were determined, averaging measurements from both sides. This procedure was adopted by Dos Santos et al., in 2017. Firmness (kg cm^{-2}) was measured using analog penetrometer (LUZEREN®, GY-03, México) with 8 mm insertion tip. SSC content ($^{\circ}\text{Brix}$) was obtained with portable refractometer (Sper Scientific Ltd., 300003, U.S.A.). Both procedures were performed following recommendations of the official Mexican standard (NMX-FF-058-SCFI, 2006). Dry matter (%) was obtained after inserting 5g of pulp in a drying oven (RIOSSA®, H-41, Mexico) set at 65°C , until reaching constant weight.

3.2.3 Data analysis

Data were analyzed using the R software version 4.2.0 (R CORE TEAM, 2023) and the RStudio integrated development environment. Data were randomly partitioned into two sets: with the "sample_frac()" function, 70% of data was extracted to form the training set, and with the "setdiff()" function, the remaining

30% was obtained to evaluate the model. Maturity indices (DM, SSC, and firmness) were predicted using partial least squares (PLS) regression and cross-validation. The performance of models was evaluated with the determination coefficient (R^2) and the Root Mean Square Error (RMSE).

The classifications were conducted using classification and regression tree (CART) and random forest (RF) models, assessing each parameter individually. Regarding DM, fruits were classified into two categories: "Acceptable" for fruits with $DM > 16.9\%$ and "Unacceptable" for those with $DM \leq 16.9\%$. This partition corresponds to the quality indices defined by González-Moscoso (2014) and Nassur et al., (2013). SSC was classified into three categories: "low" for values $< 16\%$, "medium" for values from 16 to 18% and "high" for values $> 18\%$ (HAHN, 2002). Firmness was classified into two categories, "Acceptable" for fruits with firmness less than 2.7 kg cm^{-2} and "Unacceptable" for fruits with firmness $\geq 2.7 \text{ kg cm}^{-2}$. The value used as threshold for categories corresponds to the average firmness value between maturity stages 2 and 3 (12.4N and 14.8 N) proposed by Palafox-Carlos, et al., (2011).

The performance of models was determined by their accuracy percentage and by the Kappa index, whose coefficient reflects the inter-observer agreement and is defined by equation 1. Kappa values, as defined by Landis and Koch (1997), are within the range from 0 to 1, and are classified as follows: almost perfect (0.8–1.0), substantial (0.6–0.8), moderate (0.4–0.6), fair (0.2–0.4), slight (0–0.2), and poor (≤ 0).

$$K = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e} \quad (1)$$

Where: P_0 is the observed agreement and P_e the expected agreement due to the random chance (ACHU et al., 2020).

3.3 Results and discussion

3.3.1 RGB/AS7262 ratio

The three primary colors are standardized at wavelengths of 700 nm, 546.1 nm, and 435.8 nm for R, G, and B, respectively (MIHA et al., 2007). Wavelengths of the AS7262 sensor strongly related to RGB channels are: 650 nm for the R channel, 570nm, 550 nm and 500 nm for the G channel and 450 nm for the B channel, since in the correlation analysis carried out with 50 samples, these variables stand out with the highest values, with significance level $\alpha = 0.05$ (Figure 4a). However, using the AS7262 sensor variables to determine 8-bit RGB values by linear regression (Figure 4b), $R^2 = 0.83$ for R, $R^2 = 0.93$ for G and $R^2 = 0.87$ for B were obtained.

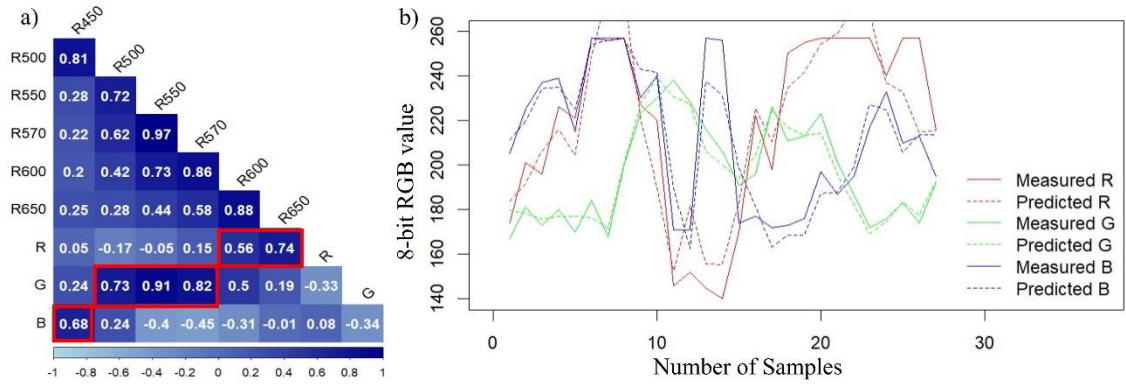


Figure 4. AS7262 spectral variables (a) related to RGB values (b) measured and predicted from 27 samples with linear regression.

3.3.2 Fruit measurements

Data statistical results are presented in detail in Table 1. This table also includes means and standard deviations corresponding to training and test sets. Despite disparities observed among the means of these sets, it is imperative to highlight that the results obtained from the application of the Student's t-test for the three variables yielded $p \geq 0.05$, suggesting that there are no statistically significant differences between analyzed sets.

Table 1. Quality parameter statistical results including minimums, maximums, means, training set means, and evaluation set means, along with statistical significance assessed by the Student's t-test and its corresponding p-value.

Parameter	Min	Max	Mean [§]	Training mean [§]	Test mean [§]	Significance
DM	11.71	19.84	15.05± <u>1.82</u>	15.20 ± <u>1.84</u>	14.74± <u>1.77</u>	NS (p<0.32)
SSC	10.0	18.0	13.41± <u>1.68</u>	13.32 ± <u>1.84</u>	13.61± <u>1.27</u>	NS (p<0.44)
Firmness	1.2	4.4	2.33 ± <u>0.84</u>	2.43 ± <u>0.88</u>	2.13 ± <u>0.73</u>	NS (p<0.14)

[§] Mean ± standard deviation, NS = Not Significant

3.3.3 Dry matter prediction

For dry matter, the best PLS model fit was obtained by using the six spectral variables. However, poor predictions were observed, obtaining determination coefficients lower than 0.4 for both intact and peeled fruits, although RMSE values of 1.22 and 1.34 were obtained for calibration and evaluation, respectively, for intact fruits, while for peeled fruits, values were 1.26 for calibration and 1.54 for evaluation. The poor model performance can be attributed to the fact that the six sensor channels are from the visible spectrum. This is consistent with results obtained by dos Santos Neto et al. (2017), who used PLS model in the 699-981 nm range. They included the 960 nm band related to the molecular vibrations of water and therefore to pulp water content.

3.3.4 Soluble solids content prediction

The PLS model has proven to be a robust soluble solids content predictor (MUNAWAR et al., 2016). Variable R500 (Reflectance at wavelength of 500 nm) was the one that presented the lower variation, which can be attributed to the predominance of a particular green color among sampled fruits.

$$\begin{aligned}
SSC = 9.33 + 4.83 \frac{R450}{R500} - 7.95 \frac{R550}{R500} - 2.25 \frac{R570}{R500} + 3.06 \frac{R600}{R500} \\
- 2.06 \frac{R650}{R500} + 1.71 \frac{R650}{R500}
\end{aligned} \quad (2)$$

SSC prediction values given by equation 2 are shown in the scatterplot (Figure 5). The R^2 determination coefficient obtained for intact fruits was 0.61, which was higher than that obtained for dry matter and RMSEP of 0.91. Similar results were obtained by Yahaya et al., (2015), reporting R^2 of 0.593 and RMSEP of 1.34, using three wavelengths in the visible spectrum with peaks at 470 nm, 525 nm and 635 nm using RGB system with LED lighting. In addition, they found that the red wavelength presents the highest correlation among all, being the best linear combination of the three peaks.

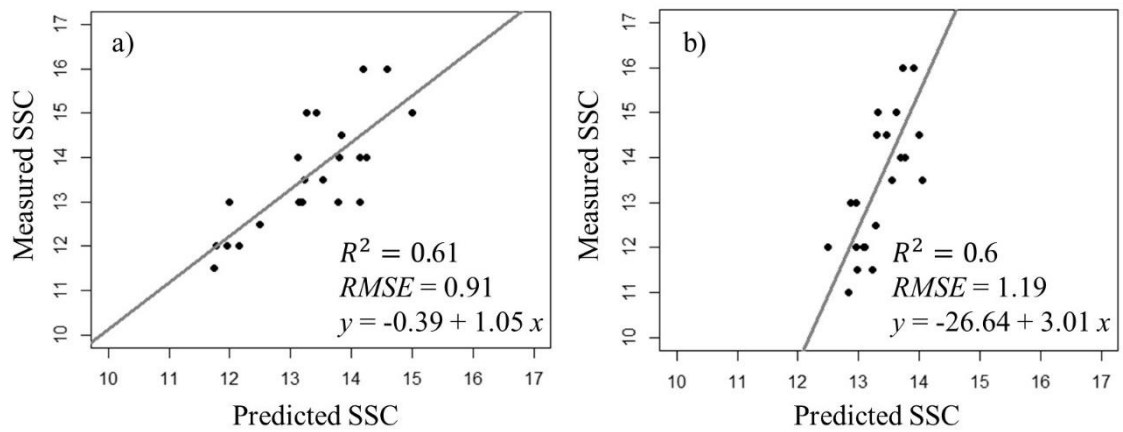


Figure 5. Linear relationship between predicted and SSC (°Brix) measurements in a) intact b) peeled fruits.

3.3.5 Firmness prediction

Great difference in PLS performance was observed for data from intact fruits and peeled fruits. The best fit was achieved for peeled fruits, where equation 3 and 4 were obtained for intact and peeled fruits, respectively. Both equations with five predictor variables and the sixth variable as factor presented performance improvements. The linear correlation between measured and predicted values (Figure 6), shows relatively good fit (R^2 of 0.87) for peeled fruits; however, this

technique is still destructive; therefore, it is not recommended. R^2 of 0.66 obtained for intact fruits is lower than that reported by other studies. For example, Yahaya et al. (2015), obtained R^2 of 0.76 by using the visible spectrum, while Valente et al. (2009), obtained a R^2 of 0.82 by using the NIR spectrum. However, RMSEP of 0.67 was obtained, which is lower compared to values obtained by these authors.

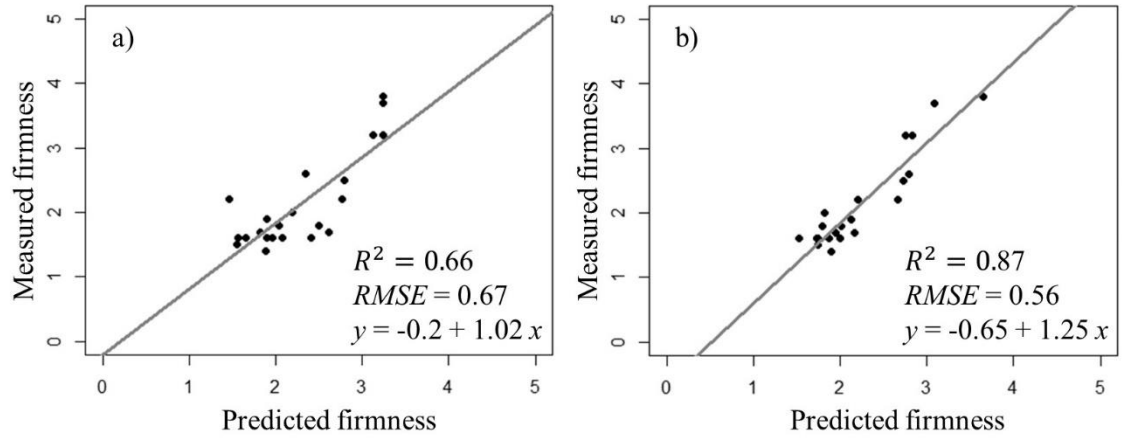


Figure 6. Linear relationship between predicted and firmness measurements (Kg cm^{-2}) in a) intact b) peeled fruits.

$$\begin{aligned} \text{Firmness} = & 0.87 + 0.52 \frac{R450}{R650} + 4.35 \frac{R500}{R650} + 0.53 \frac{R550}{R650} - 0.82 \frac{R570}{R650} \\ & - 0.19 \frac{R600}{R650} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{Firmness} = & -2.59 - 1.23 \frac{R450}{R650} + 4.02 \frac{R500}{R650} + 2.87 \frac{R550}{R650} - 0.03 \frac{R570}{R650} \\ & - 0.11 \frac{R600}{R650} \end{aligned} \quad (4)$$

3.3.6 Dry matter Classification

The CART model allows classification of 63% with intact fruits, which increased to 68% with the random forest model. In peeled fruits, accuracy was 45%, improving to 73% with the random forest model. Although classification was

higher in intact fruits, both models obtained Kappa indices lower than 0.2, which is considered "slight" according to Landis and Koch (1997). Therefore, the AS7262 sensor is not recommended for classifying mangos according to their dry matter content.

3.3.7 Soluble solids content classification

Mango fruits were classified into two categories: "Low" for $SSC < 15$ °Brix and "Medium" for $SSC \geq 15$ °Brix. The best performance was observed in intact fruits using the CART model (Figure 7), where each rectangle represents a node of the tree, and the total data percentage and the correct proportion of each category are shown. The classification rule used is also located under the node. End nodes, known as leaves, show the model accuracy. In the first leaf, 12% of data were grouped as "low" with 100% accuracy; however, the other leaves present lower accuracy percentage.

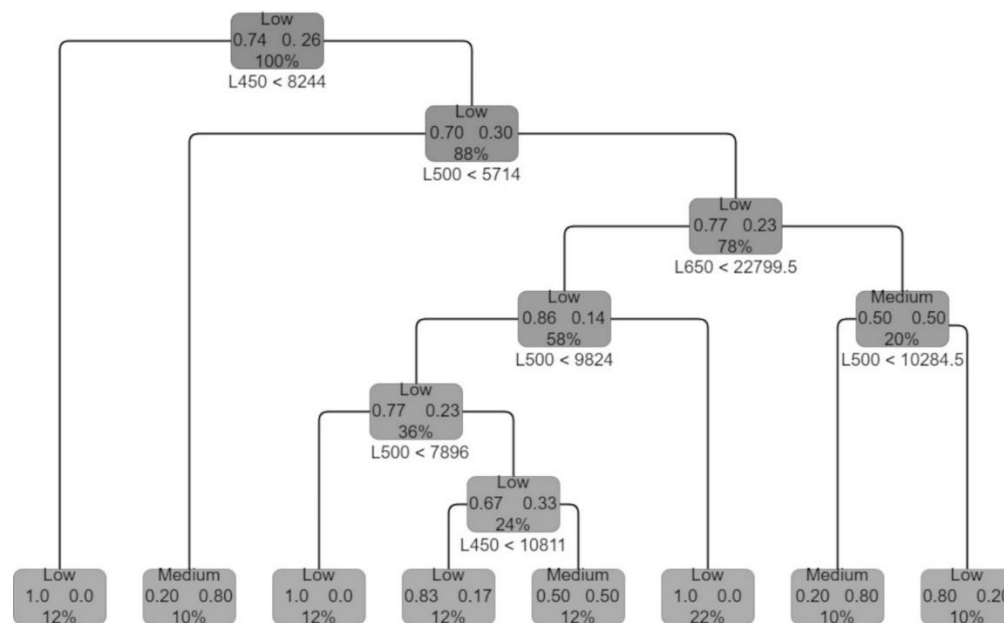


Figure 7. CART model for the classification of mango fruits into two SSC categories.

The model performed with overall accuracy of 90%. The Kappa index was 0.7, which is within the second criterion of Landis and Koch's scale of assessment and recognized as significant. With the random forest model, the performance

decreased, so that a more complex model that does not improve classification is not required. However, RF allows analyzing the model predictors. Permutation and node purity analysis detected that wavelengths of 450 nm, 500 nm and 650 nm were the most important predictors, being the same variables highlighted by the CART model. The three variables correspond to the color range from blue to red and are related to the fruit peel hue variation.

3.3.8 Firmness classification

Mango fruits were classified into two categories: "Acceptable" for firmness $< 2.7 \text{ kg cm}^{-2}$ and "Unacceptable" for firmness $\geq 2.7 \text{ kg cm}^{-2}$. The CART model performed better compared to RF for both data sets. The CART model was more accurate for intact fruits than for peeled fruits, with values of 86% and 72% respectively (Figure 8). The Kappa index obtained was of 0.67 for intact fruits, when compared to 0.37 achieved by peeled fruits, so it can be considered as a "Significant rating".

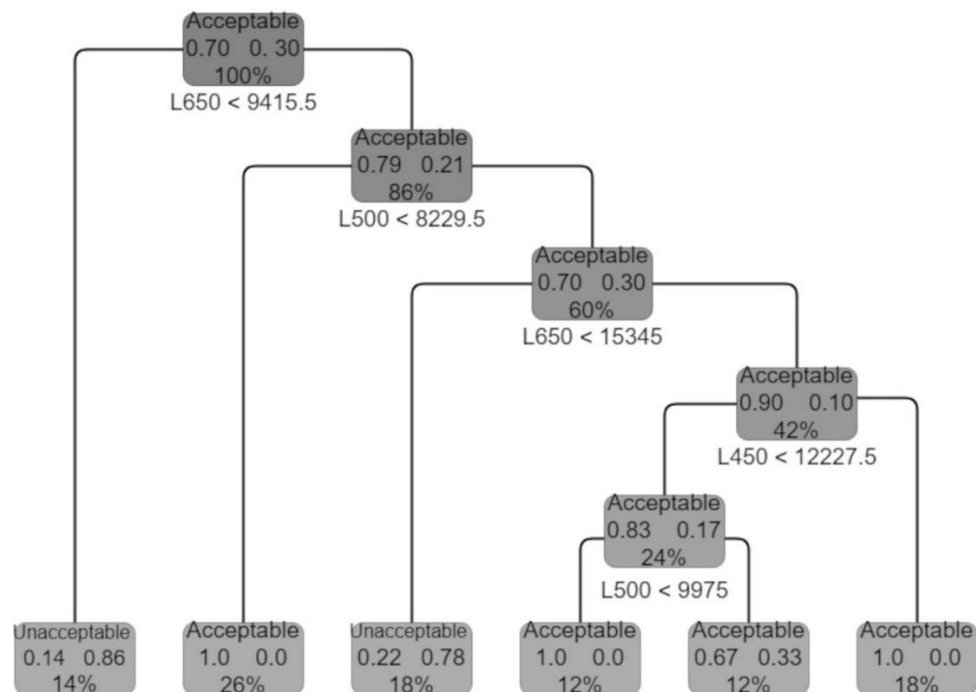


Figure 8. CART model for the classification of mango fruits.

The low performance of the model with data from peeled fruits is due to the little variation in the pulp color of fruits with firmness values below 12.4 N (PALAFOX-CARLOS, et al., 2011).

3.4 Conclusions

Machine learning models and low-cost spectral sensors, such as the AS7262, have shown promising results in predicting maturity indices of mango fruits such as SSC and firmness, and combined with a microcontroller-based device allow measurements to be fast and non-destructive. Variation in SSC and firmness indices during fruit ripening, as well as fruit peel color changes, showed superior performance for intact fruits compared to peeled fruits. It is possible that more robust models for prediction and classification may achieve better performance; however, it is important to consider that due to hardware resource constraints and given that the prototype is based on an ESP32 microcontroller, the available processing capacity is limited. In a supermarket using this technology over 90% of fruits can be properly sold out based on SSC, and this value can be increased using artificial intelligence models. Firmness is not a useful parameter in supermarkets as fruits become softer when people touch them before purchasing them.

3.5 Acknowledgements

The authors would like to thank the National Council of Humanities, Sciences and Technologies (CONAHCYT) Mexico and the Chapingo Autonomous University for the support provided to carry out this work.

3.6 References

ACHU, A. L.; AJU, C. D.; REGHUNATH, R. Spatial modelling of shallow landslide susceptibility: a study from the southern Western Ghats region of Kerala, India. **Annals of GIS**, vol. 26, no 2, p. 113-131, 2020. <https://doi.org/10.1080/19475683.2020.1758207>.

BOTERO-VALENCIA, J. S.; VALENCIA-AGUIRRE, J.; DURMUS, D. A low-cost IoT multi-spectral acquisition device. **HardwareX**, 9, e00173, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2021.e00173>.

DOS SANTOS NETO, J. P.; DE ASSIS, M. W. D.; CASAGRANDE, I. P.; JÚNIOR, L. C. C.; DE ALMEIDA TEIXEIRA, G. H. Determination of 'Palmer' mango maturity indices using portable near infrared (VIS-NIR) spectrometer. **Postharvest Biology and Technology**, 130, 75-80, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.03.009>.

GONZALEZ-MOSCOSO, S. Proposing minimum quality indices and improving ripening protocol for mangos (*Mangifera indica* L.) imported to the United States for the improvement of consumer quality. Master's Thesis, **University of California**, Davis, CA, 2014.

HAHN, F. Hyperspectral mango ripeness detection. In: 2002 ASAE Annual Meeting (p. 1). **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, 2002.

JHA, S. N.; CHOPRA, S.; KINGSLEY, A. R. P. Modeling of color values for nondestructive evaluation of maturity of mango. **Journal of Food Engineering**, vol. 78, no 1, p. 22-26, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.08.048>.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, 159-174, 1997. <https://doi.org/10.2307/2529310>.

MENDOZA-HERNÁNDEZ, C.; ROSAS-QUIJANO, R.; VÁZQUEZ-OVANDO, A.; GÁLVEZ-LÓPEZ, D. Challenges and controversies of the Ataulfo mango. **Revista mexicana de ciencias agrícolas**, 11(7), 1633-1645, 2020. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i7.2199>.

MUNAWAR, A. A.; VON HÖRSTEN, D.; WEGENER, J. K.; PAWELZIK, E.; MÖRLEIN, D. Rapid and non-destructive prediction of mango quality attributes using Fourier transform near infrared spectroscopy and chemometrics. **Engineering in Agriculture, Environment and Food**, 9(3), 208-215, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2015.12.004>.

NASSUR, R.; CRISOSTO, G.; DE FREITAS, S. T.; VILAS BOAS, E. D. B.; LIMA, L. D. O.; CRISOSTO, C. Dry matter as a quality index for brazilian mangoes. In: Simpósio Brasileiro de Pós-Colheita de Frutas, Hortaliças e Flores, 2013.

MIHA, D.; STRAJESCU, E. From wavelength to RGB filter. **University" Politehnica" of Bucharest Scientific Bulletin**, Series D, 69(2), 77-84, 2007.

NMX-FF-058-SCFI. Non industrialized food products for human consumption – fresh fruit – mango (*Mangifera indica* L.) – specifications, 2006.

OSUNA-GARCIA, J. A.; OLIVARES-FIGUEROA, J. D.; TOIVONEN, P. M.; PÉREZ-BARRAZA, M. H.; GOENAGA, R.; GRACIANO-CRISTÓBAL, M. J. Novel Nondestructive Technique to Determine Optimum Harvesting Stage of 'Ataúlfo'

Mango Fruit. **Journal of Advances in Agriculture**, 12, 61–69, 2021.
<https://doi.org/10.24297/jaa.v12i.9069>.

PALAFOX-CARLOS, H.; YAHIA, E.; ISLAS-OSUNA, M. A.; GUTIERREZ-MARTINEZ, P.; ROBLES-SÁNCHEZ, M.; GONZÁLEZ-AGUILAR, G. A. Effect of ripeness stage of mango fruit (*Mangifera indica* L., cv. Ataulfo) on physiological parameters and antioxidant activity. **Scientia Horticulturae**, 135, 7-13, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.11.027>.

PALOMEQUE, B. E.; GUERRERO, D. A. R.; GUTIÉRREZ, M. R. C.; ÁLVAREZ, T. E. C. El cultivo de mango y su interacción en la producción, comercialización y el turismo de negocios en Escuinapa, Sinaloa. **Revista Sinaloense de Ciencia, Tecnología y Humanidades**, 1(1), 2023.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. Available at: < <https://www.R-project.org/> >. Access in: February 2023.

RSTUDIO TEAM. **RStudio: Integrated Development Environment for R**. Boston: RStudio. Available at: < <http://www.rstudio.com/> >. Access in: February 2023.

SHAH, S. S. A.; ZEB, A.; QURESHI, W. S.; ARSLAN, M.; MALIK, A. U.; ALASMARY, W.; ALANAZI, E. Towards fruit maturity estimation using NIR spectroscopy. **Infrared Physics & Technology**, 111, 103479, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.infrared.2020.103479>.

STAMFORD, J. D.; STEVENS, J.; MULLINEAUX, P. M.; LAWSON, T. LED Lighting: A Grower's Guide to Light Spectra. **HortScience**, 58(2), 180-196, 2023.
<https://doi.org/10.21273/HORTSCI16823-22>.

SUBEDI, P. P.; WALSH, K. B. Assessment of sugar and starch in intact banana and mango fruit by SWNIR spectroscopy. **Postharvest Biology and Technology**, vol. 62, no 3, p. 238-245, 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.06.014>.

ULYA, M.; CHAMIDAH, N.; SAIFUDIN, T. Mango quality prediction based on near-infrared spectroscopy using multi-predictor local polynomial regression modeling. **F1000Research**, 12, 656, 2023.
<https://doi.org/10.12688/f1000research.130015.1>.

4 MANGO FRUIT DETACHMENT OF TREES AFTER APPLYING A BLEND COMPOSED OF HNO₃ AND CHARCOAL ACTIVATED

Abstract

As young workers prefer urban labors and migrate to USA and Canada, mango harvesting is becoming scarce in Mexican coasts. This seasonal labor is becoming expensive and when many orchards produce fruit simultaneously, grower losses increase. In this research an innovative fruit detachment method was tested after applying a viscous paste to the pedicel of mango fruits hanging in the tree. Activated carbon or charcoal (AC), was mixed with different amounts of nitric acid to provide three AC composite blends named: light, medium, and dense. The nanomaterial was applied with a brush to the fruit pedicel/peduncle taking up to 4 hours before the mango fruits felt to a net below the tree canopy. Mango detachment experiments indicated that the medium blend was the most efficient in releasing the fruit, taking an average of 2 hours. The dense nanomaterial decreased latex exudation to 7 % of the fruits. Fruit maturity emerged as a crucial factor for detachment time, followed by mango weight.

Keywords: Harvest; mango fruits; nitric acid; activated carbon; pedicel-peduncle.

Tesis de Doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Vargas-Cano David

Director de Tesis: Federico F. Hahn Schlam[†] y José Luis Rodríguez de la O

Publicado en : Plants

DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13091216>

4.1 Introduction

Mango (*Mangifera indica* L.) is one of the most important fruit grown worldwide, where more than 150 varieties are grown [1]. Mango evergreen trees can reach heights over 15 m as they become mature. Each mango fruit is attached from a pedicel-peduncle that exudates when cut an irritating liquid to the fruit, that smells like turpentine and is composed of an allergenic urushiol, 5-heptadecenylreorcinol. Fruit harvesting requires of excessive labor where pickers climb tall trees to collect mangoes manually or use bamboo sticks equipped with clippers at the end, together with a bag [2] that can handle up to 4 fruits. It is desirable to leave 10 cm stems to avoid the spurt of milky/resinous sap during fruit collection. Harvesting mango fruit with short-end stem retain more latex with antifungal properties, making the fruit less susceptible to stem end rot [3].

Mango mature plantations (30 years old) can produce between 10 and 25 t ha⁻¹ depending on the planting zone [4]. As trees require a relatively high level of irradiance for photosynthesis and fruit yield, pruning should be considered in the orchard. Pruning maintains tree size and allows better light penetration within the canopy [5], but severe pruning requires of at least three years to produce fruit again. Flower induction decreases with shading reducing terminal shoots at bearing inflorescences. Fruits grown-up at the top of the tree, show better quality than fruits inside the canopy [6] but are more difficult to harvest. Mango fruits collected from pruned trees presented a higher amount of total soluble solids (TSS), but lower total carotenoids and titratable acidity than fruits from normal unpruned trees [5]. Fruits inside the canopy keep a greener color as they are not exposed to sunlight all day and are 5% heavier than top canopy fruits [7]. High density productivity of mango trees with 1110 trees per ha at an age of 11 years, was ten times higher than the traditional 100 trees per ha with a yield of 5.9 t ha⁻¹ [8]. In high density trees subjected to severe pruning fruit weight, length and volume decreased [6].

Activated carbon (AC), is a microcrystalline, non-graphitic form of carbon with porous structure. AC presents small pores that boost the surface area available

for chemical reactions [9]. AC obtained from coconut shells [10] have higher density and a finer pore size distribution, being suitable for small molecule adsorption. AC can be activated physically or chemically. Chemical reaction of AC depends on the chemical activator, being its concentration, temperature, and activation time the parameters that determine the reaction range [11]. In order to obtain the AC from a coconut shell material it needs to be impregnated by an acid and requires of high temperatures (400-600 °C) to be carbonized. Application in agriculture include sugarcane bagasse heavy metal adsorption [12], malathion removal [13], and soil remediation [14.15].

Seasonal workers harvest mango trees but are becoming scarce throughout the coasts of Mexico. This situation leads to mango fruit buildup on thousands of trees, food losses and pest development. Harvest and marketing costs have been evaluated in 21 % of total mango production costs [16]. Machine tree harvesting methods can reduce the cost of harvesting by 35–45 % [17] in flat fields. Therefore, a project was started to automatize mango collection in flat and hilly fields, with the use of drones. It is important to encounter a simple methodology that can provide an automatic detachment without removing the entire pedicel and causing fruit discoloration through sap-peel contact [18]. Detached mango fruits fell to a net just below the tree canopy and determine its time (Figure 1). The manuscript layout considers the experimental setup including the AC blend preparation in section 2. In section 3, the fruit detachment efficiency results under different maturity stages, firmness and size are analyzed, to be further discussed in section 4. Lastly in section 5, future directions required to bring this innovation to practice are discussed.

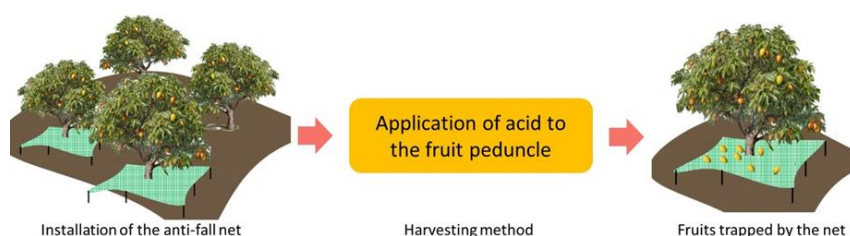


Figure 1. Net structure catches fruits falling from the tree.

4.2 Materials and Methods

The experiment was carried out during May 2023 in a commercial mango orchard located at Loma Bonita, Guerrero, Mexico ($17^{\circ}25'47''$ N, $-101^{\circ}11'19''$ W, 17 MASL). The mature orchard has 'Kent', 'Haden' and 'Keitt' mango trees. Preliminary tests were carried out with 'Haden' fruits (Figure 2a). The final tests were carried out with 'Keitt' mangoes, at different maturity stages. The botanical name for the stem attachment of the mango fruit is called pedicel and continues with the peduncle (Figure 2b).

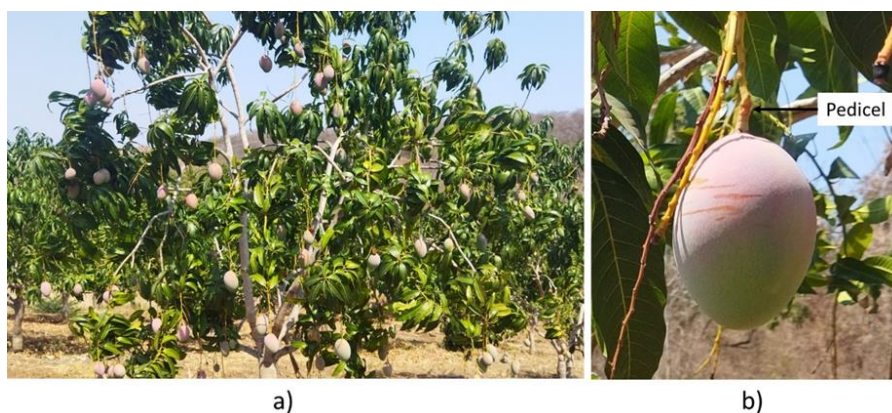


Figure 2. Keitt mango (a) fruits hanging from the tree, (b) showing pedicel.

In two different experiments acid was applied to the fruit pedicel to evaluate whether the fruit fell after some time. In the first experiment, three different acids were applied to "Haden" fruit pedicels directly. In the second experiment a blend with nitric acid was applied to fruits of the "Keitt" variety. In both experiments, 90 fruits were randomly selected from 10 different trees at heights ranging between 1 and 1.5 m from the floor. AC and nitric acid were mixed to provide a material that could be pasted to the fruit petiole-peduncle. This nano-structured material will be named AC (activated carbon) blend or AC paste throughout this paper. A brush applied the prepared solution to each fruit pedicel.

The mango harvesting system used a net fixed to the tree trunk. Net installation covered the area beneath the tree canopy and was secured with wood-based supports. These meshes prevent that mango fruits hit the ground, reducing damage by impacts.

4.2.1 Nitric acid (HNO_3), phosphoric acid (H_3PO_4) and hydrochloric acid (HCL) application at the pedicel-peduncle

The idea of applying acid to the pedicel-peduncle area was to detach the fruits in the minimum possible time. In the first experiment, three different acids were applied to the fruit pedicel-peduncle to induce detachment. The acids used were 55 % nitric acid (HNO_3), 85 % phosphoric acid (H_3PO_4) and 28 % hydrochloric acid (HCL). A dropper for punctual application applied phosphoric acid to 10 mango hanging fruits (Figure 3a). Afterwards, nitric acid was applied to the pedicel of 45 Haden mango hanging fruits with a hair nano atomizer; drops were formed, rolled down, ending over the fruit surface (Figure 3b). The effectiveness and damage caused to surrounding leaves, fruit peduncle, pedicel and fruit peel were evaluated. The main damages were caused due to the application method (Figure 3). The phosphoric and hydrochloric acid were applied, and the drops and acid runoff are shown in Figure 3c. The acid drops burnt-out the mango peel and never detached the fruit. Fruit and leaves damage are shown in Figure 3d and 3e.

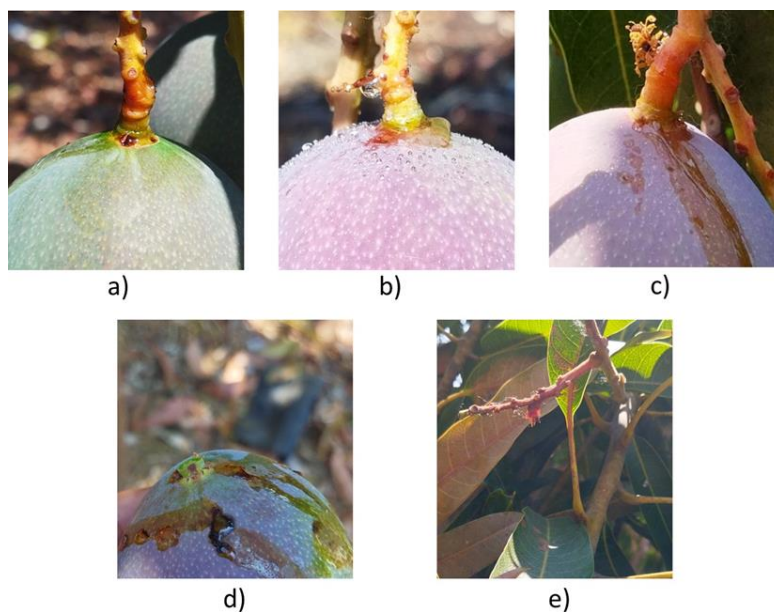


Figure 3. Fruit (a) with phosphoric acid applied at the fruit-pedicel, (b) drops of nitric acid after being atomized at the pedicel, (c) runoff of hydrochloric acid on the surface of the fruit, d) fruit with severe damage caused by the atomization and runoff of nitric acid.

Activated carbon powder was used to obtain a more consistent material that could avoid acid rollout after application. Blend preparation took place 15 minutes before application and consisted of 4 g of coconut activated carbon powder mixed with 4, 5 or 6 ml of 55 % nitric acid (Figure 4a). These variable-consistency AC blends were named light, medium and dense, respectively. AC powder and acid were weighted with a scale (ADIR, 10501, Mexico). The activated carbon was deposited in a laboratory sample jar, and then 4 to 6 ml of 55 % nitric acid was added depending on the final blend required, Figure 4b [19]. It was mixed with a plastic stirrer until a homogeneous blend was obtained and then the container was sealed until its application time. The AC blend (acid-composite) could last even for one day before its application, and during its preparation an exothermic reaction took place. It was mixed with a plastic stirrer until a homogeneous mixture was obtained and then the container was sealed. The container was shaken for 5 seconds using the applicator device before application. Three groups consisting of 30 “Keitt” mango fruits each were selected randomly. Each selected fruit was numbered from 1 to 90, forming three independent groups. Each blend was applied evenly to 30 fruits at the pedicel-peduncle with a 15 cm long painting brush. The acid-composite covered a cross section of 1 cm, one cm above the pedicel abscission zone (Figure 4b). The application began at 9 am, ending 20 minutes later for each group.

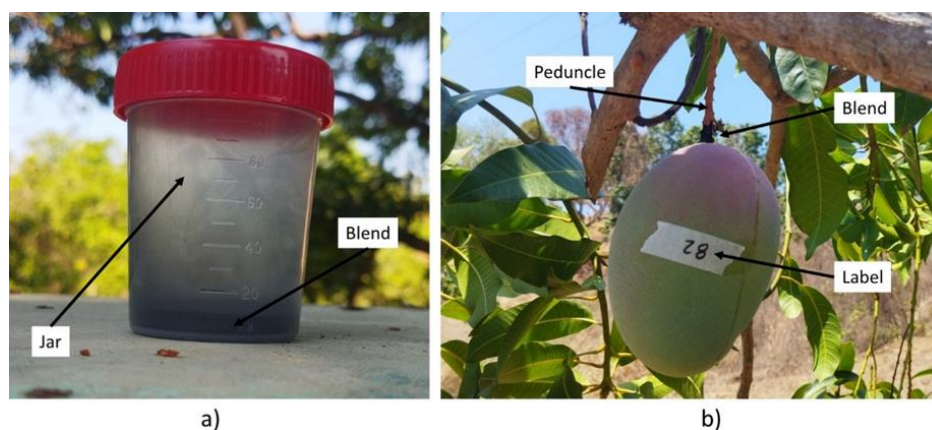


Figure 4. AC blend (a) preparation, and (b) application to the fruit pedicel.

In an additional experiment, the AC blend temperature during preparation was monitored with digital sensors (Maxim Integrated, DS18B20, San Jose, CA, USA). Three sensors recorded the temperature (Figure 5a) every 10 seconds for each AC blend type using a homemade datalogger based in the ESP32 microcontroller (Espressif Systems, DevKit V1, Shanghai, China). The test was performed under a constant ambient temperature of 25 °C (Figure 5). AC blends applied over the sensors are shown in Figure 5b.

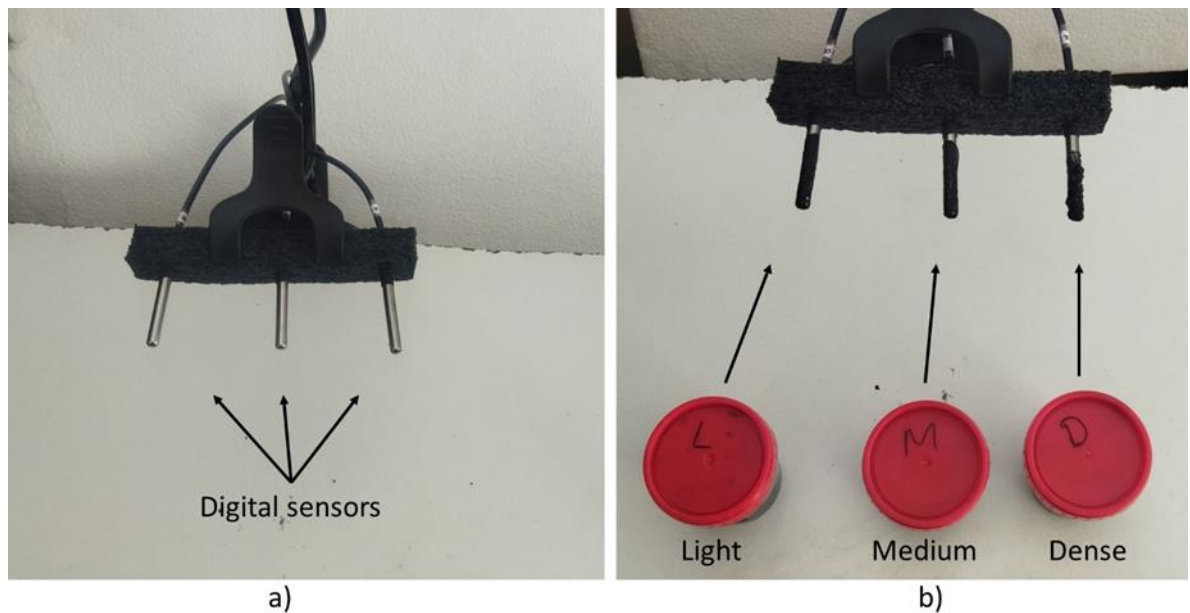


Figure 5. Temperature measurement a) before and b) after applying the three different AC blends to the sensors.

4.2.2 Mango fruit and pedicel-peduncle measurements

Each pedicel-peduncle diameter from a hanging mango fruit was measured with a digital micrometer (Mitutoyo, QuantuMike, Naucalpan de Juárez, Mexico) before the AC paste was applied. After the blend was applied, the time until the fruit fell was acquired. An infrared camera (FlirC5, Teledyne FLIR, Wilsonville, OR, USA) was used to measure the temperature at the pedicel once the AC blend was applied. The digital camera presents 5 MP meanwhile the IR presents 160 x 120 infrared pixels and can measure temperatures between 0 and 100 °C. Once the mango fruits were collected over the net, several measurements were obtained

(Figure 6). Weight was measured with a digital scale (model BAREC-5A, Rhino, Mexico City), while the percentage of fruits affected by latex and/or acid was evaluated by visual inspection. Firmness was measured using an analogue penetrometer (model GY-03, LUZEREN®, Mexico) equipped with an 8 mm insertion tip. Total soluble solids given in °Brix were quantified with a portable refractometer (model 300060, Sper Scientific Ltd., Scottsdale, AZ, USA). These measurements were taken once the fruit fell from the tree.



Figure 6. 'Keitt' mango fruits collected at the net after pedicel breakdown.

Pedicel-peduncle samples exposed to the reactive mixture were collected, as well as those randomly selected control samples. The samples were immersed in a solution composed of glycerin and alcohol in a ratio of two to one, to ensure their preservation and transportation to the laboratory. Afterwards, in the laboratory longitudinal histological sections were obtained with a sharp bistoury to observe and compare the effects of the acid application. Pedicel-peduncle samples were sampled on treated and control of approximately 2 cm each, which were fixed in 96 % ethanol:100 % glacial acetic acid (2:1; v:v) and processed in an automatic tissue exchanger (Tissuematon Fisher) with 2-ethoxyethanol (cellosolve) and xylene, then transfer to paraffin (55 °C) staying 72 hours inside a stove. The paraffin pyramid was made according to Sass (1968) technique [20] in a rotary microtome (model 820, American Optical, Vernon Hills, IL., USA); Longitudinal cuts were made with a thickness of 10 µm. The sliced sections were stained for

30 min at room temperature in a mixture of equal volumes of 0.1 % aqueous solutions of safranin and fast green, then washed in distilled water for 5 minutes and washed in 2 changes of absolute alcohol for 2–3 min [21]. The stained sections were then mounted on slides with coverslips by means of Haupt adhesive and 10 % formalin [20]. Digital images were obtained and saved in JPEG format with the aid of a Motic B3 Professional Series microscope, with the adaptation of a Moticam 480 camera with a 16 mm adapter.

4.2.3 Data analysis

The data were analyzed using the RStudio software, version 4.2. Fruit weight, stem diameter, soluble solids content (SSC) and firmness were subjected to the Kruskal-Wallis test to determine statistically significant differences between treatments [22-24]. A survival analysis was used to explore fruit cracking difference time. It used the "survival" package and the non-parametric Kaplan-Meier (product limit) estimator defined by Equation 1 [25-27].

$$\hat{S}(t) = \prod_{i:t_i \leq t} \left(1 - \frac{d_i}{n_i}\right) \quad (1)$$

Where: $\hat{S}(t)$ is the Kaplan-Meier estimator, t_i is the time at which the event occurs, d_i is the number of events that occurred at time t_i and n_i the number of events after time t_i .

Survival function comparison was carried out using Log-Rank tests. It evaluated significant differences in the fruit detachment time after different blends were applied. Additional hypothesis tests were carried out to evaluate the specific influence of various parameters, such as soluble solids content (SSC), mango fruit weight, stem diameter and fruit firmness, on fruit detachment success under different acid-composite materials applied to the fruit pedicel.

All statistical tests were performed with a significance level $\alpha = 0.05$, assuring results robustness. In cases where p-value adjustments were made using the

"Bonferroni" method, a corrected significance level was used ($\alpha = 0.05/n_{comparaciones}$). This practice allows rigorous control over type I errors [28], strengthening the validity and reliability of the results.

4.3 Results

Nitric acid was the only acid that detached the fruit during the first experiment and it occurred after a period of 4 days. As severe damage was caused to peel of all the fruits, a substance capable of fixing the acid to the peduncle had to be added. Fruit damage was reduced, meanwhile acid performance improved due to the punctual contact. Glycerin was used as an acid-binding agent to avoid acid drainage, inducing fruit detachment after 24 hours, but peel damage was still observed. The activated carbon AC blend produced less damage and fruit separation occurred in a lower time of 7 hours.

4.3.1 AC blend

Toxic vapors are released during AC-blend preparation caused by an exothermic reaction. After mixing the nitric acid with the activated carbon, the AC paste temperature rises rapidly (Figure 7a). The light paste reaches the highest temperature of 29.7 °C after one second, (Figure 7), being the ambient temperature is 25 °C. Subsequently it drops after the first hour and stabilizes after 2 hours (Figure 7b). After application, the temperature peak occurs for the light, medium and dense blends after 10, 20 and 40 seconds, respectively. The nano-paste inside the bottle remains at a stable temperature, increasing when it is shaken, even up to a day after being prepared.

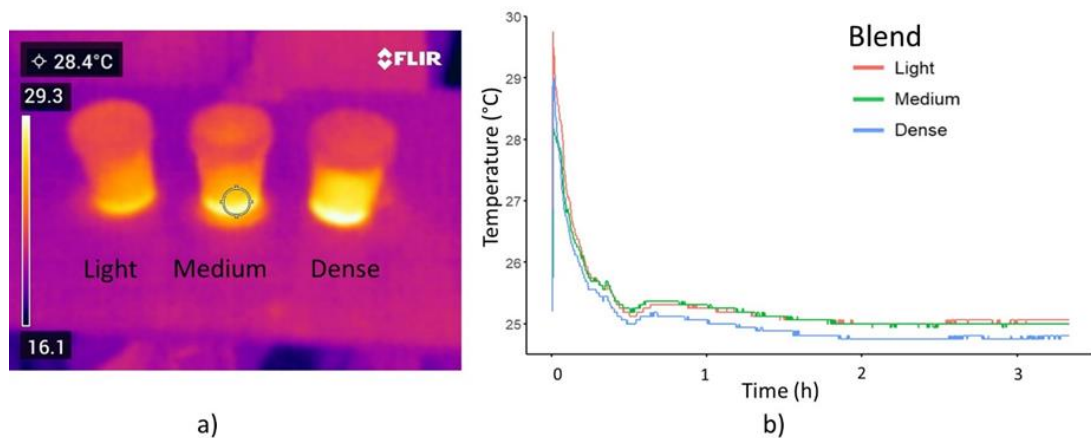


Figure 7. AC blend temperature (a) after preparation, and (b) during and after application to the digital sensors.

Fruit surface temperature depends on fruit transpiration and vapor pressure deficit (VPD) between the its surface and the air. High temperature reduces fruit acidity and high sugar content with dry matter accumulation [29]. A sunny exposed fruit in the outer-canopy will present a lower VPD than shaded fruits [30]. The thicker cuticle layer in mangoes grown at the canopy surrounding, changed its cuticle conductance. This explains why the mango tissue infrared temperature was higher than 34.5 °C. The pedicel (Figure 8a) measured 32 °C, four degrees over the AC paste temperature as solar irradiation heat the pedicel. The AC-blend applied to the pedicel remains at its temperature, being lower than the fruit temperature. The mango abscission and pedicel temperatures are shown in figure 8b and 8c, respectively. In figure 8c the temperature of the pedicel-peduncle is of 31°C once that is separated from the fruit.

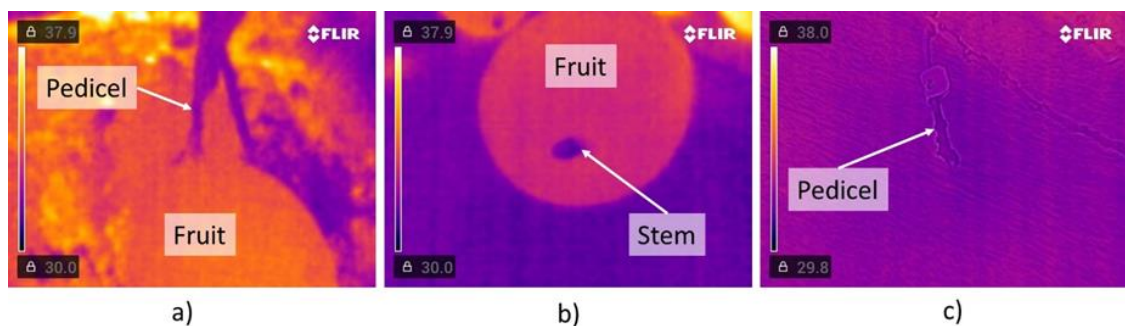


Figure 8. Thermal image a) after applying AC blend to the fruit pedicel, b) of the detached fruit, and c) pedicel after fruit detachment.

4.3.2 Pedicel

The fruits were detached between the pedicel and peduncle, above the mango abscission zone, as observed in Figure 9a and 9f. The large periclinally-elongated cells of the peduncle suffer deterioration when coming into direct contact with the nanocomposite blend, resulting in notable damage to the internal tissues (Figure 9b and 9c). The damage ends with the supporting capacity of the fruit, causing the pith rupture (Figure 9e) and the fruit detachment. The main indicator of peduncle cell degradation is revealed when latex flows out from the lactiferous channels. This latex can fall onto the fruit, taking the nitric acid over the peel, Figure 9f. These events cause substantial fruit damage, Figure 9d.

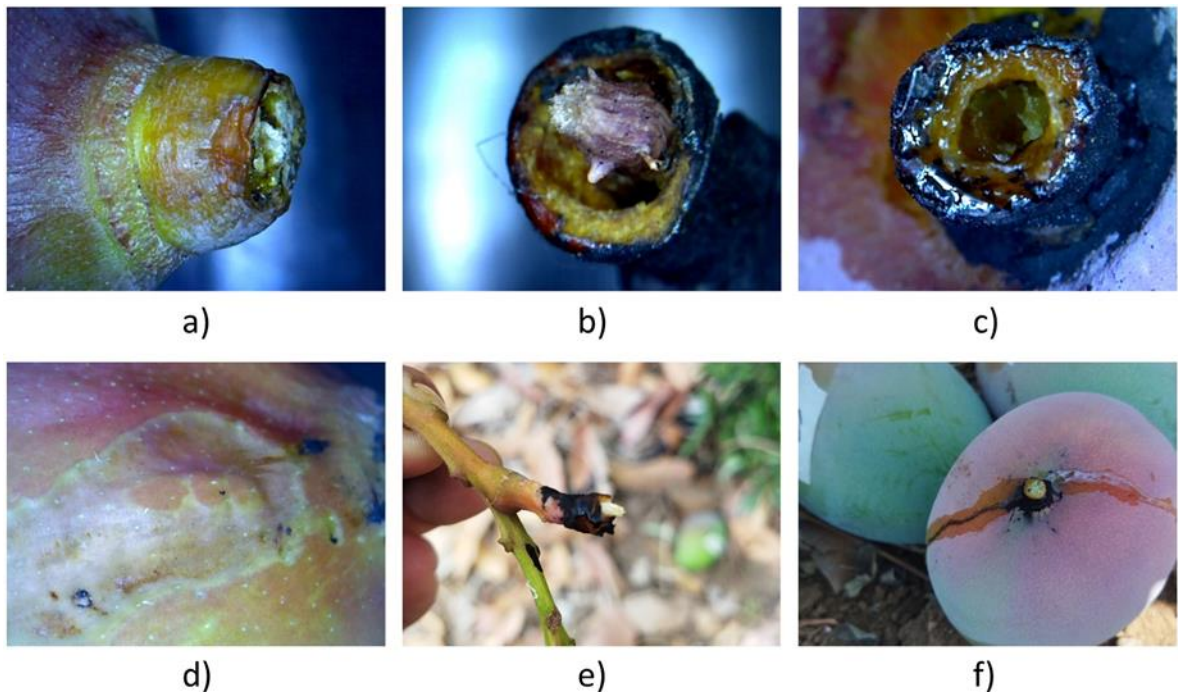


Figure 9. Pedicel rupture with AC blend a) made at the abscission zone, b) letting conducting tissues, c) with bark cauterization after xylem and phloem destruction, d) fruit surface burn-out due to acid runoff, e) stalk end after fruit detachment and f) fruit showing acid and latex flow.

In the longitudinal histological cuts of the control pedicel-peduncle and those treated with the AC blend (Figure 10), it is evident that damage is caused by the nanocomposite solution, extending throughout the entire application region. The

external peduncle tissue exhibit cut that reach the internal tissues in areas other than the main cut and is attributed to the action of the mixture AC blend even after the fruit has been detached. The tissue damage goes into the xylem layer, that includes the layers having the laticifers that conduct the latex. In each of the four images, the left section is the one fixed to the fruit and the letter. Only a few letters were placed in figure 10, to show the different tissues and avoid data agglomeration. In the upper-right image, the microphotography shows the effect after applying a light AC paste, meanwhile in the lower-right a dense AC paste damages more the pedicel.

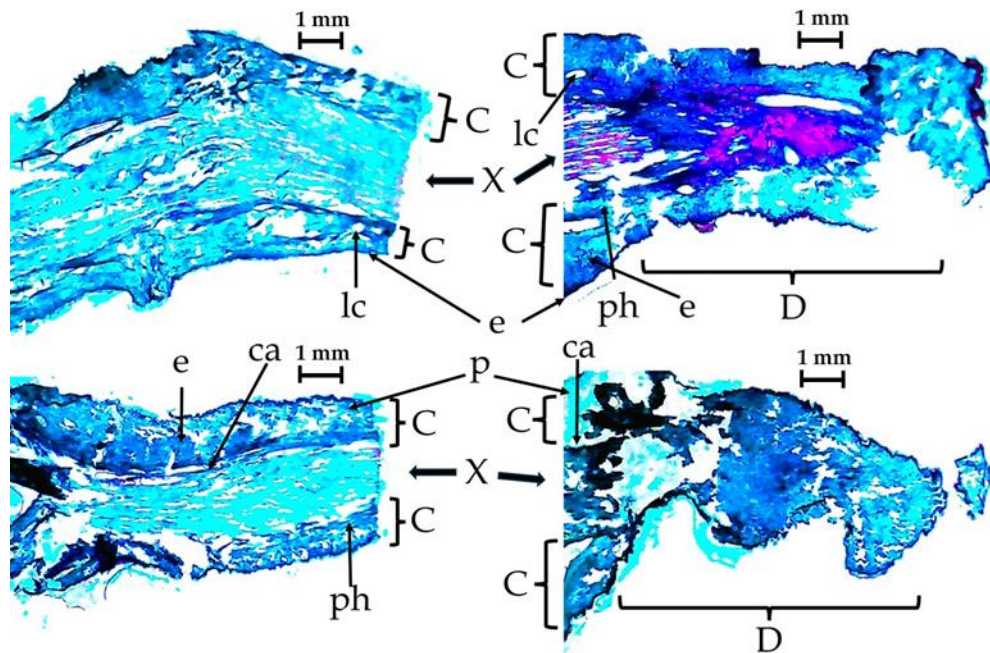


Figure 10. Microphotography of untreated pedicel-peduncle to the left and of treated pedicel-peduncle on the right. C: Cortex that contains from outside to inside; epidermis (e), parenchyma (p), lactiferous channels (lc), phloem (ph) and cambium (ca). X: Xylem and pith, D: damage area that includes mainly the cortex and part of the xylem, where a large constriction is evident.

4.3.3 Firmness, TSS and weight measurements

The results obtained with the Kruskal-Wallis tests [22-24] revealed the absence of significant differences between groups (Table 1). The presence of outliers in mango weight did not affect the analysis given its robustness. Moomin (2021)

reported an average of 6.56°Brix in ‘Keitt’ mangoes at its physiological maturity or early harvest stage [31], so our average total soluble solids, TSS is similar in each of the three fruit groups. Firmness of many fruits exceeded the threshold of 11 kgcm⁻², agreeing with the findings discussed by Siller-Cepeda et al., 2009 [32].

Table 1. Statistical analysis of fruit weight, diameter, TSS and firmness, evaluated by the Kruskal-Wallis test (P<0.05).

AC Blend	Statistics	Weight (g)	Diameter (mm)	TSS (°Brix)	Firmness (kgcm ⁻²)
Light	Min	254.0	4.21	5.0	10.8
	Mean	442.8	4.81	6.5	17.6
	Max	1129.0	5.85	10.0	23.2
	SD	209.77	0.34	0.96	3.55
Medium	Min	211.0	3.71	4.0	14.0
	Mean	344.8	4.79	6.6	17.9
	Max	569.0	5.80	9.0	23.2
	SD	100.11	0.52	1.59	3.0
Dense	Min	182.0	4.16	5.0	14.8
	Mean	388.5	4.73	6.5	19.2
	Max	699.0	5.97	8.0	23.2
	SD	118.24	0.40	0.82	2.02
Significance	p-value	0.078	0.414	0.471	0.204

4.3.4 Fruit detachment

Fruit detachment was uniform, regardless of the AC paste used. However, significant variations were observed in the time elapsed from blend application to fall. Medium AC blend detached the fruit in an average time of 2 hours, meanwhile the light blend detachment time had an average of 3 hours.

The dense AC blend required more time than the other two pastes to detach the fruits from the branches. The fruits started falling after one hour and some of them required up to 6 hours. Fruit damage caused by the latex fluid with the dense AC blend was lower than with the other AC composites. Higher latex flow was adsorbed at sunrise when there is greater sap flow due to high water content or

turgor pressure [33]. The light paste caused maximum damage to the fruits (Figure 11).

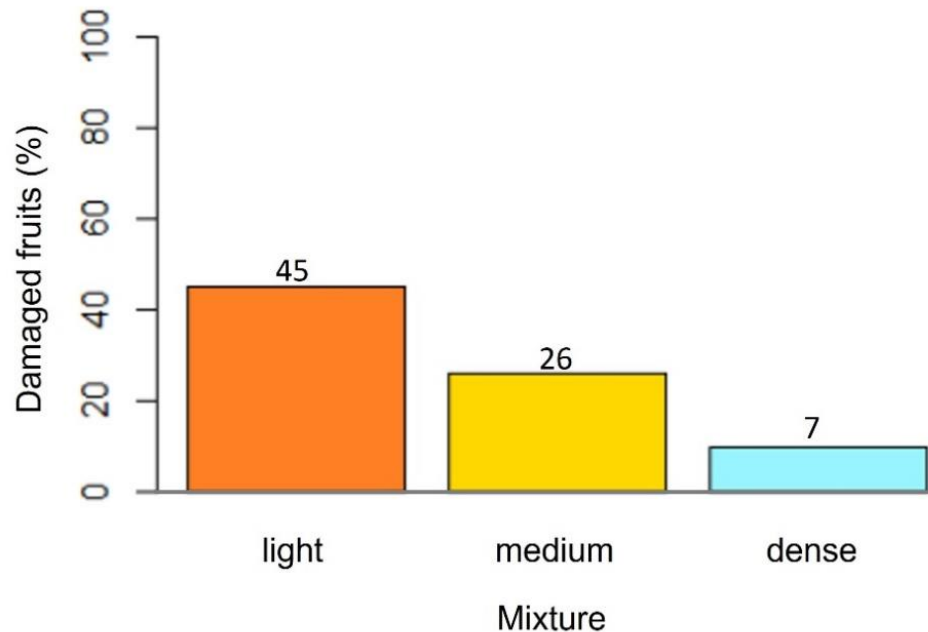


Figure 11. Mango fruits affected by latex or paste contact with latex.

Figure 12a shows the Kaplan-Meier curves corresponding to the each of the three pastes being applied [25-27]. The stepped lines in the graph represent the probability of survival, interpreted as the possibility that some fruit remain hanging at any moment after paste application. This graphical approach, based on the non-parametric Kaplan-Meier estimator, offers a precise and dynamic visualization of the detachment rate over time, allowing variations in the effectiveness of treatments to be discerned and highlighting critical moments in the fruit falling process. A probability of zero indicates that all fruits fall, meanwhile a curve that descends quickly until a value of zero indicates that the AC blend requires a shorter time to induce fruit detachment. This graphic behavior highlights the effectiveness and speed between pastes.

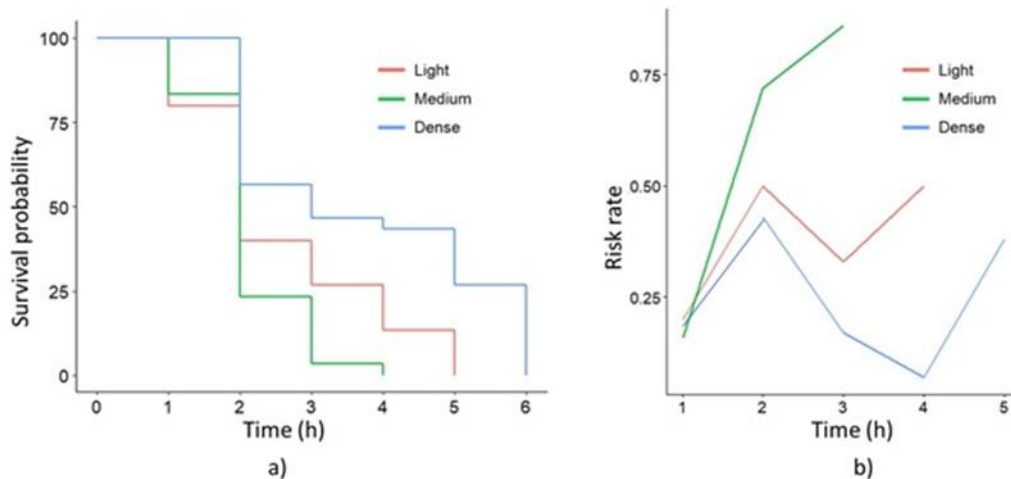


Figure 12. Survival analysis of the three blend treatments a) with Kaplan-Meier curves, and b) hazard functions.

In addition to the Kaplan-Meier survival analysis, another valuable outlook consists in interpreting the hazard function [25-27]. This function not only provides an accurate representation of the instantaneous risk rate but also explains the dynamics of the process. It also provides an adequate approximation to the event incidence rate [34]. The hazard function curves of the different AC pastes showed a steep positive slope (Figure 12b), that indicated a rapid increasing hazard rate. This pattern suggests that the medium AC blend is more effective than the others paste. Risk functions also highlight critical points, where changes are more pronounced. A peak on the graph indicates a high fruit detachment probability, meanwhile a valley suggests a low probability. In the second hour after blend application, a critical point for the three pastes was observed. In this period, the greatest number of fruit detachment occurred. This detailed analysis with risk functions contributes to identify key moments in the separation of the fruit from the stalk. As well it helps to analyze each AC blend efficiency obtaining a comparative evaluation.

4.3.5 Acid-activated carbon performance

The Log-Rank test was used to compare the treatment's performance. The results revealed that there are statistically significant differences between the three AC blends used ($p\text{-value} = 0.00001$), indicating that at least a couple of them present

significant differences in terms of fruit separation, Table 2. The application of the Log-Rank test with p-value adjustment, by using the Bonferroni method allowed us to identify statistically significant differences between the light and dense treatments (p-value = 0.0036). Differences were also found between the medium and dense treatments (p-value = 0.000035). This was evidenced when comparing the p-values obtained through the test with the corrected significance value ($\alpha = 0.05/3 = 0.0167$). However, no significant differences were observed between the light and medium AC blends (p-value = 0.1648). The integration of these results together with the graphical representation of survival supports that the medium AC blend presents the lowest survival rate. Therefore, the medium blend detaches fruit faster.

Effect of ripeness in AC blend fruit detachment

Fruits classified as ripe or unripe based on a TSS sorting criterion requires of minimum acceptable value of 6.6 °Brix. This value is required to accept mango fruits by packinghouses according to the Mexican standard [35] (NMX-FF-058-SCFI-2006) and nearby 6.56 °Brix mentioned by Moomin et al. (2021) [31]. With this classification threshold, we found that 47.8% of the total fruits were immature.

The general test, without considering a particular AC blend, revealed a p-value of 0.03. After adjusting the p-value with the Bonferroni method, a new p-value of 0.031 was obtained, that exceeds the corrected significance value ($\alpha = 0.05/2 = 0.025$). This finding, together with the significant difference between treatments, suggests exploring together the blend type and the fruit maturity variable. With the Log-Rank test, a p-value = 0.003 was obtained, indicating that in at least one blend, the maturity influenced detachment timing, so separate tests were done. The results showed that fruit maturity stage does not have a significant effect on fruit removal when light and medium paste were used. However, a statistically significant difference was observed with the dense AC blend (p-value = 0.032). The slope of immature fruits decreases rapidly, indicating that detachment occurs in considerably less time (Figure 13). This pattern suggests

that the dense AC blend presents a more pronounced impact on immature fruit detachment than with light and medium paste material.

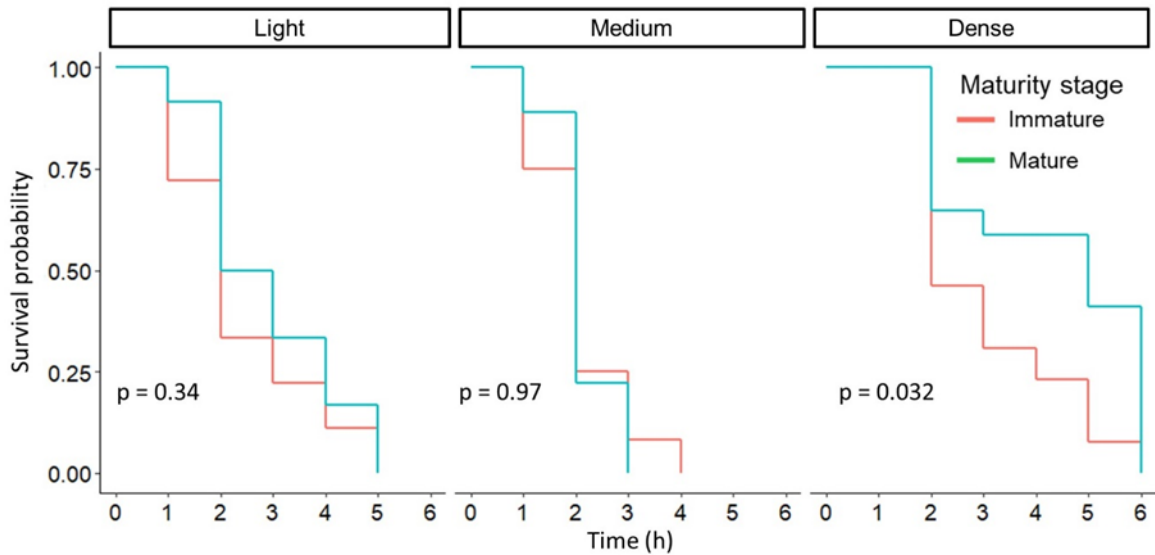


Figure 13. Survival plots of maturity stage and AC blends applied together with p-values obtained with the Log-Rank test.

Effect of firmness, diameter, and weight in AC blend fruit detachment

The results of all the tests are summarized in Table 2. As mentioned earlier, maturity stage is the variable that has the greatest influence in fruit detachment under the different AC blend treatments. The second variable with greater impact is weight, (Figure 14). Fruit weight was classified into three categories before its analysis (Table 2). Weight showed a specific influence when the dense AC blend was applied.

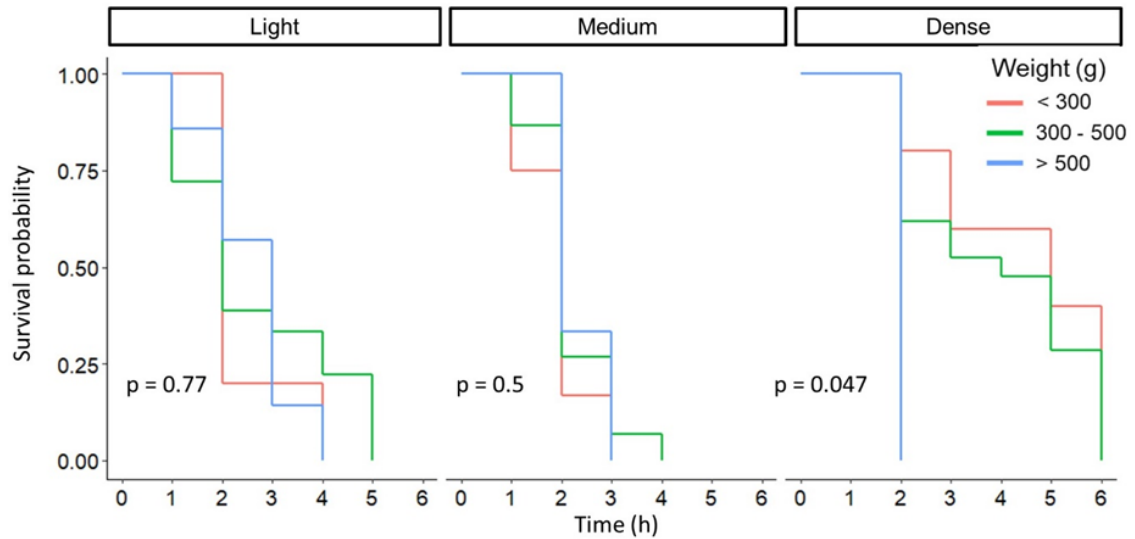


Figure 14. Survival plots for weight and AC blends applied together with p-values obtained with the Log-Rank test.

Table 2. Log-Rank test results with and without Bonferroni adjustment for categorical and continuous variables.

Variable	Log-Rank*	Log-Rank + Bonferroni ^{\$}	Log-Rank with AC blend*		
			Light	Medium	Dense
Maturity	<u>0.03</u>	Mature vs Inmature ^{\$\$} → 0.031	0.34	0.97	<u>0.032</u>
Weight	0.2	<300 vs 300-500 → 1.0	0.77	0.5	<u>0.047</u>
(g)		<300 vs >500 → 1.0			
		300-500 vs >500 → 0.3			
Pedicle diameter	0.3	<4 vs 4-5 → 1.0	0.91	0.92	0.053
(mm)		<4 vs >5 → 1.0			
		4-5 vs >5 → 0.43			
Firmness	0.2	<18 vs 18-20 → 0.32	0.35	0.56	0.45
(kgcm ⁻²)		<18 vs >20 → 0.82			
		18-20 vs >20 → 1.0			

Significance value* $\alpha = 0.05$, ^{\$}Corrected value $\alpha = 0.05/3 = 0.0167$ and ^{\$\$} $\alpha = 0.05/2 = 0.025$

The peduncle diameter variable showed a significantly low p-value, but still above the significance threshold. Pedicle diameter was positively correlated to fruit size and can limit fruit transpiration and water movement if it is small [36]. However,

accepting the hypothesis that there are no significant differences could result in a type II error. In an ideal scenario, where the blend is precisely applied in each area, a larger diameter would require of more paste material. In this case the treatment would be more effective. Fruit firmness had no statistically significant differences for fruit detachment under the three blends.

4.4 Discussion

Physical-mechanical properties of the fruit-pedicel-peduncle system showed that the resonance frequencies of green and ripe fruits could be used for selective harvesting [37]. Fruits being harvested fall to the floor and affects its quality, as bruises result from the impact [38]. In experiments with green mature “Carabao” mango fruits in Philippines, 80% of the fruit that fell from a height of 5 m suffered cracks and 20% resulted bruised [39]. Fruit impacts results in cell wall and membrane rupture [40]. In our experiment the mesh avoided any crack or bruise. Although companies develop automated and robotic harvester systems, they are costly for small farmers and difficult to employ in places within hills and mountains. Manual and robotic fruit manipulators have end-effectors or grippers to handle the fruits carefully [41] but operate slowly. During harvest, almost half of the fruits to be collected are at the right maturity level while the rest are either over-ripened or under-ripe [42]. Mangoes collected at their right ripeness will have the best nutritional content and quality, increasing its marketing price.

Mango have ducts called laticifers, which transport sap (latex). In the fruit abscission zone these ducts are found within the fruit duct and at the pedicel-peduncle, but do not interconnect between them [33]. A smaller amount of latex ducts was found in the pedicel but larger in size [43-44]. Near the peel, canals were thinner than those closer to the pulp. The acid sap (pH=4.3) under considerable pressure, is released from the ducts causing mango peel damage [45]. Peel sapburn injury reduces external fruit quality and can be controlled by applying sodium hydroxide [46]. Pedicel retention after paste application and injuring the tissue retained the latex in the fruit and avoid sap damage. From the

90 fruits pasted with AC blend, only 23 showed sapburn symptoms. The acid-composite applied to each fruit was not always the same and could affect detachment results. Other possible benefit from the “chemical cauterization” could be anthracnose incidence that has been found to decrease when latex is retained at harvest [43], so with AC blend application may have another mango postharvest benefit.

4.5 Conclusions

Seasonal labor is expensive and difficult to get when several orchards within a nearby area, produce mango at the same time. An innovative fruit detachment method used an emulsion produced by activated carbon and nitric acid which was applied to the peduncle-pedicel of mango fruits hanging in the tree. The application of this blend was more effective than when nitric, phosphoric, and hydrochloric acids were applied alone. Activated carbon (AC), was mixed with different amounts of nitric acid to provide three AC composite blends of different viscosity, and named light, medium, and dense. The nanomaterial was applied with a brush to the fruit peduncle-pedicel taking up to 4 hours before the mango fruits felt to a net below the tree canopy. The medium blend was the most efficient in releasing the fruit, taking a minimum time of 2 hours. Fruit maturity status resulted in the most predominant factor on fruit separation when treatments with different blend consistencies were used. The light emulsion provided the slowest detachment performance causing staining of the fruit with latex and diminishing mango quality. This medium blend could be an alternative for harvesting mango fruit in the future in an automatically with the help of UAV's.

4.6 Future work

In future work it is necessary to apply the technique to an entire farm. Pruning technologies have to be evaluated as well as vision AI (artificial intelligence) tools in order to apply the AC blend automatically. The latter will include the use of various techniques, including robots and drones.

4.6.1 Canopy and fruit management

Mango trees have many different architectures according to their size and density. Mango tree management requires of a better knowledge of its architecture and its impact of on the growing units (GU) [47-48]. Plant architecture development given by GUs and inflorescences are dependent on the environmental variables of temperature, relative humidity and solar radiation. In dense mango canopies, shading results in poor floral initiation [48]. Maybe 20% of fruit production is within panicles located in the interior of the tree, making paste application difficult for aerial vehicles. Therefore, special pruning and high-density orchards are required for automatic detaching of mango fruits. Trees maintain a balance between leaves and fruits when pruned letting an ideal sunlight penetration [49], where a flat canopy can be optimal for drone use, to apply the AC blend. Fruit drop can be reduced by applying the right amount of fertilizer, resulting in more fruits per panicle [50]. Pollination and distance between trees present an important variable for fruit production per panicle [51]. The quantity of terminal canopy per square meter shows differences according on plant canopy position and plant side interaction [51]. In both east and west tree sides, higher number of panicles were found in the bottom and medium section of the canopy.

4.6.2 Technology for fruit detection

The AC blend has to be applied precisely to each mango hanging in the tree. Machine vision technology (Figure 15) has been used every day more to quantify fruit, vegetable and crop yields through Unmanned Aerial Vehicle (UAV), satellites or ground equipment [53]. This technology can help to precisely detect the fruit and its pedicel accurately with RGB cameras [53-55]. Imaging conditions within an orchard are poorly controlled, so its quality is affected by the illumination conditions [56]. CNN segmentation [57] networks and 3D-segmentation [58] are capable of separating sections of any object class. Color can be used as a criterion in 3D segmentation, but it is much slower than 2D segmentation. Whichever platform is used, soil borne or UAV, images should be acquired and

processed before applying the AC blend to the fruit pedicel-peduncles. In figure 15, the block diagram shows image acquisition from ground or aerial platforms, so that after segmentation and peduncle detection, the AC blend can be positioned precisely by contact or remotely.

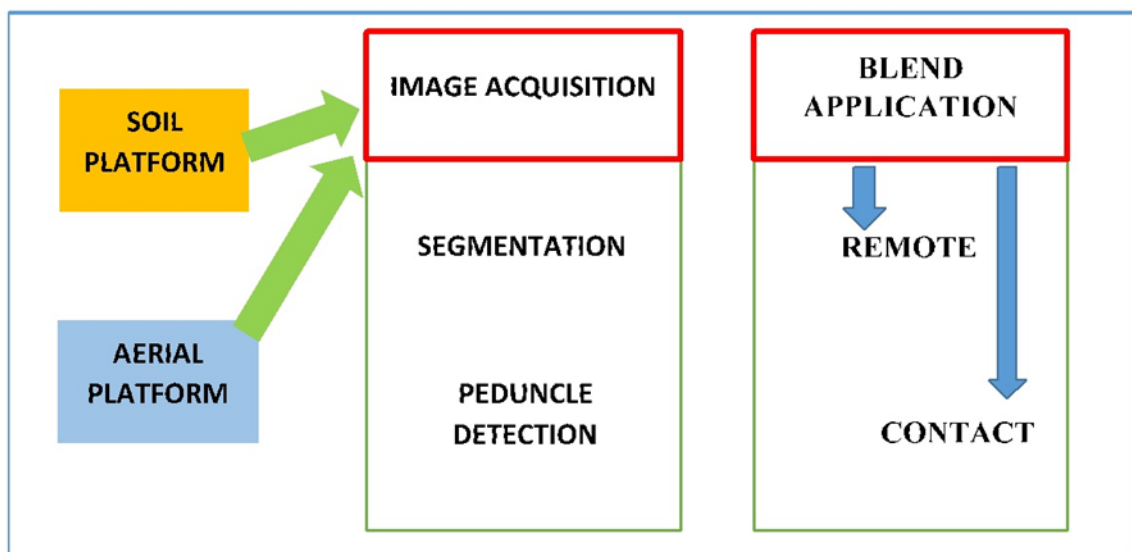


Figure 15. Block diagram showing technologies that will be applied to automatize the process.

4.7 Patents

A patent (**MX/a/2024/004431**) is being introduced to IMPI which is the Mexican intellectual right office with name: “Método para inducir el desprendimiento de frutos mediante aplicación de una emulsión ácida” [Method and composition to induce the detachment of mango fruits from trees and other similar fruits]. Reference 19 acknowledges this patent.

4.8 References

1. De La Cruz Medina, J.; García, H.S. Mango Post-Harvest Operations. Ed. Danilo Mejia. AGSI/FAO, Instituto Tecnológico de Veracruz, México, June 2002.
2. Kumar, P.K. Development of a tool for effective mango harvesting to reduce post-harvest loss. *Internat. J. Proc. & Post Harvest Technol.*, **2013**, 4(2), 135-137.

3. Galsurker, O.; Diskin, S.; Duanis-Assaf, D.; Doron-Faigenboim, A.; Maurer, D.; Feygenberg, O.; Alkan, N. Harvesting Mango Fruit with a Short Stem-End Altered Endophytic Microbiome and Reduce Stem-End Rot. *Microorganisms* **2020**, *8*(4), 558.
4. Menzel, C.M.; Le Lagadec, M.D. Can the productivity of mango orchards be increased by using high-density plantings? *Scientia Horticulturae* **2017**, *219*, 222–263.
5. Asrey, R.; Patel, V.; Barman, K.; Pal, R. Pruning affects fruit yield and postharvest quality in mango (*Mangifera indica* L.) cv. Amrapali. *Fruits* **2013**, *68*, 367–380.
6. Balraj, G.; Balamohan, T.; Soman, P.; Jeyakumar, P. Canopy management in mango (*Mangifera indica* L.) cv. Alphonso with reference to flowering, yield and quality characters under ultra-high density planting. *Journal of Applied Horticulture* **2014**, *16*, 50-53.
7. Léchaudel, M.; Joas, J. An overview of preharvest factors influencing mango fruit growth, quality and postharvest behaviour. *Brazilian Journal of Plant Physiology* **2007**, *19*, 287-298.
8. Rajbhar, Y.P.; Singh, S.D.; Lal, M.; Singh, G.; Rawat, P.L. Performance of high density planting of mango (*Mangifera indica* L.) under mid-western plain zone of Uttar Pradesh. *Int. J. Agric. Sci.*, **2016**, *12*, 298–301.
9. Ganjoo, R.; Sharma, S.; Kumar, A.; Daouda, M.M. Activated Carbon: Fundamentals, Classification, and Properties. In *Activated Carbon: Progress and Applications*; Royal Society of Chemistry: London, UK, 2023; pp. 1–22. ISBN 978-1-83916-780-5.
10. Iqbaldin, M.N.; Mohd, I.; Khudzir, M.I.; Mohd Azlan, A.G.; Zaidi, B.; Surani; Zubri, Z. Properties of coconut shell activated carbon. *Journal of Tropical Forest Science* **2013**, *25*(4), 497–503.
11. Sujiono, E.H.; Zabrian, D.; Zurnansyah, Z.; Mulyati, Zharvan, V.; Samnur, S.; Humairah, N. Fabrication and Characterization of Coconut Shell Activated Carbon using Variation Chemical Activation for Wastewater Treatment Application. *Results in Chemistry* **2022**, *4*, 100291.
12. Kakom, S.M.; Abdelmonem, N.M.; Ismail, I.M.; Refaat, A.A. Activated Carbon from Sugarcane Bagasse Pyrolysis for Heavy Metals Adsorption. *Sugar Tech* **2023**, *25*, 619–629.
13. Tasić, T.; Milankovic, V.; Breitenbach, S.; Unterweger, C.; Fuerst, C.; Pasti, I.; Lazarević-Pašti, T. Kinetics of malathion removal using carbon material derived from viscose fibers. 1st International EUROSAs Conference, September 12-15, 2023 Brzeće, Kopaonik, Serbia, 212-217.

14. Yi, N.; Wu, Y.; Fan, L.; Hu, S. Remediating Cd-Contaminated Soils Using Natural and Chitosan-Introduced Zeolite, Bentonite, and Activated Carbon. *Polish Journal of Environmental Studies* **2019**, 28(3), 1461-1468.
15. Rajput, V.D.; Minkina, T.; Upadhyay, S.K.; Kumari, A.; Ranjan, A.; Mandzhieva, S.; Sushkova, S.; Singh, R.K.; Verma, K.K. Nanotechnology in the Restoration of Polluted Soil. *Nanomaterials* **2022**, 12, 769.
16. Blare, T.; Ballen, F.H.; Singh, A.; Haley, N.; Crane, J.H. Profitability and cost estimates for producing Mango (*Mangifera Indica* L.) in south Florida. *EDIS* **2022**, FE1115, 1-4.
17. Kamilaris, A.; Prenafeta-Boldú, F.X. Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and electronics in agriculture* **2018**, 147, 70-90.
18. Macnish, A.; McConchie, C.; Hofman, P.; Joyce, D.; Campbell, T. Towards identifying factors that contribute to mango resin canal discolouration. *Mango Matters*, **2014**, 14, 9–12.
19. Hahn, F.; Vargas, D.; Rodriguez de la O, J.; Barrientos, A. Método para inducir el desprendimiento de frutos mediante aplicación de una emulsión ácida. [Method and composition to induce the detachment of mango fruits from trees and other similar fruits] IMPI. Patent MX/a/2024/004431 in tramit.
20. Sass, J. E. Botanical Microtechnique. The Iowa State University Press, Ames, 1968, USA. 227 p.
21. Bryan, J. H. D. *Differential staining with a mixture of safranin and fast green FCF*. Stain Tech., **1955**, 30(4), 153-157.
22. Júnior, J.B.; Lucena, R.L. analysis of precipitation using MANN-KENDALL and KRUSKAL-WALLIS non-parametric tests. Revista de Geografia da UFC, **2020**, 19(1), 1-15.
23. Ostertagova, E.; Ostertag, O.; Kováč, J. Methodology and Application of the Kruskal-Wallis Test. *Applied Mechanics and Materials* **2014**, 611, 115-120.
24. Dinno, A. Nonparametric pairwise multiple comparisons in independent groups using Dunn's test. *The Stata Journal* **2015**, 15(1), 292–300.
25. Kim, C.; Bae, W.; Choi, H.; Park, B.U. Non-parametric hazard function estimation using the Kaplan–Meier estimator, Journal of Nonparametric Statistics **2005**, 17(8), 937-948.
26. Gu, J.; Fan, Y.; Yin, G. Reconstructing the Kaplan–Meier Estimator as an M-estimator. *The American Statistician* **2022**, 76(1), 37-43.
27. Vasilev, I.; Petrovskiy, M.; Mashechkin, I. Survival Analysis Algorithms based on Decision Trees with Weighted Log-rank Criteria. 11th

International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods, ICPRAM. February 3-5, on-line, 132-140.

28. Martínez, C. M. Bonferroni's method to compare Survival Curves with Recurrent Events. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias* **2013**, 3(10), 105-114.
29. Hofman, P.J.; Smith, L.G.; Joyce, D.C.; Johnson, G.I.; Meiburg, G. Bagging of mango (*Mangifera indica* cv. 'Keitt') fruit influences fruit quality and mineral composition. *Postharvest Biol. Technol.*, **1997**, 12, 83-91.
30. Léchaudel, M.; Lopez-Lauri, F.; Vidal, V.; Sallanon, H.; Joas, J. Response of the physiological parameters of mango fruit (transpiration, water relations and antioxidant system) to its light and temperature environment. *Journal of plant physiology*, **2013**, 170(6), 567–576.
31. Moomin, A.; Dzarkwei Abbey, L.; Kobla Amey, N. Relation of harvesting time on physicochemical properties of Haden, Kent, Palmer and Keitt mango varieties for export and local markets. *Journal of Horticulture and Postharvest Research* **2021**, 4(1), 87-100.
32. Siller-Cepeda, J.; Muy-Rangel, D.; Báez-Sañudo, M.; Araiza-Lizarde, E.; Ireta-Ojeda, A. Calidad poscosecha de cultivares de mango de maduración temprana, intermedia y tardía. *Revista Fitotecnia Mexicana* **2009**, 32(1), 45-52.
33. Srinivasa, R. Sap burn damage of Mango (*Mangifera indica* L.) and its management in Telangana. *Pharma Innovation* **2022**, 11(4), 828-833.
34. Rebasa, P. Conceptos básicos del análisis de supervivencia. *Cirugía española* **2005**, 78(4), 222-230.
35. NMX-FF-058-SCFI. Non industrialized food products for human consumption – fresh fruit – mango (*Mangifera indica* L.) – specifications. **2006**.
36. Kumar, A.; Bhuj, B.D.; Singh, C.P. Fruit drops in mango: a review. *Annals of the Romanian Society for Cell Biology* **2021**, 25 (6), 925-47.
37. Mayans-Céspedes, P.; López-Cansteñs, G.; Romanchik-Kriuchkova, E.; Pérez-Sobrevilla, L. Mathematical modeling system of the fruit-pedicel-peduncle Manila mango. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* **2016**, 7(4), 781-791.
38. Yuwana, Y.; Silvia, E. Physical damages of tropical fruits: case study of mangoes, 'Duku' (*Lansium parasiticum*), avocado, and banana fruits. Proceedings of the International Seminar on Promoting Local Resources for Food and Health; 12–13 Oct 2015; Bengkulu, Indonesia. 2015, 106–111.

39. Lacap, A.; Bayogan, E.R.; Secretaria, L.; Joyce, D.C.; Ekman, J.; Goldwater, A. Bruise Injury and Its Effect on 'Carabao' Mango Fruit Quality. *Philipp J Sci.*, **2021**, 150, 1689–1701.
40. Hussein, Z.; Fawole, O.A.; Opara, U.L. Preharvest factors influencing bruise damage of fresh fruits-a review. *Scientia Horti* **2018**, 229, 45–58.
41. Kaur, B.; Mansi, Dimri, S.; Singh, J.; Mishra, S.; Chauhan, N.; et al. Insights into the harvesting tools and equipment's for horticultural crops: From then to now. *Journal of Agriculture and Food Research* **2023**, 14, 100814.
42. TECA. Increasing yield of mango with selective harvest. Technologies and practices for small agricultural producers, FAO **2017**, Ghana, ca2574en, 4pp. <http://teca.fao.org/read/8844>.
43. Karunanayake, K.; Sinniah, G.; Adikaram, N.; Abayasekara, C.; Wijayasekara, D. Retention of latex at harvest, enhanced mango (*Mangifera indica* L.) fruit resistance and reduced anthracnose and stem-end rot. *Australas. Plant. Pathol.*, **2015**, 44: 113–119.
44. San, A.T.; Hofman, P.J.; Joyce, D.C.; Macnish, A.J.; Marques, J.R.; Webb, R.I.; Li, G.; Smyth, H.E. Diurnal Harvest Cycle and Sap Composition Affect Under-Skin Browning in 'Honey Gold' Mango Fruit. *Front. Plant Sci.* **2019**, 10, 1093.
45. John, K.S.; Bhat, S.G.; Prasada, U.J. Biochemical characterization of sap (latex) of a few Indian mango varieties. *Phytochemistry* **2003**, 62(1):13-19.
46. Barman, K.; Asrey, R.; Pal, R.K.; Jha, S.K.; Sharma, S. Influence of different desapping agents on the incidence of sapburn, ripening behaviour and quality of mango. *Journal of food science and technology* **2015**, 52(1), 161–170.
47. Boudon, F.; Persello, S.; Jestin, A.; Briand, A.S.; Grechi, I.; Fernique, P.; Guédon, Y.; Léchaudel, M.; Lauri, P.É.; Normand, F. Mango: a functional-structural model of mango tree growth, development and fruit production. *Ann Bot.*, **2020**, 126(4), 745-763.
48. Dambreville, A.; Lauri, P.É.; Trottier, C.; Guédon, Y.; Normand, F. Deciphering structural and temporal interplays during the architectural development of mango trees. *J Exp Bot.*, **2013**, 64(8), 2467-2480.
49. Ledesma, N.; Campbell, R.J.; Wasielewski, J. Training and Pruning a Mango Orchard to Improve Blooming and Yield in South Florida. *Proc. Fla. State Hort. Soc.*, **2016**, 129, 1-3.
50. Anwar, R.; Ghani, M. A.; Ejaz, S.; Hussain, Z.; Iqbal, M. A.; Chen, J. Effects of different combinations of N, P and K at different time interval on vegetative, reproductive, yield and quality traits of mango (*Mangifera Indica*. L) cv. Dusehri. *Brazilian journal of biology* **2021**, 82, e235612.

51. Lucas-García, R.; Rosas-Guerrero, V.; Alemán-Figueroa, L.; Almazán-Núñez, R.C.; Violante-González, J.; Kuk-Dzul, J.G. Spatial Proximity of 'Ataulfo' to 'Haden' Cultivar Increases Mango Yield and Decreases Incidence of Nubbins. *Agronomy* **2021**, *11*, 450.
52. de Sousa Ferraz, L.E.C.; Cavalcante, Í.H.L.; Teixeira Lobo, J.; Gomes da Cunha, J. Terminal branch density and fruit production in the canopy of high-yield mango orchards. *Eur.J.Hortic.Sci.*, **2020**, *85*(2), 118-122.
53. Anderson, N., Walsh, K.B., & Wulfsohn, D. (2021). Technologies for Forecasting Tree Fruit Load and Harvest Timing—From Ground, Sky and Time. *Agronomy* **2021**, *11*, 1409.
54. Islam, M.; Scalisi, A.; O'Connell, M.G.; Morton, P.; Scheduling, S.; Underwood, J.; Goodwin, I. A Ground-based Platform for Reliable Estimates of Fruit Number, Size, and Color in Stone Fruit Orchards. *HortTechnology* **2022**, *32*(6), 510-522.
55. Neupane, C.; Pereira, M.; Koirala, A.; & Walsh, K.B. Fruit Sizing in Orchard: A Review from Caliper to Machine Vision with Deep Learning. *Sensors* **2023**, *23*, 3868.
56. Bargoti, S.; Underwood, J.P. Deep fruit detection in orchards. *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 29 to June 3, Singapore, **2017**: 3626-3633.
57. He, K.; Gkioxari, G.; Dollár, P.; Girshick, R. Mask r-cnn. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, Venice, Italy, 22–29 October 2017*; 2961–2969.
58. Lin, G.; Tang, Y.; Zou, X.; Xiong, J.; Fang, Y. Color, depth, and shape-based 3D fruit detection. *Precis. Agric.*, **2019**, *21*, 1–17.

5 APÉNDICES

5.1 Apéndice 1. Inducción del desprendimiento del mango mediante tratamiento químico

Presentado en:

XI Congreso Internacional y XXV Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas
(CINCA 2023)

Introducción

El mango es una fruta tropical que se recolecta tanto de forma manual como mediante el empleo de herramientas tradicionales. La automatización de la cosecha es un reto enorme que se ha convertido en una destacada área de investigación con grandes avances tecnológicos en aprendizaje profundo y visión artificial (Hua et al., 2023). En la actualidad, se encuentran disponibles robots cosechadores con aplicaciones en diversas frutas como manzanas, duraznos, uvas y otras. No obstante, en el caso de los mangos, la recolección automatizada de frutos puede agravar los daños causados por la quemadura ocasionada por la savia, conocida como "látex del mango". El látex es una sustancia ácida que se libera al desprender el fruto del pedúnculo, causando graves lesiones al entrar en contacto con la cáscara de este. Esta situación disminuye su atractivo estético y degrada la calidad del fruto, lo que resulta en importantes pérdidas económicas (Barman et al., 2015). El propósito principal de esta investigación fue facilitar el desprendimiento del fruto al aplicar ácidos en la zona de abscisión del pedúnculo.

Materiales y métodos

El experimento se realizó en dos etapas, la primera en el mes de abril de 2023 y

la segunda durante mayo de 2023. Ambas etapas se realizaron en un huerto comercial de mango ubicado en Loma Bonita ($17^{\circ}25'47''$ N, $-101^{\circ}11'19''$ W, 17 m s.n.m.), en el estado de Guerrero, México. En la huerta se tiene árboles de la variedad Kent, Haden y Keitt, de los cuales se trabajó con frutos de mango Haden. En cada etapa se seleccionaron 90 frutos de manera aleatoria y divididos en 3 grupos con mismo número de frutos. Para cada grupo se seleccionaron dos frutos al cual se le instalaron módulos ESP-CAM a 1 m de distancia para toma automática de fotos cada hora (Figura 1A).



Figura 1. A) Módulo ESP-CAM instalado en campo; Mangos Haden 2 horas después de aplicarles el ácido B) HNO_3 , C) H_3PO_4 y D) HCL .

En la primera etapa se aplicó 1 ml de HNO_3 al 55%, 1 ml de H_3PO_4 al 85% y 1 ml de HCL al 28% a cada grupo respectivamente (Figura 1A-D). Las aplicaciones se llevaron a cabo utilizando un atomizador, manteniendo una distancia constante de 2 cm entre la boquilla y el pedúnculo del fruto.

En la segunda etapa se aplicó 0.5 ml de HNO_3 , 0.5 g de una mezcla de 5 ml de HNO_3 con 10 g de vaselina y 0.5 g de la mezcla de 12 ml de HNO_3 con 5 g de carbón activado a cada grupo respectivamente, la aplicación se realizó con un pincel y de forma manual.

En ambas etapas se registró el tiempo en ocurrir el desprendimiento del fruto y el porcentaje de frutos que resultaron dañados. Los datos se analizaron mediante pruebas t de Student.

Resultados y discusión

En la primera etapa del experimento, se observó que con la aplicación de HNO_3 y H_3PO_4 , ocurrió el desprendimiento del fruto (Cuadro 1). Sin embargo, la aplicación con atomizador produce escurrimiento del ácido, lo cual produce

daños significativos en comparación con los causados por el escurrimiento de látex. Estos daños resultan ser más graves y no pueden ser mitigados mediante los tratamientos utilizados para reducir los daños causados por el látex, tal como se describió en el estudio de Osuna (2018).

En la segunda etapa del experimento, los tratamientos más efectivos fueron los de la mezcla de HNO₃ con vaselina y con carbón activado, consiguiendo desprendimientos del fruto en 20 y 5 horas respectivamente (Cuadro 1). La aplicación de HNO₃ puro, no mostró resultado alguno, debido a la evaporación del ácido. La mezcla de carbón activado con HNO₃ destacó en comparación al resto al reducir el tiempo de desprendimiento a una media de 5 horas ($p < 0.01$), además obtuvo el menor porcentaje de frutos dañados.

Tabla 1. Tiempo desprendimiento del fruto y porcentaje de frutos dañados durante la aplicación de ácidos durante la primera y segunda etapa del experimento.

	Primera etapa			HNO ₃	Segunda etapa	
	HNO ₃ [§]	H ₃ PO ₄	HCL		HNO ₃ + Vaselina [§]	HNO ₃ + Carbón activado [§]
Tiempo de desprendimiento(h)	70±11	>100	--	--	20±3	5±1
Porcentaje de daños (%)	100	100	100	0	80	50

[§]Valores de tiempo expresados son la media ± desviación estándar.

Conclusiones

La combinación de HNO₃ con carbón activado es una estrategia prometedora para facilitar el desprendimiento del fruto de mango de manera rápida y con menor daño a los frutos. Estos hallazgos podrían tener importantes implicaciones para la automatización de la cosecha de mangos y la reducción de pérdidas económicas causadas por el daño por látex del mango.

Literatura citada

Barman, K., Asrey, R., Pal, R., Jha, S., & Sharma, S. (2015). Influence of different desapping agents on the incidence of sapburn, ripening behaviour and quality of mango. *Journal Food Science and Technology* 52, 161–170 (2015). <https://doi.org/10.1007/s13197-013-0995-x>

- Hua, X., Li, H., Zeng, J., Han, C., Chen, T., Tang, L., & Luo, Y. (2023). A Review of Target Recognition Technology for Fruit Picking Robots: From Digital Image Processing to Deep Learning. *Applied Sciences*, 13(7), 4160.
- Osuna, G. J. A. (2018). Revisión de literatura con respecto al daño por látex en mango para exportación. *INIFAP-National Mango Board*. Recuperado de: http://www.mango.org/wp-content/uploads/2018/04/Sapburn_Literary_Review_Final_Spn.pdf

5.2 Apéndice 2. Método y composición para inducir el desprendimiento de frutos de mango de los árboles y otros frutos similares

Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial

Patente: Folio MX/a/2024/004431

RESUMEN

La presente invención se refiere a un método para inducir el desprendimiento de frutos de mango de los árboles y otros frutos similares para su cosecha caracterizado por comprender aplicar uniformemente al pedúnculo del fruto una mezcla química definida por carbón activado en polvo y ácido nítrico; en donde dicha mezcla es una proporción que va de desde 1:1 hasta 1:2 en gramos de carbón activado en polvo por mL de ácido nítrico; en donde dicho carbón activado en polvo tiene un tamaño de partícula de malla 100 a 400; la invención también provee un método para la cosecha de frutos de mango mediante aplicación puntual de una mezcla química, caracterizado por comprender las etapas de: a) Preparar una mezcla química a base de carbón activado en polvo y ácido nítrico, b) Aplicar de la mezcla sobre y alrededor de la zona de abscisión en el pedúnculo de los frutos, y c) Recolección de frutos en una malla dispuesta por debajo de la copa del árbol y encima de la superficie del suelo, una vez causado el desprendimiento.

5.3 Apéndice 3. Análisis de detección de tomates en ambiente de invernadero mediante procesamiento de imágenes RGB

Presentado en:

Tercer Congreso Latinoamericano de Agricultura de Precisión

(CLAP2024, Santo domingo, República Dominicana)

Resumen

La agricultura de precisión se vincula estrechamente con la aplicación de tecnologías de la información y comunicación, con el fin de llevar a cabo el monitoreo remoto y automatizado de las condiciones de los cultivos en diversos entornos de crecimiento. Su objetivo primordial es incrementar la productividad agrícola, disminuir los costos asociados y mejorar la calidad de los productos obtenidos. Los drones emergen como una tecnología revolucionaria en el ámbito agrícola, particularmente en el monitoreo de extensas áreas de cultivo que abarcan cientos de hectáreas. Esta innovación capacita a los agricultores para tomar decisiones más fundamentadas. A pesar de ello, es relevante señalar que la aplicación de drones puede verse restringida en entornos confinados, como ocurre en el caso de los invernaderos. Sin embargo, con la constante evolución tecnológica y el desarrollo de soluciones específicas, la incorporación de drones en entornos de invernadero podría simplificar diversas actividades, como la detección y clasificación de malezas, plantas, frutos, plagas y enfermedades. En el presente estudio, se llevó a cabo la detección de frutos maduros, frutos verdes y flores en un cultivo de tomate en invernadero, mediante el uso de imágenes RGB capturadas con un dron. El dispositivo empleado fue un dron DJI Mini SE, pilotado por un experto, que operó el equipo a una altura constante de 4 metros. Las imágenes fueron etiquetadas en tres clases distintas, a saber, "flor", "maduro" y "verde", utilizando la herramienta de anotación "labelimg". La implementación del algoritmo de Ultralytics YOLOv8 se realizó, entrenándolo con un conjunto de datos que incluyó instancias con y sin aumentación. Según las métricas de

evaluación, se observó un rendimiento superior en la red entrenada con el conjunto de datos con aumentación. En este caso, la precisión, sensibilidad y el mAP alcanzaron valores del 85.5 %, 82.6 % y 90.6 % respectivamente. La clase "flor" exhibió el rendimiento más bajo, mientras que la clase "maduro" demostró el rendimiento más destacado. La conjunción de un algoritmo como YOLOv8 y la perspectiva innovadora de utilizar drones en invernaderos revela un potencial significativo para la agricultura en ambientes controlados.

Palabras clave: Agricultura de precisión, drones, monitoreo, invernadero, YOLOv8