



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA
COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO**



MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

**NANOPARTÍCULAS DE PLATA EN LA POSCOSECHA DE FRUTOS
DE PAPAYA (*Carica papaya* L.) VAR. MARADOL**

**TESIS PROFESIONAL
QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRA EN CIENCIAS DE HORTICULTURA

PRESENTA:

MARLA JUQUILA LÓPEZ SÁNCHEZ

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

DRA. MA TERESA MARTÍNEZ DAMIÁN



CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO, 2026

NANOPARTÍCULAS DE PLATA EN POSCOSECHA DE FRUTOS DE PAPAYA
(*Carica papaya* L.) VAR. MARADOL

Tesis realizada por MARLA JUQUILA LÓPEZ SÁNCHEZ bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

DIRECTOR: _____
Dra. Ma Teresa Martínez Damián

CODIRECTOR: _____
Dr. Eliseo Sosa Montes

ASESOR: _____
Dra. María del Rosario García Mateos

ASESOR: _____
Dra. María Teresa Beryl Colinas y León

ASESOR: _____
Dra. Guadalupe Stefanny Aguilar Moreno

ÍNDICE

RESUMEN GENERAL	xi
GENERAL ABSTRACT	xii
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. OBJETIVO	3
1.1.1. General	3
1.1.2. Específicos	3
1.2. HIPÓTESIS	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. REFERENCIAS TAXONÓMICAS	4
2.2. ORIGEN	4
2.3. DESCRIPCIÓN BOTÁNICA	5
2.3.1. Planta	5
2.3.2. Raíces	5
2.3.3. Tallo	5
2.3.4. Hoja	5
2.3.5. Flor	5
2.3.6. Fruto	6
2.4. CULTIVO	6
2.4.1. Altitud	6
2.4.2. Temperatura	6
2.4.3. Precipitación y Humedad Relativa	7
2.4.4. Suelo	7
2.4.5. Radiación solar	7
2.4.6. Viento	8
2.5. MADURACIÓN	8
2.6. COSECHA	8
2.7. VALOR NUTRICIONAL	9
2.7.1. Carbohidratos	9

2.7.2.	Ácidos orgánicos	9
2.7.3.	Vitaminas	10
2.7.4.	Minerales	10
2.7.5.	Pectinas	11
2.7.6.	Antioxidantes	11
2.8.	NANOPARTÍCULAS DE PLATA	11
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	13
3.1.	LOCALIZACIÓN	13
3.2.	MATERIAL VEGETAL	14
3.3.	DISEÑO EXPERIMENTAL	14
3.4.	NANOPARTÍCULAS DE PLATA	14
3.4.1.	Forma de aplicación	15
3.5.	VARIABLES EVALUADAS	15
3.5.1.	VARIABLES FÍSICAS	15
3.5.2.	VARIABLES QUÍMICAS	17
3.5.3.	Análisis proximal	20
3.5.4.	Análisis de Van Soest	24
3.5.5.	Determinación de plata	25
3.5.6.	VARIABLES FISIOLÓGICAS	25
3.5.7.	Análisis de estadístico.	26
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
4.1.	VARIABLES FÍSICAS	26
4.1.1.	Índice de madurez	26
4.1.2.	Color ($L^* c^* h^*$)	27
4.1.3.	Firmeza (N)	30
4.2.	VARIABLES QUÍMICAS	32
4.2.1.	Sólidos solubles totales (°Brix)	32
4.2.2.	Acidez titulable (% de ácido cítrico)	33
4.2.3.	Vitamina C (mg vitamina C·g ⁻¹ PF)	34

4.2.4.	Actividad antioxidante ($\mu\text{M ET}100\text{g}^{-1}\text{ PF}$)	35
4.2.5.	Fenoles totales ($\text{mg EAG } 100\text{g}^{-1}\text{ PF}$)	36
4.2.6.	Carotenoides ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{ PF}$)	36
4.2.7.	ANÁLISIS PROXIMAL	37
4.2.8.	ANÁLISIS DE VAN SOEST	42
4.2.9.	DETERMINACIÓN DE PLATA	44
4.2.10.	VARIABLES FISIOLÓGICAS	44
5.	CONCLUSIONES	46
6.	LITERATURA CITADA	47

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tratamientos a base de nanopartículas de plata.....	14
Cuadro 2. Descripción de los estados de madurez de la papaya (Carica papaya L.) var. Maradol según Basulto et al. (2007).	16
Cuadro 3. Comportamiento del índice de madurez bajo condiciones de NPAg a los 0, 3, 6, 9 y 12 días según la escala de Basulto et al. (2007).	27
Cuadro 4. Comparación de medias de la firmeza en frutos de papaya tratados con nanopartículas de plata (NPAg).	32
Cuadro 5. Comparación de medias de variables químicas en frutos de papaya tratados con nanopartículas de plata (NPAg).....	35
Cuadro 6. Comparación de medias de variables químicas en frutos de papaya tratados con nanopartículas de plata (NPAg).....	37
Cuadro 7. Comparación de medias de variables de análisis proximal de frutos de papaya tratados con nanopartículas de plata (NPAg).	39
Cuadro 8. Comparación de medias de variables de análisis proximal de frutos de papaya tratados con nanopartículas de plata (NPAg).	41
Cuadro 9. Comparación de medias de variables de análisis de Van Soest de frutos de papaya tratados con nanopartículas de plata (NPAg).	42
Cuadro 10. Comparación de medias de variables de análisis de Van Soest de frutos de papaya tratados con nanopartículas de plata (NPAg).	43
Cuadro 11. Comparación de las medias de pérdida de peso (%) de frutos de papaya tratados con nanopartículas de plata (NPAg).	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Microscopía electrónica de transmisión de las nanopartículas de plata. Fuente: imagen proporcionada por la empresa.	15
Figura 2. Comportamiento de la luminosidad (L^*) en frutos de papaya tratados con nanopartículas de plata (NPAg).	28
Figura 3. Comportamiento de Croma (c^*) en frutos de papaya tratados con nanopartículas de plata (NPAg).	29
Figura 4. Comportamiento del ángulo Hue (h^*) en frutos de papaya tratados con nanopartículas de plata (NPAg).	30

AGRADECIMIENTOS

A la **Secretaría de Ciencia y Tecnología (SECITY)**, por el apoyo otorgado y la confianza en mi trabajo, lo cual permitió llevar a cabo este proyecto con los medios adecuados.

A la **Universidad Autónoma Chapingo**, por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente en un excelente entorno académico, y por facilitar los recursos y espacios necesarios para el desarrollo de la investigación.

A la **Dra. Ma Teresa Martínez Damián**, por su orientación, paciencia y compromiso durante todo el desarrollo de esta investigación. Su guía académica y humana fue fundamental para lograr los objetivos.

Al **Dr. Eliseo Sosa Montes**, por su apoyo, sus valiosas observaciones y por compartir sus conocimientos, lo cual enriqueció profundamente este trabajo.

A la **Dra. María del Rosario García Mateos, la Dra. María Teresa Beryl Colinas y León y la Dra. Guadalupe Stefanny Aguilar Moreno**, por sus comentarios, sugerencias y aportes que contribuyeron al fortalecimiento de este estudio. Cada una de sus observaciones representó una oportunidad de mejora y aprendizaje.

Al **Sr. Emilio David López Calva, la Dra. Lyzbeth Hernández Ramos y al Q. A. Cecilio Bautista**, por su asistencia técnica, disposición y colaboración constante durante las etapas experimentales. Su trabajo fue esencial para obtener resultados confiables.

Al **Ing. Ruben Zárate Reyes**, por su apoyo al proporcionar el material vegetal utilizado para poder llevar a cabo este trabajo.

Al **Dr. Manuel Mandujano Piña**, por su ayuda a conseguir las nanopartículas de plata para poder llevar a cabo este trabajo.

DEDICATORIA

A Rodolfo, por ayudarme a encontrar un nuevo camino en la vida, por confiar y creer en mí, incluso en los momentos en que ni yo creía en mí misma. Gracias por el amor incondicional que me has dado hasta ahora.

A mis padres, Carmelita y Miguel, por ser mi guía constante, por su amor incondicional y su paciencia, y por enseñarme el valor del esfuerzo. Todo lo que he logrado y la persona que soy ahora son gracias a su apoyo inquebrantable.

A mis sobrinos Farid, Alexander, Gabriel, Jesús, Javier y Larissa, por ser un pilar muy importante en los cimientos de mi vida, por su apoyo y ayuda en todo. Espero que, como yo he sabido salir adelante, también encuentren su camino en la vida.

A mis mejores amigas Abril, Jenifer y Micaela, por su amistad sincera, por sus consejos, por las risas y por estar presentes en los días buenos y en los complicados. Su apoyo hizo que este proceso fuera más especial.

A mis nuevas amigas, Doc. Denis, Chayito y Lili, por compartir conmigo su conocimiento, su tiempo y su calidez. Gracias por enseñarme a crear nuevas amistades y por hacer que esta etapa sea una experiencia más enriquecedora y humana.

Al doctor Juan Ayala Arreola, por su guía académica y por ayudarme a encontrar mi vocación. Gracias a sus consejos, que han formado parte del desarrollo de esta etapa.

A mis compañeros de maestría, Francisco, Lesly y Fernando, por los momentos compartidos, el compañerismo y las experiencias que hicieron de este trayecto más grato. Cada momento con ustedes dejó una huella valiosa en mi vida.

A Dios, por concederme la fortaleza, la sabiduría y las oportunidades necesarias para alcanzar esta meta. A él encomiendo cada paso de mi vida y este logro que hoy culmina.

DATOS BIOGRÁFICOS

Marla Juquila López Sánchez nació el 22 de diciembre de 1999, en Unión Hidalgo, Oaxaca.

En el 2017, concluyó sus estudios de nivel medio superior en la Preparatoria Agrícola, perteneciente a la Universidad Autónoma Chapingo.

Posteriormente, en el 2022, obtuvo el grado de Ingeniero Agrónomo Especialista en Fitotecnia, con cédula profesional 13918331, por el Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo, mediante el Diplomado en Nutrición de Plantas impartido por el Centro de Educación Continua (CEC).



RESUMEN GENERAL

NANOPARTÍCULAS DE PLATA EN LA POSCOSECHA DE FRUTOS DE PAPAYA (*Carica papaya* L.) VAR. MARADOL.

La papaya (*Carica papaya* L.) var. Maradol es un fruto altamente perecedero cuya rápida maduración limita su vida de anaquel. Las nanopartículas de plata (NPAg) representan una alternativa poscosecha por sus propiedades antimicrobianas y su capacidad para modular procesos asociados al etileno. En este estudio se evaluaron tres concentraciones de NPAg (1200, 2400 y 3600 ppm) aplicadas por inmersión, analizando variables físicas, químicas y fisiológicas relacionadas con la calidad del fruto. La concentración de 1200 ppm mejoró diversos atributos al aumentar vitamina C, fenoles totales, humedad, cenizas y fracciones de fibra (fibra detergente neutra, fibra detergente ácida, celulosa y hemicelulosa), además de elevar el ángulo Hue y disminuir la firmeza, sílice y lignina. La concentración de 2400 ppm modificó principalmente el color del fruto, incrementando la luminosidad e intensidad (L^* y c^*). En contraste, 3600 ppm generó mayores valores de extracto etéreo y extracto libre de nitrógeno, así como la mayor pérdida de peso. Todas las concentraciones evaluadas se mantuvieron dentro de intervalos seguros para el consumo humano, por lo que las NPAg constituyen una alternativa viable para estudios posteriores orientados a mejorar la calidad poscosecha de papaya Maradol.

Palabras clave: papaya, nanopartículas de plata, calidad poscosecha, maduración, vida de anaquel.

GENERAL ABSTRACT

SILVER NANOPARTICLES IN THE POSTHARVEST OF PAPAYA FRUITS (*Carica papaya* L.) var. Maradol

Papaya (*Carica papaya* L.) var. Maradol is a highly perishable fruit whose rapid ripening limits its shelf life. Silver nanoparticles (AgNP) represent a post-harvest alternative due to their antimicrobial properties and their ability to modulate processes associated with ethylene. In this study, three concentrations of NPAg (1200, 2400, and 3600 ppm) were evaluated by immersion, analyzing physical, chemical, and physiological variables related to fruit quality. The 1200 ppm concentration improved several attributes by increasing vitamin C, total phenols, moisture, ash, and fiber fractions (neutral detergent fiber, acid detergent fiber, cellulose, and hemicellulose), as well as increasing the Hue angle and decreasing firmness, silica, and lignin. The 2400 ppm concentration mainly modified the color of the fruit, increasing brightness and intensity (L^* and c^*). In contrast, 3600 ppm generated higher ether extract and nitrogen-free extract values, as well as higher weight loss. All concentrations evaluated remained within safe limits for human consumption, making NPAg a viable alternative for further studies aimed at improving the postharvest quality of Maradol papaya.

Keywords: papaya, silver nanoparticles, postharvest quality, ripening, shelf life.

1. INTRODUCCIÓN

La papaya (*Carica papaya* L.) es una fruta tropical originaria de América Central y el Caribe, ampliamente cultivada en regiones tropicales y subtropicales del mundo (FAO, 2020). Conocida por su sabor dulce y su alto contenido de vitaminas A y C, la papaya destaca tanto por su valor nutricional como por sus propiedades medicinales y cosméticas (FAO, 2020). Lo que le ha permitido destacar como un producto de importancia en el comercio internacional (FAO, 2020).

La producción mundial de papaya ha experimentado un crecimiento constante en las últimas décadas, en 2024 se alcanzaron aproximadamente 17 millones de toneladas, siendo India, República Dominicana, Indonesia, México, Brasil y Nigeria los principales países productores, con India como el líder mundial (FAO, 2024). México, con más de un millón de toneladas anuales, ocupa el quinto lugar mundial y destacan estados como Oaxaca, Colima, Chiapas, Veracruz y Michoacán; si bien la producción es elevada, solo el 18% se destina a la exportación, principalmente a Estados Unidos y Canadá (SADER, 2023).

A pesar de su potencial comercial, la papaya presenta una marcada perecibilidad, lo que limita su exportación a mercados lejanos. Este problema se relaciona con su tasa de respiración, su sensibilidad al etileno y su susceptibilidad al daño fisiológico y microbiológico (Azcón-Bieto & Talón, 2008; Valdés & Valero, 2017). Ante ello, se han impulsado diversas estrategias para prolongar la vida de anaquel, mejorar la calidad poscosecha y ampliar el alcance de exportación.

El desarrollo de nuevas tecnologías poscosecha ha sido clave para enfrentar esta limitante. En este contexto, el uso de nanopartículas ha surgido como una herramienta prometedora. Las nanopartículas de plata han demostrado capacidad para retardar la maduración y reducir el deterioro poscosecha, gracias a su acción antimicrobiana y su efecto inhibidor de la señalización del etileno (Valdés & Valero, 2017). La identificación y el posible uso de inhibidores de la acción del etileno, especialmente durante la maduración y el almacenamiento de

frutas y hortalizas, han despertado un gran interés a lo largo de los años (Azcón-Bieto & Talón, 2008). El ion plata fue uno de los primeros inhibidores descubiertos y se ha utilizado ampliamente en investigaciones y en plantas ornamentales, gracias a su efectiva capacidad para bloquear la acción del etileno de forma competitiva (Azcón-Bieto & Talón, 2008).

Diversos estudios han explorado el uso de nanopartículas de plata en combinación con recubrimientos comestibles, ceras naturales o el almacenamiento en atmósferas controladas, lo que ha mostrado beneficios para la conservación de la papaya (Nair & Varghese, 2010). Estos avances no solo reducen las pérdidas poscosecha, sino que también mantienen la calidad sensorial y nutricional de los frutos, lo que favorece su comercialización en mercados nacionales e internacionales (Nair & Varghese, 2010).

La incorporación de nanopartículas de plata representa una alternativa innovadora para optimizar la conservación de los frutos de la papaya. Su evaluación constituye una oportunidad para ampliar el conocimiento sobre su aplicación poscosecha y contribuir al fortalecimiento de la cadena productiva del país.

1.1. OBJETIVO

1.1.1. General

Evaluar el efecto de la aplicación de nanopartículas de plata en la postcosecha de frutos de papaya (*Carica papaya* L.) var. Maradol para prolongar la vida de anaquel.

1.1.2. Específicos

Evaluar el efecto de tres concentraciones de nanopartículas de plata sobre algunas propiedades físicas (índice de madurez, color y firmeza), químicas (sólidos solubles totales, acidez titulable, vitamina C, capacidad antioxidante, fenoles totales, carotenoides, análisis proximal, análisis de Van Soest y concentración de plata) y fisiológicas (pérdida de peso) de los frutos de papaya (*Carica papaya* L.) var. Maradol durante su vida poscosecha.

1.2. HIPÓTESIS

La aplicación de nanopartículas de plata prolonga la vida de anaquel de los frutos de papaya (*Carica papaya* L.) var. Maradol.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. REFERENCIAS TAXONÓMICAS

REINO: Plantae

DIVISIÓN: Magnoliophyta

CLASE: Magnoliopsida

ORDEN: Violales

FAMILIA: Caricaceae

GÉNERO: *Carica* L., 1753

ESPECIE: *Carica papaya* L., 1753

La papaya (*Carica papaya*) fue descrita por Linneo en 1753, de origen en Mesoamérica (Von Linnaeus, 1753), perteneciente a la familia Caricaceae, que tiene seis géneros y 35 especies (Badillo, 2000; Antunes Carvalho & Renner, 2015).

2.2. ORIGEN

De acuerdo con los registros biogeográficos y la distribución de las poblaciones, se considera originaria de Mesoamérica (Fuentes & Santamaría, 2014). En la actualidad, la encontramos cultivada en todas las regiones tropicales de América, desde México hasta Argentina y Brasil, y naturalizada en los trópicos del Viejo Mundo (Vázquez et al., 1999).

2.3. DESCRIPCIÓN BOTÁNICA

2.3.1. Planta

Planta arborescente perennifolia, de 2 a 8 m (hasta 10 m) de altura con un diámetro a la altura del pecho de 6 a 15 cm (hasta 30 cm), con un olor acre distintivo (Vázquez et al.,1999).

2.3.2. Raíces

Presenta un sistema de raíz principal pivotante que puede extenderse hasta un metro de profundidad. Las raíces secundarias se desarrollan en un radio de 80 a 100 cm y la mayor actividad se encuentra en los primeros 30 cm (Vázquez et al.,1999; IIFT, 2023).

2.3.3. Tallo

El tronco es erguido, cilíndrico, hueco, excepto en los nudos, más grueso en su base; sin ramas y con cicatrices que dejan las hojas al caer, crecimiento monopódico cuando joven y, al madurar, se ramifica (Vázquez et al.,1999).

2.3.4. Hoja

Copa abierta y redondeada. Hojas grandes de pecíolo largo, de 0.7 a 1 m, con la lámina palmeada de siete a nueve lóbulos, y éstos a su vez en lóbulos más pequeños, ligeramente gruesos y carnosos. Hojas superiores erectas y extendidas e inferiores colgantes (Vázquez et al.,1999).

2.3.5. Flor

Flores pistiladas, estaminadas y bisexuales, con el cáliz tubular de 8 a 10 mm de largo, verdoso; corola tubular de 10 a 20 mm de largo, blancuzca o amarilla pálida. Flores femeninas solitarias o en grupos de cinco o seis en la base de una hoja; masculinas en panículas delgadas con 15 a 20 flores, o hasta 100 florecillas por inflorescencia. Las flores femeninas son mucho más grandes que las masculinas (Vázquez et al.,1999).

2.3.6. Fruto

Frutos apiñados alrededor del tronco. Bayas elipsoides a esféricas, que se tornan de verde a anaranjada en la madurez, con pulpa blanda y jugo lechoso. El fruto silvestre mide de 4 a 6 cm de largo y de 3 a 4.5 cm de ancho, contiene entre 200 y 400 semillas. Fruto cultivado de 10 a 50 cm de largo, según el cultivo (Vázquez et al., 1999).

2.4. CULTIVO

2.4.1. Altitud

Las mayores plantaciones comerciales se ubican entre las latitudes 23°N y 23°S; sin embargo, su producción se ha extendido hasta las latitudes 32°N y 32°S, siempre y cuando se encuentren al nivel del mar (Nakasone & Paull, 1998). La altitud óptima para la producción de este frutal es de 0 a 600 m.s.n.m. para mantener frutos de buena calidad con alto contenido de azúcares (Benacchio, 1982).

2.4.2. Temperatura

Las temperaturas promedio óptimas para el cultivo del papayo se ubican entre 21 y 33 °C, con un intervalo óptimo para la fotosíntesis entre 25 y 30 °C. Este frutal es muy sensible a las temperaturas frías, especialmente en las variedades con alto porcentaje de flores hermafroditas, ya que temperaturas inferiores a 17 °C durante la floración inducen la fusión de los estambres con los carpelos del ovario, lo que provoca frutos deformes (carpeloides) sin valor comercial. Otros efectos de las temperaturas bajas son los siguientes: a 15 °C se detiene el crecimiento de las plantas; a 0 °C se presentan daños severos en el follaje; a -2 °C los frutos se dañan considerablemente y a -4 °C la planta muere (Nakasone & Paull, 1998; De los Santos et al., 1997; Benacchio, 1982). Por el contrario, temperaturas superiores a 35 °C provocan esterilidad femenina debido al atrofiamiento del ovario, por lo que el fruto no se desarrolla o se desarrolla deforme (carpeloidía); además, el rango de fotosíntesis neta declina rápidamente y disminuye la conductancia estomática y la asimilación de CO₂ (Nakasone & Paull, 1998; Jeyakumar et al., 2007).

2.4.3. Precipitación y Humedad Relativa

En cuanto a las condiciones de precipitación pluvial, Nakasone y Paull (1998) señalaron que el papayo puede crecer bien y producir buenas cosechas bajo condiciones de temporal, siempre y cuando el mes más seco del año registre al menos 100 mm de lluvia; de lo contrario, requiere riegos complementarios. Jeyakumar et al. (2007) señalaron que un déficit hídrico superior al 82 % del contenido relativo de agua en las hojas induce una disminución de la conductancia estomática y de la asimilación de CO₂ y, en consecuencia, un estrés en la planta. En términos generales, Benacchio (1982), señaló que el papayo requiere de 800 a 2,000 mm de lluvia anuales y no tolera periodos largos de sequía, por lo cual es necesario aplicar riegos para tener un continuo amarre de frutos. Otro aspecto importante del clima es la humedad relativa, que en el papayo no debe ser inferior a 66 % para mantener una conductancia estomática óptima y un buen crecimiento del cultivo (Nakasone & Paul, 1998).

2.4.4. Suelo

Los mejores suelos para producir papaya son los de textura media, con un contenido de arcilla entre 10 y 30 %, una profundidad mayor a 80 cm y un pH entre 5.6 y 7.0. En suelos con pH menor a 5.6 es recomendable encalar, sobre todo si el porcentaje de saturación de aluminio es mayor al 15 % (De los Santos et al., 1997). En suelos con pH alrededor de 8.0, es factible producir papaya siempre que se utilicen compuestos acidificantes o fórmulas de fertilizantes ácidos durante los riegos. De acuerdo con Benacchio (1982), el papayo es ligeramente tolerante a la salinidad.

2.4.5. Radiación solar

Este frutal prefiere áreas soleadas; cuando el papayo se expone a la sombra, la planta reduce su crecimiento, con menor área foliar, baja su densidad estomática e incrementa la longitud de los entrenudos y de los peciolos, diversos autores han indicado que crece mejor con cantidades de radiación fotosintéticamente activa entre 1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ (Nakasone & Paul, 1998) y 1650 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ (Jeyakumar et al., 2007).

2.4.6. Viento

Los árboles de papaya son delicados y requieren protección de los vientos mayores de $64 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, ya que pueden afectar las plantas, al provocar mayor evaporación del agua del suelo y una transpiración intensa que les causa estrés hídrico; en ocasiones, los vientos mayores a $120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ pueden quebrar plantas, ocasionar abscisión de flores y frutos y disminuir los sólidos solubles de los frutos maduros (De los Santos et al., 1997; Nakasone & Paul, 1998).

2.5. MADURACIÓN

En el proceso de maduración de los frutos participan diversas rutas metabólicas para pasar de un fruto inmaduro a uno maduro y comestible; los procesos generados durante la maduración se consideran irreversibles y pueden ser de tipo morfológico, fisiológico, bioquímico y genético (Prasanna et al., 2007; Workneh et al., 2012).

Durante la maduración, algunas rutas metabólicas pueden concluir su ciclo, mientras que otras inician su proceso como efecto de la expresión genética y de la respuesta a un estímulo (Prasanna et al., 2007; Workneh et al., 2012). Algunos cambios bioquímicos y fisiológicos más específicos en la maduración de los frutos son el incremento de la tasa respiratoria, la degradación de la clorofila, la biosíntesis de otros pigmentos, la actividad enzimática y el incremento transitorio de la producción de etileno (Prasanna et al., 2007; Workneh et al., 2012).

2.6. COSECHA

El color de la cáscara es un indicador de la madurez comercial de los frutos de papaya. El punto adecuado es cuando la cáscara de los frutos comienza a cambiar de color de verde a amarillo-anaranjado, según el mercado de destino; es el grado de desarrollo del color (Bron & Jacomino, 2006). Las papayas 'Maradol' se cosechan en madurez fisiológica; para el mercado de exportación se cosechan con un 25 a 50 % de color anaranjado; por otro lado, frutas con un

desarrollo de color de 75 % se destinan al procesamiento y al mercado local (Barragán-Iglesias et al., 2018).

2.7. VALOR NUTRICIONAL

La papaya es un fruto bajo en calorías; es rico en vitaminas y minerales, además de aportar fibra, por lo que estas cualidades hacen que sea un fruto de alta demanda a nivel mundial por su alto valor nutricional (Krishna et al., 2008).

2.7.1. Carbohidratos

Los carbohidratos presentes en la papaya son principalmente disacáridos y algunos monosacáridos, el almidón se encuentra en pequeñas cantidades, semanas previas a que la fruta madure, se generan la mayoría de los azúcares reductores (Miranda et al., 2002). La cantidad de sacarosa reportada varía de acuerdo con la fuente, con cifras que van del 1.3 al 1.8 %. Esta diferencia puede deberse a la actividad de la enzima invertasa, que descompone la sacarosa en fructosa y glucosa (Miranda et al., 2002). Si se inactiva esta enzima con calor antes de extraer los azúcares, la pulpa madura de la fruta presenta la siguiente composición: 48.3 % de sacarosa, 29.8 % de glucosa, 21.9 % de fructosa y pequeñas cantidades de pseudoheptulosa (Miranda et al., 2002). Sin embargo, la cantidad de azúcares puede variar de una variedad a otra, además de depender del grado de maduración e incluso de la inflorescencia (Miranda et al., 2002). La papaya es una fruta con un valor calórico de entre 25 y 40 calorías por cada 100 gramos, según la variedad. Las variedades más dulces, por ende, tienden a tener más calorías, las cuales principalmente provienen de proteínas vegetales (Miranda et al., 2002).

2.7.2. Ácidos orgánicos

En la pulpa de la papaya, se encuentra una variedad de ácidos orgánicos, siendo los más destacados el málico, el cítrico y el α -cetoglutarico, con concentraciones de 0.46, 0.52 y 0.04 miliequivalentes, respectivamente por cada 100 g de fruta (Miranda et al., 2002). La acidez total promedio se sitúa en aproximadamente 1.54 miliequivalentes por cada 100 gramos de fruta, lo que equivale a un 0.099

% si se expresa en ácido cítrico, que es el principal componente ácido (Miranda et al., 2002).

En la composición de la acidez titulable, el 85 % proviene de los ácidos ascórbico, málico, cetoglutarico y cítrico, mientras que los ácidos volátiles representan el 8 %; por otro lado, el ácido galacturónico y otros ácidos no volátiles constituyen el 2 % restante, en comparación con otras frutas, la papaya se distingue por tener una acidez relativamente baja (Miranda et al., 2002).

2.7.3. Vitaminas

Las vitaminas, junto con las enzimas proteolíticas, son uno de los principales beneficios nutricionales de la papaya, la vitamina C es la más abundante en esta fruta, con concentraciones que oscilan entre 50 y 120 mg por cada 100 gramos, en comparación con frutas como el mamey (*Pouteria zapota* Jacq.), el aguacate (*Persea americana* Mill.), el limón (*Citrus limon* L. Burm.), la naranja (*Citrus sinensis* L. Osb.) y la uva (*Vitis vinifera*) que tienen niveles más bajos de vitamina C (Miranda et al., 2002). En la papaya, el contenido de vitamina C disminuye cuando el fruto madura, al ser más alto el contenido en la cáscara que en la pulpa (Miranda et al., 2002). Además, la papaya es una excelente fuente de β -caroteno (precursor de la vitamina A), fundamental para proteger los tejidos y las mucosas, así como para prevenir enfermedades cardiovasculares y neurológicas (Miranda et al., 2002).

Los principales carotenoides en la pulpa de papaya fueron identificados como licopeno, α -cryptoxantina y α -caroteno, el contenido de licopeno varía entre - 10.0015 y 0.012 g kg de peso fresco (Rivera-Pastrana et al., 2010). Los frutos almacenados a 25 °C pueden contener una mayor cantidad de carotenoides que los almacenados a 1 °C, debido al daño por el frío (Rivera-Pastrana et al., 2010).

2.7.4. Minerales

Los minerales que más abundan en las frutas de papaya son el fósforo (P), el calcio (Ca) y el hierro (Fe), el potasio (K) también es de interés (Miranda et al., 2002). De forma general, los minerales presentes en 100 gramos de porción

comestible de papaya son: Ca (20 mg), K (211 mg), magnesio (Mg) (41 mg), P (14 mg), azufre (S) (30 mg), boro (B) (0.51 mg), cobre (Cu) (0.17 mg), hierro Fe (0.3 mg), manganeso (Mn) (0,04 mg), sodio (Na) (3 mg) y zinc (Zn) (0,08 mg) (Miranda et al., 2002).

2.7.5. Pectinas

La pérdida de firmeza en los frutos a medida que maduran está relacionada principalmente con las actividades de las enzimas pectinesterasa y poligalacturonasa, estas trabajan sobre las pectinas, que forman parte de los pectatos de calcio presentes en las paredes celulares del fruto (Miranda et al., 2002). Tanto las pectinas como las celulosas son componentes importantes de las fibras dietéticas (Miranda et al., 2002).

2.7.6. Antioxidantes

La papaya contiene antioxidantes naturales que neutralizan la acción de los agentes tóxicos. Entre las cuales se encuentran las vitaminas A y C (Miranda et al., 2002).

Además, acumula componentes bioactivos como fenoles, carotenoides, saponinas/triterpenoides y ácido ascórbico (Sharma et al., 2020). Los frutos también pueden contener compuestos fenólicos, como ácidos fenólicos, flavonoides, estilbenos y lignanos (Cutrim & Cortez, 2018).

2.8. NANOPARTÍCULAS DE PLATA

Los nanomateriales pueden definirse como aquellos en los que sus dimensiones se encuentran entre 1 y 100 nm y que presentan distintas formas y propiedades según su aplicación (Numan, 2021).

La nanotecnología ha sido utilizada en las últimas décadas por su amplio campo de aplicación, como la medicina, la farmacéutica, los materiales y la energía (Chhipa, 2019).

Las nanopartículas (NPs) pueden clasificarse en orgánicas e inorgánicas; las inorgánicas son de interés en este trabajo, ya que en ellas se encuentran las metálicas, entre las que se incluyen las de plata (Ijaz et al., 2020). Debido a su pequeño tamaño, las nanopartículas exhiben propiedades físicas y químicas únicas en comparación con sus contrapartes a granel, lo que las hace útiles en diversas aplicaciones industriales, médicas y tecnológicas (Buzea et al., 2007).

Las nanopartículas han encontrado múltiples aplicaciones en la agricultura, aprovechando sus propiedades únicas para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de las prácticas agrícolas. Puesto que tienen propiedades antimicrobianas y antifúngicas, lo que las hace eficaces en el control de patógenos que afectan a las plantas, pueden mejorar la acción de los fertilizantes, permitiendo una liberación más controlada y eficiente de nutrientes esenciales para las plantas, reduciendo así la cantidad de fertilizante necesaria y minimizando el impacto ambiental (Kah & Hofmann, 2014). Actualmente se están desarrollando sensores basados en nanopartículas para monitorear la salud del suelo, los niveles de nutrientes y la presencia de patógenos, lo que permite una agricultura de precisión más eficaz (Kah & Hofmann, 2014).

Los nanomateriales se utilizan en la agricultura sostenible para el crecimiento de las plantas mediante su aplicación como fertilizantes y pesticidas, ya que resultan más eficientes y seguros (Chhipa, 2019; Salem et al., 2016). Las nanopartículas de plata en el suelo favorecen el crecimiento y rendimiento de cultivos, tal es el caso del trigo (Ghidan et al., 2018).

La comunidad científica muestra un gran interés en las nanopartículas de plata (NPAg) por sus propiedades de tamaño y su eficacia en la actividad antimicrobiana (Kim et al., 2007; Lee et al., 2009). El uso de NPAg, junto con algunos recubrimientos, ayuda a retrasar la maduración y la actividad metabólica de los frutos (Hu et al., 2011; Fahiminia & Naseri, 2015).

En el ámbito poscosecha, las nanopartículas se emplean para prolongar la vida útil de los frutos y mantener su calidad (Rai et al., 2015). Estas aplicaciones se

basan principalmente en sus propiedades antimicrobianas y en su capacidad para controlar la liberación de sustancias bioactivas. Las nanopartículas de plata y otros metales se utilizan en recubrimientos comestibles para frutas y verduras (Rai et al., 2015).

Además, las NPAg pueden influir en los procesos fisiológicos de los frutos, controlando la maduración y la síntesis de etileno, ya que el ion plata (Ag^{2+}) es un fuerte inhibidor de la acción del etileno (Taiz & Zeiger, 2006). El ion Ag^{2+} reemplaza al Cu presente en los receptores de etileno (Serek et al., 2006); en consecuencia, se afecta la señalización inducida por etileno y se disminuyen los procesos de maduración y senescencia (Knee, 1995).

Se han hecho evaluaciones de las NPAg en combinación con otros compuestos como extracto de *Sargassum fluitans* e hidroxipropilmetilcelulosa para prolongar la vida de anaquel en frutos de papaya, en el trabajo con el extracto de sargazo, se mantuvieron las propiedades fisicoquímicas del fruto, por otro lado, la plata migró al mesocarpio de la fruta presentando toxicidad (Martínez-Molina et al., 2022). En el trabajo realizado con hidroxipropilmetilcelulosa, se obtuvo la preservación de las propiedades del fruto a una concentración específica; además, se sugiere que constituye una alternativa frente a la proliferación de hongos (Vieira et al., 2020). Asimismo, en manzanas se evaluó la eficacia de las NPAg sintetizadas a partir de hojas de romero usadas como conservantes, que retardaron el proceso de maduración, mantuvieron el peso inicial e impidieron la contaminación microbiana y la descomposición de la fruta durante 30 días (Pardo et al., 2022).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN

El estudio se llevó a cabo en el laboratorio de fisiología de frutales del Departamento de Fitotecnia y en el Departamento de Zootecnia de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH)

3.2. MATERIAL VEGETAL

Los frutos utilizados fueron de la variedad Maradol, cuyos frutos alcanzan tamaños entre 1.8-2.6 kg, de aroma dulce, color intenso rojo salmón y exterior amarillo naranja con 12 °Brix en dulzor.

Se cosecharon en una huerta perteneciente a la comunidad de San José Manialtepec, Villa de Tututepec, Oaxaca, con coordenadas 15° 57' 27.12" N y 97° 14' 52.48" O. Se seleccionó un total de 24 frutos, homogeneizando el tamaño, la forma y el grado de madurez (dos líneas: amarillas o naranjas), correspondientes al estado de madurez 3 (Cuadro 2). Posteriormente, en el laboratorio se etiquetaron y quedaron expuestos al ambiente con sus respectivos tratamientos.

3.3. DISEÑO EXPERIMENTAL

Se utilizó un diseño completamente al azar (DCA), con cuatro tratamientos; cada uno constó de seis repeticiones. Y la unidad experimental fue de un fruto.

Se evaluaron tres dosis de nanopartículas de plata (Cuadro 1) en la poscosecha de frutos de papaya mediante inmersión.

Cuadro 1. Tratamientos a base de nanopartículas de plata.

TRATAMIENTOS
Testigo (agua)
1200 ppm de NPAg
2400 ppm de NPAg
3600 ppm de NPAg

3.4. NANOPARTÍCULAS DE PLATA

Se adquirieron de la empresa ID-nano, Investigación y Desarrollo de Nanomateriales, S.A. de C.V.

Nanopartículas de plata: Ag. CAS # 7440-22-4 (Ag-ID01) coloide de alta concentración (> 3400 PPM) o 0.34% tamaño 20 nm

Cuyas características son: alta pureza en solución coloidal, tamaño promedio de 20 nm (Figura 1), solución ámbar oscura (alta concentración) como apariencia física y alta solubilidad en agua.

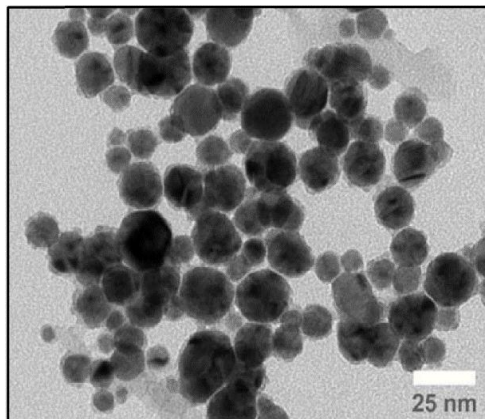


Figura 1. Microscopía electrónica de transmisión de las nanopartículas de plata. Fuente: imagen proporcionada por la empresa.

3.4.1. Forma de aplicación

Antes de la inmersión de los frutos en las nanopartículas, se realizó el lavado con 3000 ppm de Tecto 60 (tiabendazol), tallando suavemente para no dañar los frutos que posteriormente, se dejaron secar.

Se realizó la dilución de las nanopartículas de plata a concentraciones de 1200, 2400 y 3600 ppm de NPAg. Una vez secos los frutos, se sumergieron en las diferentes concentraciones durante 5 minutos. Pasado el tiempo, se dejaron secar. No se utilizaron disolventes ni se sonicaron, ya que el producto es altamente soluble en agua.

3.5. VARIABLES EVALUADAS

3.5.1. VARIABLES FÍSICAS

3.5.1.1. Índice de madurez

Los frutos de papaya se clasifican según la escala de Basulto et al. (2007). Donde los frutos de papaya se clasifican de 0 a 6, donde 0 corresponde al fruto completamente verde y 6 al fruto completamente maduro (Cuadro 2).

Cuadro 2. Descripción de los estados de madurez de la papaya (*Carica papaya* L.) var. Maradol según Basulto et al. (2007).

Estado de madurez	Descripción
Fruta verde (0)	Cáscara verde sin franja amarilla; pulpa muy dura y de color blanco; las semillas están bien formadas, pero son blancas o ligeramente oscuras.
1	Cáscara verde con una franja amarilla tenue; la pulpa presenta algunas zonas naranjas; es muy dura y contiene grandes cantidades de látex.
2	Cáscara verde con franja amarilla bien definida; la pulpa es naranja cerca de la cavidad de las semillas y verde claro cerca de la piel, aunque sigue siendo dura y presenta grandes cantidades de látex.
3	Una o más franjas naranjas en la cáscara; la pulpa es casi completamente naranja, excepto cerca de la piel, aún dura, pero con menos látex.
4	Cáscara claramente naranja, con algunas zonas verdes claras; pulpa completamente naranja, excepto cerca del pedúnculo, más suave que en la etapa 3, pero aún demasiado dura para el consumo, con bajo contenido de látex.
5	La cáscara presenta el color naranja característico de la variedad Maradol; la firmeza de la pulpa es adecuada para el consumo; ya no presenta látex.
6	Condiciones similares a la etapa 5, pero con un color naranja más intenso en la cáscara y una pulpa más suave, aún adecuada para el consumo

3.5.1.2. Color (L^* , c^* , h^*)

Se utilizó un colorímetro de la marca ColorTec-PCM™, USA. Se tomaron datos cada tercer día en dos puntos de la zona ecuatorial del fruto, cuando este alcanzó la madurez 6 (Cuadro 2). El colorímetro proporciona unidades L^* , a^* y b^* , y posteriormente se calculan L^* , c^* y h^* , donde L^* se refiere a la luminosidad, el atributo perceptual que evalúa la sensación visual “claro oscuro” (la escala numérica va de 0 a 100) (Montesinos, 2003). El c^* es el valor de croma o colorido que estima la sensación visual “débil-fuerte” o “pálido-intenso” de un color (Montesinos, 2003). Por último, h^* (de 0° a 360°) se refiere al tono o ángulo hue, que se define como un atributo de la sensación visual según el cual una región se asemeja a uno de los colores percibidos: rojo, amarillo, verde o azul, o a una combinación de ellos (Montesinos, 2003).

3.5.1.3. Firmeza (N)

Se determinó con un penetrómetro digital de la marca MECMESIN™, modelo COMPACT GAUGE 200N, UK, con punta cónica de 7 mm de diámetro. Se realizaron tres mediciones por fruto al alcanzar un índice de madurez 6, en la circunferencia ecuatorial.

3.5.2. VARIABLES QUÍMICAS

3.5.2.1. Sólidos solubles totales (°Brix)

Los sólidos solubles totales (SST) representan la cantidad de compuestos solubles presentes en una solución; en frutas y verduras incluyen azúcares, pectinas, ácidos orgánicos y aminoácidos, siendo los azúcares los componentes predominantes (Eswaran et al., 2022).

Se cuantificaron cuando la fruta alcanzó un índice de madurez 6, mediante un refractómetro digital portátil ATAGO PAL-1 de la marca Pocket® (0 a 53 %). Se colocaron gotas de jugo del fruto en el prisma del equipo y se tomó la lectura.

3.5.2.2. Acidez titulable (% de ácido)

La determinación se realizó en la fruta con el índice de madurez 6 mencionado, con el método de titulación ácido-base (AOAC, 1990), en el cual se tomaron 5 g de pulpa de fruta con 50 ml de agua destilada, se homogenizaron, se midió el volumen y se filtró a través de un colador. De la mezcla obtenida se tomó una alícuota de 10 ml, a la que se agregaron dos gotas de fenolftaleína como indicador, y se tituló gota a gota con hidróxido de sodio 0.1 N hasta observar un cambio suave de color naranja a rosa mexicano.

La acidez se expresó como porcentaje utilizando la fórmula:

$$\text{Acidez (\%)} = \frac{\text{mL NaOH} \cdot \text{N} \cdot \text{Meq. ác.} \cdot \text{V} \cdot 100}{\text{peso de muestra} \cdot \text{alícuota}}$$

N = normalidad del NaOH; V = volumen (ml después de homogeneizar) y Meq. ác. = miliequivalentes del ácido en mayor proporción, ácido cítrico

3.5.2.3. Vitamina C (mg vitamina C·g⁻¹ PF)

Para determinar el contenido de vitamina C de los frutos en estado de madurez 6, se utilizó la técnica colorimétrica con reactivo folín, descrita por Jagota y Dani (1982), que consiste en pesar la muestra (0.5 g) y homogeneizarla con ácido oxálico. Se cuela para tomar una alícuota de 5 ml de la mezcla y se titula gota a gota con solución Tillmans (2,6-diclorofenolindofenol) hasta cambiar de color naranja a rosa mexicano.

3.5.2.4. Actividad antioxidante (μM ET 100·g⁻¹ PF)

Se tomaron frutos en estado de madurez 6 para determinar la actividad antioxidante mediante el radical ABTS^{•+}. Se obtuvo de acuerdo con la metodología desarrollada por Re *et al.* (1999). El radical se genera mediante la reacción de 10 ml de ABTS (Ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolin)-6-sulfónico) 7 mM con 6.61 mg de persulfato potásico (K₂S₂O₈), para obtener una concentración final de 2.45 mM. La mezcla se incubó a temperatura ambiente (± 25 °C) en oscuridad durante 16 h. Una vez generado el radical ABTS^{•+}, se tomó 1 ml y se diluyó con etanol absoluto hasta obtener un valor de absorbancia en el espectrofotómetro comprendido entre 0.70 ± 0.1 y una longitud de onda de 734 nm. La preparación del extracto metanólico se realizó pesando 1 g de la muestra de papaya y se maceró en un mortero con 5 ml de etanol al 85 %, con otros 5 ml de etanol se limpió el mortero. Por otra parte, se mezclaron 1 ml de ABTS^{•+} (7 mM) preparado y 10 μL del extracto metanólico de la muestra; la mezcla se incubó en baño María a 30 °C en oscuridad durante 7 min. Transcurrido el tiempo, se midió la absorbancia en un espectrofotómetro a 734 nm. El porcentaje de inhibición del ABTS^{•+} se obtuvo mediante la fórmula: $ABTS \text{ inhibido (\%)} = [(AI - AF) / AI] \cdot 100$, donde: AI = absorbancia inicial del radical libre; AF = absorbancia final del radical libre en la reacción con la muestra. La actividad antioxidante se calculó mediante una curva estándar a base de Trolox (ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2-carboxílico). El antioxidante de referencia Trolox se ensayó en las mismas condiciones que la muestra, con al menos cinco concentraciones de Trolox en un intervalo de 0 a 3 mM (concentración final) en solución de etanol.

Se graficó la concentración vs. la absorbancia después de realizar una regresión lineal ($y = 42.359x - 4.0079$) y de obtener el R^2 (0.9944). Con la base en la ecuación obtenida de la regresión se calculó la actividad antioxidante de las soluciones.

3.5.2.5. Fenoles totales (mg EAG·100 g⁻¹ PF)

Para esta determinación se usaron frutos con estado de madurez 6; se empleó el método espectrofotométrico con las modificaciones de Waterman y Mole (1994). Se tomó 0.5 ml del extracto metanólico, de muestra, se le agregaron 0.5 ml del reactivo Folin-Ciocalteu (0.2 N) y 4 ml de una solución 0.7 M de Na_2CO_3 , se agitó en un vórtex, se incubó a temperatura ambiente y en oscuridad por 2 h, se tomaron las lecturas en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 765 nm. La concentración se calculó a partir de una curva estándar previamente preparada a base de ácido gálico (aprox. cinco concentraciones) de 0 a 80 mg L⁻¹. Se graficó la concentración vs. la absorbancia después de realizar una regresión lineal y obtener el R^2 . Con base en la ecuación obtenida de la regresión se calculó la concentración. El contenido total de fenoles del extracto se expresó en mg equivalentes de ácido gálico por 100 g de peso fresco (mg EAG·100 g⁻¹ PF).

3.5.2.6. Carotenoides totales (µg·g⁻¹ PF)

Se cuantificaron los carotenoides totales en frutos con estado de madurez 6, mediante el método de Steinberg et al. (2000). Se tomaron 5 g de muestra y se homogenizó con 5 ml de agua destilada. Se tomó 1 ml de la muestra, que se combinó con 1 ml de agua destilada y 2 ml de etanol en un tubo de fondo plano y se agitó en vórtex. Se agregaron a cada tubo 4 ml de hexano, se sellaron con Parafilm y se agitaron durante 5 minutos en un agitador horizontal. La mezcla se centrifugó durante 5 minutos a 235 X g. El sobrenadante fue transferido a una celda de 1 ml y se midió la absorbancia en un espectrofotómetro a 450 nm tomando como blanco hexano.

El contenido de los carotenoides totales se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Contenido total de carotenoides } (\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}) = \frac{A \cdot V(\text{ml}) \cdot 10^4}{A_{1\%}^{1\text{cm}} \cdot P(\text{g})}$$

Donde A = absorbancia; V = volumen total del extracto; P = peso de la muestra; $A_{1\%}^{1\text{cm}} = 2592$ (coeficiente de extinción de β – caroteno en hexano).

3.5.3. Análisis proximal

Se utilizó el manual de procedimientos analíticos para alimentos de consumo animal descrito por de Pró (1979). Es importante recalcar que, la determinación de cada muestra se hizo con triplicado y para manipular las cajitas, se deben utilizar pinzas. Además, todos los cálculos realizados son en peso fresco (PF), posteriormente se pasa a peso seco con ayuda de la materia seca total.

3.5.3.1. Humedad y materia seca total (PF)

a) Materia seca parcial

Se secaron 200 g de pulpa de frutos en estados de madurez 6, de cada una de las repeticiones en una estufa GCA/PRECISION SCIENTIFIC MODEL 6M a 55 °C, y posteriormente se molieron en una licuadora hasta obtener un polvo fino y se almacenaron en una bolsa de plástico hasta los análisis.

$$\text{Humedad parcial } (\%) = \frac{\text{perdida de peso (g)} \cdot 100}{\text{muestra (g)}}$$

$$\text{Materia seca parcial } (\%) = 100 - \% \text{ humedad parcial}$$

b) Materia seca total

Se tomaron cajas de aluminio y se colocaron en un desecador hasta tener peso constante, después de enfriar se pesaron en una balanza analítica, se agregó 1 g de la muestra y se metió en la estufa a 100 °C por 24 h sin tapar las cajas. Cumplido el tiempo, se sacaron las cajas previamente tapadas y se dejaron en un desecador durante 30 min para enfriar. Por último, se pesaron las cajitas en la misma balanza analítica.

$$\text{Humedad total (\%)} = \frac{\text{perdida de peso (g)} \cdot 100}{\text{muestra (g)}}$$

$$\text{Materia seca total (\%)} = 100 - \% \text{ humedad total}$$

3.5.3.2. Cenizas y materia orgánica (% PS)

Mediante la metodología de determinación de cenizas totales y materia orgánica, se pesa 1 g de muestra y se agrega en un crisol de porcelana secado a peso constante y se pesó cada crisol con la muestra. En un mechero se colocó un triángulo de porcelana como base del crisol y se quema la muestra hasta suspensión de humo, posteriormente, se mete en la mufla a 500 °C durante dos horas, por último, se deja enfriar y se pesa.

$$\text{Cenizas (PF \%)} = \frac{\text{perdida de peso (g)} \cdot 100}{\text{muestra (g)}}$$

$$\text{Materia orgánica (\%)} = \text{Materia seca (\%)} - \text{Cenizas (PF \%)}$$

3.5.3.3. Proteína cruda (% PS)

Con base en la determinación de proteína cruda (Método Macro-Kjeldahl), se pesaron 0.5 g de muestra y se introdujeron en el matraz Kjeldahl junto con 10 g de catalizador; luego se agregaron 12 ml de HCl; posteriormente, se colocó el matraz en la parrilla del digestor, sin olvidar encender el extractor.

El indicador de que se puede apagar la parrilla es que el contenido del matraz pasa de un color oscuro a verde y, por último, a transparente. Se deja que enfríe para agregar 130 ml de agua destilada y piedras de ebullición; por otro lado, en un matraz Erlenmeyer se le agregan 32.5 ml de H₃BO₃ y dos gotas de indicador de proteína, y se coloca bajo el refrigerante del destilador, con la manguera colectora ligeramente dentro de la solución.

Se conecta el matraz Kjeldahl al refrigerante del destilador y se enciende la parrilla hasta que en el matraz Erlenmeyer se hayan colectado 125 ml, retirándolo antes de apagarla.

Por último, el contenido del matraz se tituló con una solución de HCl a 0.0940 N hasta que la muestra cambió a color violeta.

$$\text{Peso equivalente de nitrógeno} = \frac{\text{peso molecular o atómico}}{\text{Núm. de valencia}}$$

$$\text{Miliequivalente del nitrógeno} = \frac{\text{peso equivalente}}{1000}$$

Proteína cruda (PF %)

$$= \frac{\text{HCl gastado (ml)} \cdot \text{Normalidad} \cdot \text{meq de N} \cdot \text{Factor}(6.25) \cdot 100}{\text{muestra (g)}}$$

$$\text{Proteína cruda (PS \%)} = \frac{\text{proteína cruda (PF\%)} \cdot 100}{\text{materia seca total (PF)}}$$

3.5.3.4. Extracto etéreo (% PS)

Se pesó 1 g de la muestra previamente secada, se deposita en un dedal de celulosa forrado internamente con papel filtro, se coloca dentro de un porta dedal de vidrio y se fija bajo el condensador del aparato de extracción tipo Goldsfigh, se agregan 30 ml de éter dietílico en un vaso extractor previamente pesado y se une con una rosca, se coloca debajo del condensador cerrando herméticamente. Debe abrirse la llave de agua y subir las parrillas hasta que queden en contacto con la base del vaso de extracción y, una vez que empiece la ebullición, dejar 6 h para que se evapore todo el éter, observando periódicamente. Una vez que termine la extracción, se bajan las parillas y se deja que el dedal termine de gotear. Se desmonta el vaso y se retira el dedal que contiene la muestra.

El vaso y los dedales de celulosa se dejan en la estufa a 100 °C durante 15 min. Posteriormente, se saca y se coloca en un desecador durante 30 min para finalmente pesar el vaso y guardar la muestra contenida en el filtro.

$$\text{Extracto etéreo (PS \%)} = \frac{\text{extracto etereo (g)} \cdot 100}{\text{muestra (PS)}}$$

3.5.3.5. Fibra cruda (% PS)

Se pesaron 0.25 g de muestra por cada repetición y a cada una se le adiciona 100 ml de ácido sulfúrico 0.255 N, se conecta el vaso al digestor de fibra cruda, se encienden las parrillas, se abren las llaves de agua y a partir de la ebullición se deja a reflujo por 30 min.

Se retira el vaso y se filtra con vacío a través de un embudo Büchner con agua destilada hirviendo hasta que no produzca reacción ácida con anaranjado de metilo. Todo el residuo se transfiere a un vaso Berzelius, lavando bien el embudo y el filtro con NaOH 0.313 N caliente y completando a 200 ml. Se hierve nuevamente durante 30 minutos; al final, transfiere todo el contenido a un crisol con una base de fibra de vidrio y se filtra bajo vacío, lavando previamente el contenedor con abundante agua hasta que, al agregar fenolftaleína, no reaccione.

Se deja en una estufa a 100 °C toda la noche; al día siguiente, al sacarla, debe meterse en un desecador hasta enfriar (30-40 min) y, posteriormente, pesarla. Como últimos pasos, debe meterse en la mufla e incinerar a 500 °C durante 2 h, para que, posteriormente se deje enfriar un poco antes de meterla al desecador y se pese.

$$Fibra\ cruda\ (PS\ \%) = \frac{fibra\ cruda\ (g) \cdot 100}{muestra\ seca\ y\ desengrasada\ (g)}$$

3.5.3.6. Extracto libre de nitrógeno (ELN) (% PS)

El ELN se calculó por diferencia mediante la fórmula:

$$ELN\ \%, BS = 100 - (EET\ \%, BS + FC\ \%, BS + PC\ \%, BS + C\ \%, BS)$$

Donde: ELN: extracto libre de nitrógeno en porcentaje en base seca; EET: extracto etéreo en porcentaje en base seca; FC: fibra cruda en porcentaje en base seca; PC: proteína cruda en porcentaje en base seca; C: cenizas en porcentaje en base seca.

3.5.4. Análisis de Van Soest

El material para analizar fue el mismo que se utilizó en el análisis proximal. Además, se utilizó el manual de procedimientos analíticos para alimentos de consumo animal descrito por de Pro (1979)

3.5.4.1. Fibra detergente neutro (FDN) (% PS)

La determinación de fibra detergente neutro o de paredes celulares se realizó pesando 0.5 g de muestra, una bolsa ANKOM y el peso total de la muestra. Se colocaron las bolsas en un vaso Berzelius; después, se cubrió el vaso con una solución de FDN hasta que las bolsas quedaran bien cubiertas. Se puso en una parrilla con termostato y, a partir de la ebullición, se dejó durante 60 min. Pasado el tiempo, se filtró al vacío con un embudo Büchner agregando agua destilada caliente hasta que deje de salir espuma. Posteriormente, se deja en una estufa a 100 °C durante toda la noche; al día siguiente, se colocan en un desecador y, al tener un peso constante, se pesaron.

$$Paredes\ celulares\ (PF\ \%) = \frac{paredes\ celulares\ (g) \cdot 100}{muestra\ (g)}$$

$$Contenido\ celular\ (PF\ \%) = Materia\ seca\ (\%) - Paredes\ celulares\ (PF\ \%)$$

3.5.4.2. Fibra detergente ácido (FDA) (% PS)

Las bolsitas usadas en FDN se utilizaron para realizar la determinación de fibra detergente ácido y lignina, una vez terminada la determinación anterior, se colocan las bolsas dentro de un vaso Berzelius para después cubrirlo con una solución de FDA hasta cubrir bien las bolsas, se puso en una parrilla con termostato y a partir de la ebullición se dejó por 60 min. Pasado el tiempo, se filtra al vacío con un embudo Büchner agregando agua destilada caliente hasta que dejó de salir espuma. Posteriormente, se colocó en una estufa a 100 °C durante toda la noche; al día siguiente, se colocaron en un desecador hasta peso constante y se pesó.

$$FDA\ (PF\ \%) = \frac{FDA\ (g) \cdot 100}{muestra\ (g)}$$

3.5.4.3. Lignina

Las bolsitas ANKOM se introdujeron en un vaso Berzelius para después cubrirlo con ácido sulfúrico al 72% durante 90 minutos, posteriormente se lavó con abundante agua destilada caliente hasta eliminar el ácido empleando anaranjado de metilo como indicador. Se dejó secar en una estufa a 100 °C durante toda la noche. Se dejó enfriar y se pesó.

$$Lignina (PF \%) = \frac{Lignina (g) \cdot 100}{muestra (g)}$$

3.5.4.4. Celulosa y Hemicelulosa

Una vez pesadas, se introducen las bolsas en un crisol previamente pesado y se colocaron en la mufla a 550 °C durante 3 h. Posteriormente se espera a que disminuya su temperatura para meterlos en un desecador y, finalmente, pesarlos.

$$Celulosa (PF \%) = \frac{Celulosa (g) \cdot 100}{muestra (g)}$$

$$Hemicelulosa (PF \%) = \frac{Hemicelulosa (g) \cdot 100}{muestra (g)}$$

3.5.5. Determinación de plata

El análisis se realizó mediante digestión diácido para eliminar la materia orgánica, a 0.5 g de muestra se le agregó una proporción de 1:4 de ácido perclórico 70% y ácido sulfúrico, se dejó en una placa calefactora, una vez que reaccionó se le agregó 1.5 ml de agua oxigenada para después esperar el cambio total de color (café- amarillo-transparente); se dejó enfriar para aforar a 25 ml con agua destilada y mediante un espectrofotómetro de absorción atómica se obtuvo la concentración de plata en las muestras (AOAC, 2016).

3.5.6. VARIABLES FISIOLÓGICAS

3.5.6.1. Pérdida de peso (%)

Los frutos se pesaron con una balanza Valor™ 1000, OHAUS®, USA, antes de establecer cada tratamiento y cada tercer día, para observar la disminución del

peso. Posteriormente, se calculó el porcentaje de pérdida de peso (PP) mediante la siguiente fórmula:

$$Pérdida\ peso\ (\%) = \left(\frac{peso\ inicial(g) - peso\ final(g)}{peso\ inicial} \right) \cdot 100$$

Para el análisis de datos, los valores en porcentaje de pérdida de peso (%) se transformaron con la siguiente fórmula para su normalidad estadística (López & González, 2013):

$$Y_{ij} = \arcsen \sqrt{Y_{ij}}$$

3.5.7. Análisis de estadístico.

Se empleó un análisis de varianza ANOVA, una prueba de comparación de medias de Duncan con un nivel de significancia de 5%, mediante el software estadístico SAS 9.4.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. VARIABLES FÍSICAS

4.1.1. Índice de madurez

El comportamiento de maduración de los frutos evaluados avanzó gradualmente hasta alcanzar la madurez de consumo (índice de madurez 6), en esta etapa, cáscara y pulpa presentan un color amarillo-naranja y las semillas presentan su tonalidad negra característica (Basulto et al., 2007) (Cuadro 3). Se realizaron cinco mediciones cada tercer día desde el inicio del experimento, tomando el día 0 como referencia. Del día 0 al 3 se registraron cambios en los estados de madurez, destacando que únicamente los frutos tratados con la dosis intermedia de NPAg presentó el mayor índice. El día 6 se observaron frutos con características de madurez de consumo en el testigo y en las dosis de 1200 y 3600 ppm de NPAg. Al día 9 se detectaron seis frutos con índice de madurez 6: cuatro en 2400 ppm y dos en 3600 ppm de NPAg. En la última evaluación (día 12), los frutos testigo y los tratados con 1200 ppm mostraron, en comparación con las otras dosis, mayor número de frutos con un estado de madurez que

podría indicar un incremento en la vida de anaquel. Estos resultados concordaron parcialmente con lo reportado por Santamaría et al. (2007), quienes mencionaron que la papaya alcanza la madurez de consumo entre 13 y 15 días después de la cosecha bajo condiciones de 23 ± 1 °C y 75% de humedad relativa. Sin embargo, en este estudio los frutos presentaron una menor duración que la señalada por otros autores. Viera et al. (2020) reportaron frutos almacenados durante 14 días al evaluar NPAg combinadas con hidroxipropilmetilcelulosa como recubrimiento; por otra parte, Martínez-Molina et al. (2022) observaron tiempos de almacenamiento de hasta 15 días en frutos tratados con recubrimientos de alginato de sodio y de NPAg.

Cuadro 3. Comportamiento del índice de madurez bajo condiciones de NPAg a los 0, 3, 6, 9 y 12 días según la escala de Basulto et al. (2007).

TRATAMIENTOS	0*	3*	6*	9*	12*
Testigo	6 ¹ , 3 ²	6 ¹ , 3.7 ²	6 ¹ , 5 ² , 2 ³	4 ¹ , 5 ²	4 ¹ , 6 ²
1200 ppm de NPAg	6 ¹ , 3 ²	6 ¹ , 3.4 ²	6 ¹ , 4.7 ² , 2 ³	4 ¹ , 5 ²	4 ¹ , 6 ²
2400 ppm de NPAg	6 ¹ , 3 ²	6 ¹ , 4 ²	6 ¹ , 4.7 ²	6 ¹ , 5.6 ² , 4 ³	2 ¹ , 6 ²
3600 ppm de NPAg	6 ¹ , 3 ²	6 ¹ , 3.6 ²	6 ¹ , 5 ² , 2 ³	4 ¹ , 5.5 ² , 2 ³	2 ¹ , 6 ²

NPAg: nanopartículas de plata; *Día de evaluación; ¹ número de frutos; ² índice de madurez promedio; ³ frutos con índice de madurez 6.

4.1.2. Color (L* c* h*)

En el análisis de comparación de medias mediante la prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$), realizado sobre dos tomas de datos de luminosidad por fruto (área verde y área madura), únicamente se observó una diferencia significativa en el día 6 en el área verde entre las frutas tratadas con 2400 y 3600 ppm de NPAg, donde la dosis más baja presentó los valores más altos (49.267) (Figura 2). En México, la norma NMX-FF-041-SCFI-2007 establece la descripción del color externo de la papaya con base en la designación de rayas y en los porcentajes de color verde, amarillo o naranja, considerando siete grados de madurez que abarcan desde la madurez fisiológica hasta la madurez de consumo, tal como señalaron Basulto et al. (2007).

En los resultados reportados por Viera et al. (2020), quienes emplearon recubrimientos en sus tratamientos a base de hidroxipropilmetilcelulosa y 0.25% de NPAg y observaron alteraciones en el color durante el almacenamiento; en el parámetro L^* , los valores obtenidos estuvieron en un intervalo de 39 a 55, lo que sugiere que dichas modificaciones se relacionaron con la presencia de tonalidades marrones en la cáscara de los frutos. De manera similar, en el trabajo realizado por García-Mateos et al. (2023), en el que evaluaron recubrimientos a base de quitosano y aceite esencial de cítricos, se observó que L^* , en el testigo y uno de sus tratamientos presentaron valores similares a los obtenidos en este estudio.

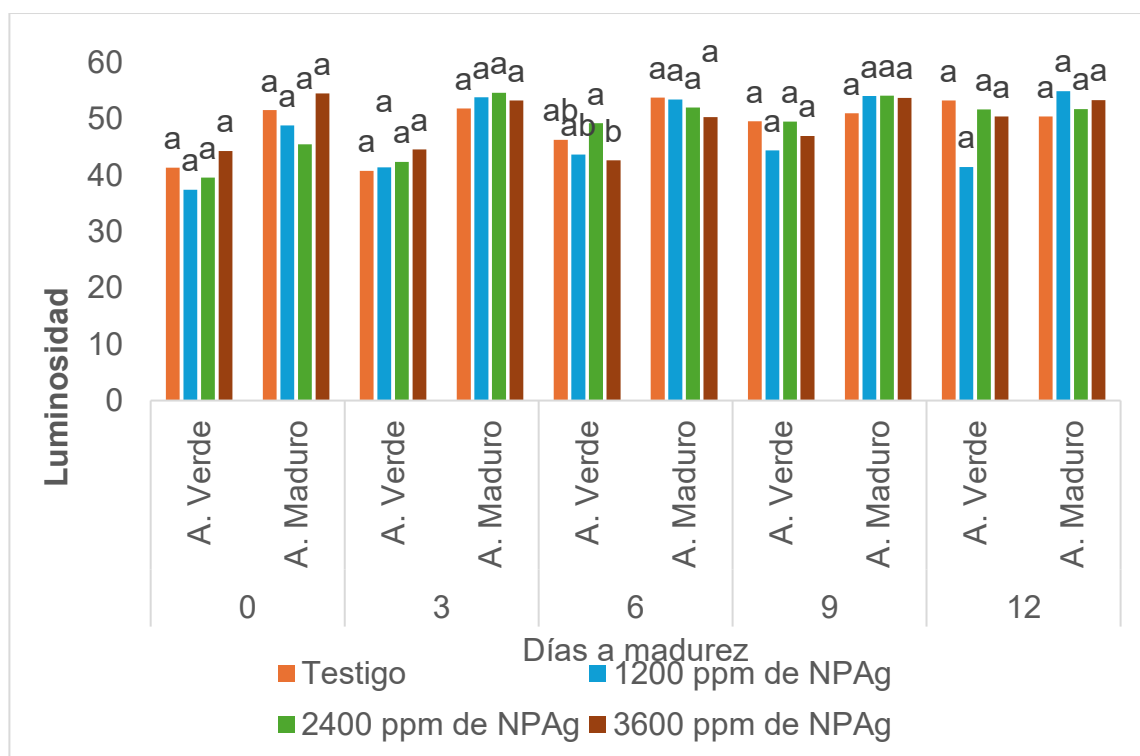


Figura 2. Comportamiento de la luminosidad (L^*) en frutos de papaya tratados con nanopartículas de plata (NPAg).

En el análisis de comparación de medias mediante la prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$), realizado sobre dos tomas de datos de croma por fruto (área verde y área madura), únicamente se observó una diferencia significativa en el día 6 en el área verde entre las frutas tratadas con 2400 y 3600 ppm de NPAg, donde la

concentración más baja presentó los valores más altos (40.628) (Figura 3). García-Mateos et al. (2023), quienes evaluaron recubrimientos a base de quitosano y aceite esencial de cítricos, se observó que en el caso de C* los frutos al día 6 presentaron valores menores a los obtenidos en este estudio (15 a 20), lo que indica que los recubrimientos utilizados en su investigación pudieron influir en una menor saturación del color en comparación con los frutos evaluados bajo las condiciones aquí estudiadas.

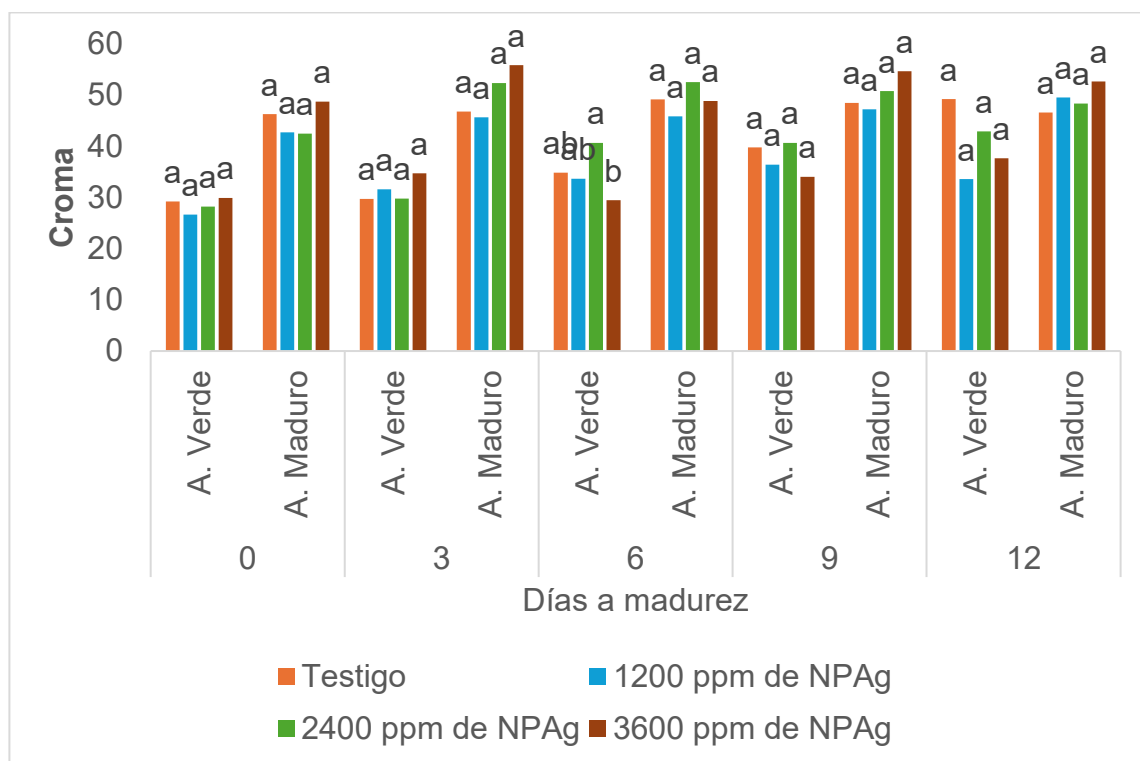


Figura 3. Comportamiento de Croma (c*) en frutos de papaya tratados con nanopartículas de plata (NPAg).

En el análisis de comparación de medias mediante la prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$), realizado sobre dos tomas de datos del ángulo hue por fruto (área verde y área madura), únicamente se observó una diferencia significativa en el día 6 en el área verde entre las frutas tratadas con 1200 y 2400 ppm de NPAg, donde la dosis más baja presentó los valores más altos (97.280) (Figura 4). Este comportamiento puede estar asociado a los procesos fisiológicos propios de la maduración, ya que durante las primeras etapas los frutos permanecen verdes

debido al alto contenido de clorofilas; sin embargo, a medida que avanza la maduración, estas se degradan por acción de la clorofilasa y se sintetizan gradualmente licopeno y β -caroteno, responsables del color amarillo-anaranjado característico del fruto (Ding et al., 2007; Shen et al., 2019). Además, Zhang et al. (2018) señalaron que las nanopartículas de plata pueden incrementar el ángulo de tono hue, ya que participan en el pardeamiento enzimático mediante reacciones entre compuestos polifenólicos y oxígeno, catalizadas por la polifenol oxidasa endógena. De manera complementaria, García-Mateos et al. (2023) reportaron que hue disminuye gradualmente durante el almacenamiento en frutos recubiertos con quitosano y aceite esencial de cítricos, lo que sugiere que los materiales empleados pueden influir en la preservación del color.

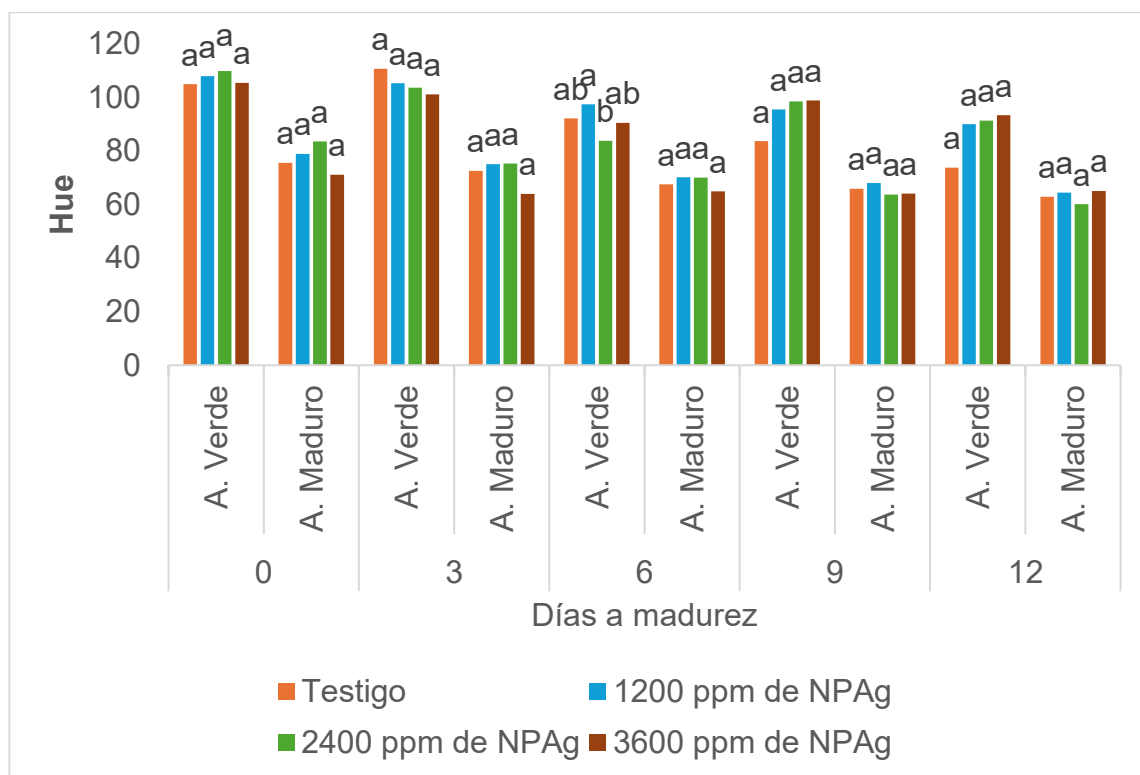


Figura 4. Comportamiento del ángulo Hue (h^*) en frutos de papaya tratados con nanopartículas de plata (NPAg).

4.1.3. Firmeza (N)

En el presente estudio se observaron diferencias estadísticamente significativas (Duncan, $\alpha = 0.05$) entre los frutos testigo y los tratados con 1200 ppm de NPAg,

con valores de 19.44 N y 15.11 N, respectivamente (Cuadro 4). Esta reducción podría deberse a que la aplicación de nanopartículas de plata a dicha concentración podría haber acelerado el ablandamiento del fruto, posiblemente al inducir alteraciones estructurales en los componentes de la pared celular.

Resultados similares fueron reportados por Li et al. (2009) en dátiles chinos, donde los recubrimientos con NPAg redujeron significativamente la firmeza, lo que indica que este tipo de nanopartículas puede afectar la integridad estructural del tejido vegetal. Mientras que García-Mateos et al. (2023) observaron en frutos de papaya valores superiores a 100 N incluso tras 10 días de almacenamiento. Estas variaciones entre estudios podrían atribuirse a diferencias en las condiciones de almacenamiento, etapa de madurez, temperatura, humedad relativa y método de evaluación, factores que influyen notablemente en la textura y en los procesos fisiológicos poscosecha.

De acuerdo con Santamaria-Basulto et al. (2009), la firmeza de un fruto de papaya en madurez de consumo debe situarse entre 4.7 y 6.9 N. En este contexto, los valores obtenidos en el presente trabajo se sitúan por encima de dicho rango, lo que indica que los frutos evaluados aún se encontraban en una etapa intermedia de maduración. En otros cultivos, Johney et al. (2014) reportaron que la aplicación de un recubrimiento de quitosano, seguido de 0.5 % de NPAg, disminuyó de manera más efectiva la firmeza del jitomate en comparación con otros tratamientos. Sin embargo, Vieira et al. (2020) señalaron que los recubrimientos de hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC) con 0.25 % de NPAg no modificaron los procesos de maduración de los frutos de papaya durante el almacenamiento. Estas diferencias en la respuesta a las NPAg pueden deberse al tipo de recubrimiento utilizado, a la concentración de NPAg aplicada y a las características fisiológicas de cada fruto.

Conforme a lo propuesto por Ghai et al. (2016), la pérdida de firmeza está relacionada con la degradación enzimática de la pared celular, especialmente por modificaciones en la estructura de las pectinas y las hemicelulosas, así como por la influencia de factores externos como la temperatura, la humedad relativa y el

manejo poscosecha. De acuerdo con Triyono et al. (2019), los iones de plata provenientes de las fuentes utilizadas, ya sea nanopartículas o nitrato de plata, inhiben la formación de ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC), lo que reduce la síntesis de etileno y, por tanto, retrasa el proceso de maduración; al inhibirse este proceso también se inhibe la degradación de la protopectina a pectina soluble en agua, lo que resulta en un aumento estable de la firmeza del fruto.

Cuadro 4. Comparación de medias de la firmeza en frutos de papaya tratados con nanopartículas de plata (NPAg).

TRATAMIENTOS	FIRMEZA (N)
Testigo	19.44 a
1200 ppm de NPAg	15.11 b
2400 ppm de NPAg	18.27 ab
3600 ppm de NPAg	16.48 ab
C.V.	11.82 %

Valores con la misma letra en la misma columna no presentan diferencias estadísticamente significativas (Duncan, $\alpha=0.05\%$); C. V.: coeficiente de variación; N: newtons.

4.2. VARIABLES QUÍMICAS

4.2.1. Sólidos solubles totales (°Brix)

En este estudio, no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (Duncan, $\alpha = 0.05$); sin embargo, los frutos tratados con 2400 ppm de NPAg presentaron el valor más alto de sólidos solubles totales (12.03 °Brix) en comparación con los demás tratamientos (Cuadro 5), lo que coincide con los valores reportados en la literatura para la papaya 'Golden', donde el incremento de sólidos solubles totales se asocia con la hidrólisis del almidón durante el proceso de maduración (Zuhair et al., 2013; Pê et al., 2015). Sin embargo, el aumento de °Brix puede deberse a la degradación de la pared celular o de otros polisacáridos presentes en la fruta, además de que las nanopartículas de plata (NPAg) resultan eficaces para retardar el proceso metabólico y la permeación de oxígeno (Shahat et al., 2020). De manera similar, Hernández-Madrigal et al. (2020) evaluaron dos estados de madurez en frutos de papaya, reportando valores de °Brix equivalentes a los del estado de madurez completa.

Las variaciones observadas entre estudios pueden atribuirse a diferencias en el manejo nutricional, las condiciones poscosecha y los procedimientos de muestreo durante la evaluación. En investigaciones realizadas con mandarinas Kinnow, se observó un aumento gradual del contenido de °Brix durante el almacenamiento; sin embargo, los frutos testigo mantenidos a 4 °C y 10 °C presentaron valores más altos que los frutos tratados, lo que sugirió que la barrera proporcionada por los recubrimientos puede reducir la tasa de respiración y la pérdida de agua (Shah et al., 2015). Además, Cervantes Rubio (2017) señaló que durante la maduración el contenido de glucosa, fructosa y sacarosa tiende a aumentar, fenómeno atribuido en particular a la acumulación de sacarosa y al incremento de la actividad de las enzimas sacarosa sintasa y sacarosa fosfato sintasa.

4.2.2. Acidez titulable (% de ácido cítrico)

En el presente trabajo no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (Duncan, $\alpha = 0.05$); sin embargo, en el tratamiento con 1200 ppm de NPAg se presentó el valor más alto de acidez (0.10 %), lo que se destacó visualmente frente a los demás tratamientos (Cuadro 5). En comparación con lo reportado por Hernández-Madrigal et al. (2020), quienes evaluaron dos estados de madurez, los valores de acidez obtenidos en el estado completamente maduro fueron inferiores a los observados en este estudio. Esta diferencia podría atribuirse a la variación en el estado fisiológico de los frutos al momento del análisis, así como a las condiciones de manejo pre y poscosecha. Por su parte, Trigo et al. (2012), observaron un incremento de la acidez con el tiempo, atribuido a los procesos metabólicos asociados a la maduración y la senescencia de frutos climatéricos. Por otro lado, Gmail et al. (2023) reportaron que las mandarinas recubiertas con cera y 100 ppm de NPAg presentaron mayor acidez que los demás tratamientos, mientras que la reducción de ácidos en las frutas recubiertas se asocia con la ralentización de los procesos metabólicos (Aşik & Candoğan, 2014). De forma complementaria, Shah et al. (2015) señalaron que mandarinas Kinnow almacenadas a 10 °C mostraron efectos significativos en la acidez titulable, probablemente debido a la disminución en la

tasa de respiración y a los procesos metabólicos que convierten el ácido cítrico en azúcares, compuestos que representan uno de los principales contribuyentes a la acidez característica de estas frutas (Cancalon & Xu, 2002).

4.2.3. Vitamina C (mg vitamina C·g⁻¹ PF)

En el presente trabajo se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos 1200 y 2400 ppm de NPAg, que presentaron el mayor contenido de vitamina C 20.81 mg100 g⁻¹ y 15.63 mg100 g⁻¹, respectivamente (Cuadro 5). En concordancia, Shah et al. (2015) encontraron que las frutas Kinnow recubiertas con NPAg y almacenadas a 4 °C presentaron un aumento de la concentración de ácido ascórbico, asociado al estrés abiótico inducido por el recubrimiento con NPAg que puede estimular la síntesis de algunos metabolitos antioxidantes, incluida la regeneración del ácido ascórbico. Por otra parte, Hernández-Madrigal et al. (2020) señalaron que en la evaluación dos estados de madurez de frutas completamente maduras, la concentración de vitamina C alcanzó valores más altos (57.1 mg 100 g⁻¹), incluso sin aplicación de NPAg; por lo que estas diferencias pueden atribuirse al estado de madurez de los frutos, así como a las condiciones de almacenamiento y manejo poscosecha, factores que influyen en la degradación del ácido ascórbico. Asimismo, Gemail et al. (2023) indicaron que las nanopartículas de plata (NPAg), combinadas con recubrimientos y almacenamiento en frío, favorecen la conservación de la vitamina C en mandarinas, dado que la disminución del ácido ascórbico se pudo deber a que este se degrada fácilmente ante condiciones ambientales como la luz, el oxígeno, el pH y la temperatura (Badui, 2006). De manera similar, An et al. (2008) observaron una menor pérdida de ácido ascórbico en espárragos tratados con recubrimientos de NPAg en comparación con el control, lo que refuerza el efecto protector de las nanopartículas frente a la oxidación. Cuando se inhibe la maduración, también se inhibe la producción de vitamina C, ya que el ión Ag⁺ de las nanopartículas inhibe la acción de la enzima ACC sintasa, lo que disminuye la producción de etileno, ya que el ACC es el principal precursor en su biosíntesis, por lo tanto, algunas hormonas de maduración pueden inhibirse, de este modo,

se inhibe el proceso de maduración y se suprime la síntesis de vitamina C (Triyono et al., 2019).

Cuadro 5. Comparación de medias de variables químicas en frutos de papaya tratados con nanopartículas de plata (NPAg).

TRATAMIENTOS	°BRIX	ATT (%)	mg Vit. C·100 g ⁻¹
Testigo	11.53 a	0.09 a	18.41 ab
1200 ppm de NPAg	11.06 a	0.10 a	20.81 a
2400 ppm de NPAg	12.03 a	0.04 a	15.63 b
3600 ppm de NPAg	11.73 a	0.06 a	17.21 ab
C.V.	13.06 %	39.94 %	13.85 %

Valores con la misma letra en la misma columna no presentan diferencias estadísticamente significativas (Duncan, $\alpha=0.05\%$); C. V: Coeficiente de variación; ATT: Acidez Titulable; mg: miligramos; Vit. C: Vitamina C.

4.2.4. Actividad antioxidante ($\mu\text{M ET100g}^{-1}$ PF)

En cuanto a la actividad antioxidante, se observaron diferencias estadísticas (Duncan, $\alpha = 0.05$) entre el testigo y los tratamientos con aplicaciones de NPAg, donde los frutos testigo presentaron el mayor contenido de actividad antioxidante ($106.15 \mu\text{M}$) (Cuadro 6). Este comportamiento difiere con lo reportado por Shah et al. (2015) quienes encontraron que los frutos tratados con recubrimiento de NPAg a base de carboximetilcelulosa y goma guar-Ag a 4°C produjeron un aumento significativo de la actividad antioxidante, aunque después de 104 días de almacenamiento disminuye, por lo que atribuyen que probablemente se debe a la degradación del ácido ascórbico. De manera similar, Gemail et al. (2023) reportan que, al almacenar mandarinas durante dos meses con recubrimiento a base de cera y 100 ppm de NPAg, se favoreció una mayor actividad antioxidante, pero a los cuatro meses esta disminuyó. Lo anterior sugiere que la eficacia de las NPAg puede verse influenciada por recubrimientos que mantienen la calidad de los frutos y retrasan la actividad de la catalasa y de los antioxidantes (Njombolwana et al., 2013).

4.2.5. Fenoles totales (mg EAG 100g⁻¹ PF)

La concentración de fenoles totales mostró diferencias estadísticas (Duncan, $\alpha = 0.05$) entre los frutos tratados con 1200 ppm de NPAG y el testigo (55.88 mg y 40.93 mg, respectivamente) (Cuadro 6). Esto sugiere que las NPAG a dicha concentración son eficaces, ya que inducen un nivel de estrés adecuado que favorece la producción de fenoles. Shah et al. (2015) señalaron que el almacenamiento a 4 °C de frutos de Kinnow recubiertos con NPAG genera estrés que estimula la producción de metabolitos primarios y secundarios, aumentando los niveles de compuestos fenólicos. Esto puede explicarse considerando que la concentración de compuestos fenólicos está influenciada por el estrés biótico y abiótico en las condiciones previas y posteriores a la cosecha (Podsędek, 2007).

De manera similar, Moazzami Farida et al. (2020), en su estudio sobre salvia, observaron que la aplicación de NPAG a 100 mg·L⁻¹ incrementó los fenoles totales, los autores destacaron que las NPAG inducen positivamente la actividad de la enzima fenilalanina amonio liasa (PAL), que cataliza la conversión del aminoácido fenilalanina en precursores de diversos compuestos fenólicos, incrementando así su concentración en el tejido vegetal.

4.2.6. Carotenoides (µg·g⁻¹ PF)

En cuanto a los carotenoides, no se observaron diferencias estadísticas (Duncan, $\alpha = 0.05$) entre los tratamientos, con valores que oscilaron entre 68 y 115 µg·g⁻¹ PF (Cuadro 6). En este experimento no se observó el efecto que se observó cuando se aplican las NPAG en brotes vegetativos de papa, que a 20 mg/L redujeron la concentración de carotenoides (Bagherzadeh Homaei & Ehsanpour, 2015). Por otro lado, estudios en chabacanos recubiertos con glicerol y nanopartículas de plata (250 y 500 ppm), ya sea a temperatura ambiente o a 6 °C, mostraron que el contenido de carotenoides fue mayor en los frutos tratados que en el testigo, lo que evidencia que las NPAG pueden favorecer la acumulación de estos compuestos bajo ciertas condiciones (Shahat et al., 2020). Esto puede relacionarse con lo señalado por Barreto et al. (2011), quienes indicaron que una disminución de etileno en la atmósfera circundante del fruto puede afectar la

actividad de la fitoenosintasa (PSY) y de la fitoendosaturasa (PDS), lo que, a su vez, disminuye la síntesis de carotenoides.

Cuadro 6. Comparación de medias de variables químicas en frutos de papaya tratados con nanopartículas de plata (NPAg).

TRATAMIENTOS	AA $\mu\text{M ET } 100 \text{ g}^{-1}$ PF	FT mg EAG 100 g^{-1} PF	C $\mu\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$ PF
Testigo	106.15 a	40.93 b	103.43 a
1200 ppm de NPAg	102.65 b	55.88 a	68.58 a
2400 ppm de NPAg	101.64 b	43.92 ab	94.53 a
3600 ppm de NPAg	102.93 b	49.21 ab	115.93 a
C.V.	1.01 %	14.29 %	33.06 %

Valores con la misma letra en la misma columna no presentan diferencias estadísticamente significativas (Duncan, $\alpha=0.05\%$); C. V.: Coeficiente de variación; AA: Actividad Antioxidante; μM : Micromoles; FT: Fenoles Totales; EAG: Extracto de Ácido Gálico; C: Carotenoides; μg : microgramos; PF: Peso fresco.

4.2.7. ANÁLISIS PROXIMAL

4.2.7.1. Humedad PF

La humedad de los frutos mostró diferencias estadísticas (Duncan, $\alpha = 0.05$) entre los tratamientos con 1200 ppm y 3600 ppm de NPAg, con valores de 83.62 % y 79.81 %, respectivamente (Cuadro 7). Estos resultados sugieren que las nanopartículas de plata, aun sin recubrimiento, son capaces de retardar la pérdida de humedad en los frutos durante el almacenamiento. El efecto fue más evidente a la concentración más baja (1200 ppm), sin embargo, a mayor concentración de NPAg disminuye la humedad y, por ende, en la calidad poscosecha de los frutos. En el estudio realizado por Hernández-Madrigal et al. (2020), donde se evaluaron compuestos bioactivos, se reportaron valores de humedad de 88.3 %, superiores a los obtenidos en este trabajo. En contraste con otros autores que han realizado evaluaciones fisicoquímicas, nutricionales y sensoriales de estados de madurez e incluso entre variedades reportan porcentajes aún mayores (89.21 %, 90.21 % y 90.857 %; Chukwuka et al. (2013); Maisarah et al. (2014); Mulate & Masresha, 2020) sin aplicar NPAg. En conjunto, estas comparaciones podrían sugerir que las nanopartículas de plata no

necesariamente garantizan la conservación de la humedad del fruto. No obstante, las diferencias observadas también podrían estar influidas por la variedad empleada y por las condiciones específicas de manejo y almacenamiento de los frutos en cada estudio.

4.2.7.2. Materia seca PF

Los tratamientos que mostraron diferencias estadísticas en materia seca (Duncan, $\alpha = 0.05$) fueron 1200 ppm y 3600 ppm de NPAg, con valores de 16.37 y 20.18 %, respectivamente (Cuadro 7). Considerando estos resultados, se puede inferir que la concentración de 1200 ppm de NPAg es más efectiva para la conservación de la fruta, ya que un menor porcentaje de materia seca implica una menor pérdida de humedad, lo que favorece que el fruto mantenga su jugosidad al momento del consumo. Diversos autores han reportado valores de materia seca inferiores a los obtenidos en este estudio, por ejemplo, Mulate & Masresha (2020) informan 9.14 %, Maisarah et al. (2014) registran 9.79 %, y Chukwuka et al. (2013) reportaron 10.79 %. De igual manera, Hernández-Madrigal et al. (2020) documentan 11.7 %. Todos esos valores son menores que los encontrados en el presente trabajo, lo que podría indicar que las NPAg influyen en la pérdida de agua, lo cual está relacionado con la cantidad de materia seca. No obstante, estas variaciones también podrían estar relacionadas con las diferencias entre variedades, las condiciones ambientales, el manejo poscosecha y las metodologías empleadas en cada estudio.

4.2.7.3. Cenizas (% PS)

Las cenizas cuantifican el contenido mineral de los frutos. El tratamiento con 1200 ppm de NPAg (6.403 %) fue mayor y mostró diferencias estadísticas (Duncan, $\alpha = 0.05$) respecto a los frutos tratados con 2400 y 3600 ppm de NPAg (4.014 y 4.113 %, respectivamente) (Cuadro 7). Este incremento podría sugerir que, al presentar un porcentaje mayor, los frutos de este tratamiento podrían contener más elementos minerales, tanto nutritivos como no nutritivos, que los de otros tratamientos, lo que podría influir en la calidad y la composición del fruto. Valores similares han sido reportados por Maisarah et al. (2014), quienes obtuvieron

6.429 %, y por Mulate & Masresha (2020), quienes obtuvieron 5.30 % en pulpa de papaya. No obstante, otros autores han documentado valores distintos; tal es el caso de Hernández-Madrigal et al. (2020), quienes registraron 9.55 %, mientras que Chukwuka et al. (2013) reportaron 3.17 %. Estas variaciones mencionadas por los diferentes autores podrían deberse a diferencias en la variedad utilizada, las condiciones de cultivo, el manejo poscosecha o los métodos analíticos empleados.

4.2.7.4. Materia orgánica (% bs)

En el contenido de materia orgánica que cuantifica el contenido de carbohidratos, proteínas y lípidos presentes en los frutos, se observaron diferencias estadísticas (Duncan, $\alpha = 0.05$) entre los frutos tratados, donde la concentración de 1200 ppm registró un valor de 93.596 %, menor que los de 2400 ppm (95.985 %) y 3600 ppm (95.886 %), los cuales presentaron valores más altos (Cuadro 7) . Estos valores reflejan la calidad nutricional de los frutos, ya que los tratamientos con mayor materia orgánica se asocian con contenidos más altos de carbohidratos, proteínas, lípidos y vitaminas, como lo señaló de Pro (1979). Valores similares fueron reportados por Maisarah et al. (2014), Mulate y Masresha (2020) y Chukwuka et al. (2013), quienes obtuvieron 93.57 %, 94.69 % y 96.82 %, respectivamente; mientras que Hernández-Madrigal et al. (2020) informaron porcentajes menores (90.44 %). Lo obtenido en este estudio se encuentra dentro del rango observado en otros estudios, lo que sugiere que las NPAg posiblemente no afectan el contenido de materia orgánica, ya que no superaron al testigo.

Cuadro 7. Comparación de medias de variables de análisis proximal de frutos de papaya tratados con nanopartículas de plata (NPAg).

TRATAMIENTOS	H, PF	MS, PF	CENIZAS, (%) PS	MO, (%) PS
Testigo	81.91 ab	18.08 ab	4.87 ab	95.12 ab
1200 ppm de NPAg	83.62 a	16.37 b	6.40 a	93.59 b
2400 ppm de NPAg	81.04 ab	18.95 ab	4.01 b	95.98 a
3600 ppm de NPAg	79.81 b	20.18 a	4.11 b	95.88 a
C.V.	1.91 %	8.49 %	17.03 %	0.86 %

Valores con la misma letra en la misma columna no presentan diferencias estadísticamente significativas (Duncan, $\alpha=0.05\%$); C. V.: Coeficiente de variación; H: Humedad; PF: Peso fresco; MS: Materia Seca; PS: Peso seco; MO: Materia Orgánica.

4.2.7.5. Proteína cruda (% PS)

En el contenido de proteína cruda no se observaron diferencias estadísticas (Duncan, $\alpha = 0.05$) entre tratamientos (valores entre 5.90 y 8.50 %) (Cuadro 8), lo que sugiere que la aplicación de las nanopartículas no modificó el contenido proteico de los frutos. Los valores obtenidos coinciden con lo reportado por Mulate y Masresha (2020), quienes encontraron 9.92 % de proteína cruda, así como con los datos de Maisarah et al. (2014), que registraron 6.761 %, y de Hernández-Madrigal et al. (2020), que registraron 5.04 %. Lo cual muestra que, pese a las diferencias entre los estudios, los porcentajes obtenidos en la presente investigación se sitúan dentro del rango descrito por la literatura. Además, Gapper et al. (2013) mencionaron que durante la senescencia de los frutos la síntesis de carbohidratos cesa y se da lugar a la degradación de proteínas, lo cual no coincide con lo obtenido en el presente estudio.

4.2.7.6. Extracto etéreo (% PF)

Los valores de extracto etéreo, que cuantifican el contenido de lípidos, mostraron diferencias estadísticas (Duncan, $\alpha = 0.05$) encontrando que los frutos tratados con 2400 ppm (0.827 %) y 3600 ppm (0.847 %) de NPAg presentaron los valores más altos, diferenciándose del testigo (0.380 %) y del tratamiento con 1200 ppm (0.392 %), que mostraron los valores más bajos (Cuadro 8). En plántulas de nabo Thiruvengadam et al. (2015), indicaron que su exposición a alta concentración de NPAg causó un aumento de la peroxidación lipídica, lo que sugiere que la exposición a NPAg genera estrés oxidativo, efecto que no sucedió en este trabajo. En cuanto a lo publicado por otros autores del contenido de EET sin la aplicación de NPAg en papaya, los valores coinciden (0.392 %) con los frutos tratados con 1200 ppm (Chukwuka et al., 2013).

4.2.7.7. Fibra cruda (% PS)

En cuanto a la fibra cruda, compuesta por carbohidratos estructurales, como celulosa, hemicelulosa y otro compuesto no carbohidrato como la lignina (de Pro, 1979), no se observaron diferencias estadísticas (Duncan, $\alpha = 0.05$) con valores de 5.18 y 7.17 % entre tratamientos (Cuadro 8). En estudios previos se han reportado valores similares en fibra cruda de frutos de papaya sin NPAg: 8.424 %, 8.006 % y 6.927 % (Maisarah et al. 2014; Mulate & Masresha, 2020; Chukwuka et al., 2013), lo que indicó que los resultados obtenidos en este estudio se encontraron dentro del intervalo documentado en la literatura para papaya sin efecto por parte de las NPAg.

4.2.7.8. Extracto libre de nitrógeno (ELN, % PF)

El extracto libre de nitrógeno, que cuantifica el contenido energético (azúcares y almidones), se observaron diferencias significativas (Duncan, $\alpha = 0.05$) entre los frutos tratados con 3600 y 1200 ppm de NPAg (83.517 y 78.020 %) con el valor más alto a mayor concentración (Cuadro 8). El ion plata es un inhibidor de la acción del etileno, lo que provoca una disminución de los procesos de maduración y senescencia, por lo tanto, la conversión de almidón a azúcares simples disminuye, lo cual en el presente estudio no se observó ya que a mayor concentración de NPAg se encontró menor concentración de ELN (Taiz & Zeiger, 2006; Knee, 1995; Hiwasa & Ezura, 2014).

Cuadro 8. Comparación de medias de variables de análisis proximal de frutos de papaya tratados con nanopartículas de plata (NPAg).

TRATAMIENTOS	PC, (%) PS	ET, (%) PS	FC, (%) PS	ELN, (%) PF
Testigo	8.50 a	0.38 b	5.18 a	81.04 ab
1200 ppm de NPAg	8.01 a	0.39 b	7.17 a	78.02 b
2400 ppm de NPAg	5.91 a	0.82 a	6.43 a	82.80 ab
3600 ppm de NPAg	5.90 a	0.84 a	5.61 a	83.51 a
C.V.	19.67 %	12.98 %	20.08 %	3.19 %

Valores con la misma letra en la misma columna no presentan diferencias estadísticamente significativas (Duncan, $\alpha=0.05\%$); C. V.: Coeficiente de variación; PS: peso seco; PF: peso fresco; PC: Proteína Cruda; ET: Extracto Etéreo; FC: Fibra Cruda; ELN: Extracto Libre de Nitrógeno.

4.2.8. ANÁLISIS DE VAN SOEST

4.2.8.1. Fibra detergente neutro, fibra detergente ácido y celulosa (% PS)

La cuantificación de estas variables se basa en el contenido de fibras solubles e insolubles de los frutos. Se observaron diferencias estadísticas (Duncan, $\alpha = 0.05$) entre los tratamientos, destacando la dosis de 1200 ppm de NPAg, que presentó el valor más alto de FDN (24.04 %), FDA (10.85 %) y celulosa (10.28 %) mientras que el testigo y los tratamientos con 2400 y 3600 ppm mostraron valores significativamente menores (Cuadro 9). En aguacate, Nasr y Soliman (2024) mencionan que el etileno es un inhibidor del transporte de auxinas y motiva la síntesis de enzimas de hidrólisis como la poligalacturonasa, la celulasa y la pectinmetilesterasa que degradan las paredes celulares en el área de desprendimiento del tallo de frutos.

Cuadro 9. Comparación de medias de variables de análisis de Van Soest de frutos de papaya tratados con nanopartículas de plata (NPAg).

TRATAMIENTOS	FDN, (%) PS	FDA, (%) PS	Cel, (%) PS
Testigo	12.38 b	7.74 b	7.67 b
1200 ppm de NPAg	24.04 a	10.85 a	10.28 a
2400 ppm de NPAg	13.78 b	7.66 b	7.83 b
3600 ppm de NPAg	10.81 b	6.74 b	6.99 b
C.V.	20.42 %	17.80 %	14.75 %

Valores con la misma letra en la misma columna no presentan diferencias estadísticamente significativas (Duncan, $\alpha=0.05\%$); C. V.: Coeficiente de variación; PS: peso seco; FDN: Fibra Detergente Neutro; FDA: Fibra Detergente Ácido; Cel: Celulosa.

4.2.8.2. Sílice (% PS)

Se observaron diferencias estadísticas (Duncan, $\alpha = 0.05$) entre los tratamientos, siendo el tratamiento con 1200 ppm de NPAg el que generó el valor más bajo de sílice (0.13 %), mientras que el testigo y los tratamientos con 2400 y 3600 ppm registraron valores más altos (0.32 %, 0.28 % y 0.27 %, respectivamente) (Cuadro 10). La deposición de sílice se da por medio de los fotolitos en la pared celular que añaden resistencia mecánica e influyen en las propiedades físicas del fruto, lo que sugiere que la concentración de 1200 ppm no fue favorable en la

deposición del sílice, lo que se ve reflejado en la disminución de firmeza en el fruto (Cuadro 3) (Epstein, 1999).

4.2.8.3. Lignina (% PS)

En cuanto a lignina, también se observaron diferencias estadísticas (Duncan, $\alpha = 0.05$), destacando nuevamente el tratamiento con 1200 ppm de NPAg, en el que se presentó el valor más bajo (0.138 %), en comparación con el testigo y los tratamientos con 2400 y 3600 ppm (0.321 %, 0.288 % y 0.271 %, respectivamente) (Cuadro 10). La lignina se encuentra en las paredes secundarias de la célula; las características de éstas son diferentes entre las paredes celulares, los tejidos y los órganos de la planta. Lo que sugiere que la concentración de 1200 ppm favoreció la degradación de lignina, lo que, parecido al sílice, disminuye la firmeza del fruto (Salisbury & Ross, 2000; Grabber et al., 2004).

4.2.8.4. Hemicelulosa (% bs)

La hemicelulosa es uno de los polímeros estructurales de la pared secundaria de la célula con mayor proporción en la pulpa del fruto (Scheller & Ulvskov, 2010). Contrariamente al comportamiento encontrado en sílice y lignina, la hemicelulosa mostró un incremento en el tratamiento de 1200 ppm de NPAg con un valor de 13.19%, significativamente superior al del testigo y a los tratamientos con 2400 y 3600 ppm (4.63 %, 6.12 % y 4.07 %, respectivamente) (Cuadro 10). Lo que no concordó con los datos de sílice y lignina donde se esperaría una reducción.

Cuadro 10. Comparación de medias de variables de análisis de Van Soest de frutos de papaya tratados con nanopartículas de plata (NPAg).

TRATAMIENTOS	Sí, (%) PS	Lig, (%) PS	Hem, (%) PS
Testigo	0.32 a	0.32 a	4.63 b
1200 ppm de NPAg	0.13 b	0.13 b	13.19 a
2400 ppm de NPAg	0.28 a	0.28 a	6.12 b
3600 ppm de NPAg	0.27 a	0.27 a	4.07 b
C.V.	19.83 %	19.83 %	32.21 %

Valores con la misma letra en la misma columna no presentan diferencias estadísticamente significativas (Duncan, $\alpha=0.05\%$); C. V.: Coeficiente de variación; PS: peso seco; Sí: Sílice; Lig: Lignina; Hem: Hemicelulosa.

4.2.9. DETERMINACIÓN DE PLATA

El análisis realizado no reportó toxicidad en pulpa ni en semilla en ninguno de los frutos tratados; sin embargo, es importante tener en cuenta que las nanopartículas de plata pueden ser nocivas para la salud si no se respeta que la concentración del ion plata no supere el límite de migración específica de 0.05 mg Ag kg⁻¹ de alimento establecido por la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSAANS Panel, 2016). Becaro et al. (2016) en un estudio indicaron que la incorporación de NPAg en una película de polietileno de baja densidad para envasar zanahorias frescas cortadas no detectó trazas de plata (inferiores a 10 ppb). Por su parte, Martínez-Molina et al. (2022) reportan que las nanopartículas migraron del recubrimiento a la pulpa de la fruta, con un valor de 0.373 ± 0.13 mg Ag kg⁻¹, lo cual coincidió con Pezzuto et al. (2015), quienes reportaron que la plata migró de películas preformadas sintéticas al queso almacenado durante 24 días, con una concentración de 0.103 mg Ag kg⁻¹.

4.2.10. VARIABLES FISIOLÓGICAS

4.2.10.1. Pérdida de peso (%)

Se realizaron tomas de datos los días 3, 6, 9 y 12 para evaluar la pérdida de peso de las frutas testigo y de las tratadas con NPAg. Se observó una diferencia estadística (Duncan, $\alpha = 0.05$) únicamente en la dosis más alta (3600 ppm) frente a las frutas testigo; específicamente, en la primera toma de datos (día 3), los valores fueron de 2.603 % y 1.925 %, respectivamente (Cuadro 11). Se podría sugerir que las concentraciones bajas y moderadas de NPAg no tuvieron un efecto notable sobre la pérdida de peso.

En estudios realizados con jitomates Cherry, las NPAg redujeron gradualmente la pérdida de peso, siendo más efectivas las extraídas de síntesis verde que las químicas, con pérdidas de alrededor del 3 % a los 15 días (Gao et al., 2017). En mandarinas, los tratamientos con NPAg, ya sean solos o combinados con cera y almacenamiento en frío, se retardó la maduración en comparación con los frutos recubiertos sin NPAg (Gemail et al., 2023). De manera similar, mandarinas 'Kinnow' recubiertas con NPAg a base de carboximetilcelulosa y goma guar, y

almacenadas a 4 °C, presentaron una menor pérdida de peso (Shah et al., 2015). En manzanas, Pardo et al. (2022) observaron que los frutos conservaron el peso inicial después de 30 días de almacenamiento con recubrimiento y NPAg, mientras que An et al. (2008) y Li et al. (2009) indicaron menor pérdida de peso en espárragos y dátiles tratados con NPAg, atribuyendo este efecto a sus propiedades como barrera contra el agua. Sin embargo, en algunos trabajos, como el de Martínez-Molina et al. (2022), no se encontraron diferencias entre los tratamientos con y sin NPAg en papaya, lo que sugiere que la naturaleza hidrofílica del alginato y la elevada permeabilidad al vapor de agua de las películas podrían limitar su efecto. Resultados similares fueron reportados por Viera et al. (2020), señala que la pérdida de peso no se relaciona directamente con la aplicación de NPAg; no obstante, Bordenave et al. (2010) señalaron que las NPAg forman una capa superficial que disminuyó la salida de vapor de agua y la transpiración, aunque Lieu et al. (2024) advierten que la permeabilidad al vapor, la solubilidad en agua y el contenido de humedad del recubrimiento pueden variar según los componentes químicos y la concentración de NPAg. Durante la maduración, los cambios en la transpiración y la respiración de los frutos se asocian directamente con la pérdida de peso, lo que afecta la calidad y la vida útil durante el almacenamiento (Cosme Silva et al., 2017). En nuestro trabajo, estos factores pudieron contribuir a que las concentraciones de 1200 y 2400 ppm de NPAg no generaran diferencias en la pérdida de peso, lo cual coincide con lo reportado por algunos autores.

Cuadro 11. Comparación de las medias de pérdida de peso (%) de frutos de papaya tratados con nanopartículas de plata (NPAg).

TRATAMIENTOS	3	6	9	12
Testigo	1.92 b	4.74 a	6.93 a	10.11 a
1200 ppm de NPAg	2.12 ab	5.50 a	8.14 a	12.07 a
2400 ppm de NPAg	2.31 ab	5.95 a	9.24 a	13.13 a
3600 ppm de NPAg	2.60 a	6.31 a	8.43 a	12.26 a
C.V.	14.29 %	14.49 %	12.36 %	13.61 %

Valores con la misma letra en la misma columna no presentan diferencias estadísticamente significativas (Duncan, $\alpha=0.05\%$); C.V.: coeficiente de variación; 3, 6, 9 y 12: días después del inicio del estudio.

5. CONCLUSIONES

En los frutos de papaya tratados con 1200 ppm de NPAg se redujo considerablemente la firmeza, el contenido de sílice y lignina. Aumentó el contenido de vitamina C, así como de fenoles totales, humedad, cenizas, fibra detergente neutro, fibra detergente ácido, celulosa y hemicelulosa en frutos de papaya y aumentó el ángulo Hue.

El efecto de 2400 ppm de nanopartículas de plata de frutos de papaya con índice de madurez 6 fueron, incrementó los valores de luminosidad e intensidad de color de la cáscara y elevó el contenido de materia orgánica en frutos de papaya.

Los frutos tratados con la mayor concentración (3600 ppm) de nanopartículas de plata presentaron el porcentaje más alto de extracto etéreo y extracto libre de nitrógeno y se obtuvo la mayor pérdida de peso en los frutos de papaya.

Las frutas no mostraron toxicidad por las dosis de nanopartículas de plata utilizadas, resultando seguras para su uso en estudios posteriores.

6. LITERATURA CITADA

- An, J., Zhang, M., Wang, S., & Tang, J. (2008). Physical, chemical and microbiological changes in stored green asparagus spears as affected by coating of silver nanoparticles-PVP. *LWT - Food Science and Technology*, 41(6), 1100–1107.
- Antunes Carvalho, F., & Renner, S. S. (2015). IV. A dated phylogeny of the papaya family (Caricaceae) reveals the crop's closest relatives and the family's biogeographic history. In *Molecular phylogeny, biogeography and an e-monograph of the papaya family (Caricaceae) as an example of taxonomy in the electronic age* (pp. 49–81). Springer.
- AOAC International. (1990). *Métodos oficiales de análisis de la AOAC* (15.^a ed.). Asociación de Químicos Analíticos Oficiales.
- AOAC International. (2016). *Official methods of analysis of AOAC International* (20th ed.). AOAC International.
- Aşık, E., & Candoğan, K. (2014). Chitosan coatings with garlic oil on shrimp. *Journal of Food Quality*, 37, 237–246. <https://doi.org/10.1111/jfq.12088>
- Azcón-Bieto, J., & Talón, M. (Eds.). (2008). *Fundamentos de fisiología vegetal* (2.^a ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Badillo, V. M. (2000). Carica L. vs. Vasconcellea St. Hil. (Caricaceae) con la rehabilitación de este último. *Ernstia*, 10, 74–79.
- Bagherzadeh Homaei, M., & Ehsanpour, A. A. (2015). Physiological and biochemical responses of potato (*Solanum tuberosum*) to silver nanoparticles and silver nitrate treatments under *in vitro* conditions. *Indian Journal of Plant Physiology*, 20(4), 353–359. <https://doi.org/10.1007/s40502-015-0188-x>
- Barragán-Iglesias, J., Méndez-Lagunas, L. L., & Rodríguez-Ramírez, J. (2018). Ripeness indexes and physicochemical changes of papaya (*Carica papaya* L. cv. Maradol) during ripening on-tree. *Scientia Horticulturae*, 236, 272–278.
- Barreto, G. P. M., Fabi, J. P., De Rosso, V. V., Cordenunsi, B. R., Lajolo, F. M., do Nascimento, J. R. O., & Mercadante, A. Z. (2011). Influence of ethylene on carotenoid biosynthesis during papaya postharvesting ripening. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24, 620–624. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2011.02.006>
- Basulto, F. S., Duch, E. S., Espadas, F., Plaza, R. D., & Saavedra, A. L. (2007). Índices de maduración y cosecha de papaya Maradol. *V Congreso Iberoamericano de Tecnología postcosecha y Agroexportaciones* (pp. 1093–1102). Universidad Politécnica de Cartagena.
- Becaro, A. M., dos Santos, M. C., & Yamashita, F. (2016). Postharvest quality of fresh cut carrots packaged in plastic films containing silver nanoparticles. *Food and Bioprocess Technology*, 9(4), 637–649. <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1691-1>

- Benacchio, S. S. (1982). *Algunas exigencias agroecológicas en 58 especies de cultivo con potencial de producción en el trópico americano*. FONAIAP.
- Bordenave, N., Grelier, S., & Coma, V. (2010). Hydrophobization and antimicrobial activity of chitosan and paper-based packaging material. *Biomacromolecules*, 11(1), 88–96.
- Bron, H. V., & Jacomino, A. P. (2006). Ripening and quality of Golden papaya fruit harvested at different maturity stages. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 18, 389–396.
- Buzea, C., Pacheco, I. I., & Robbie, K. (2007). Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity. *Biointerphases*, 2(4), MR17–MR71. <https://doi.org/10.1116/1.2815690>
- Canclon, P. F., & Xu, Y. (2002). Changes in organic acid composition of citrus juices during the 2000–2001 season. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 115, 37–41.
- Cervantes Rubio, G. (2017). *Caracterización física, química, fitoquímica y de capacidad antioxidante de partes estructurales de papaya (Carica papaya L.)* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Sinaloa.
- Chhipa, H. (2019). Applications of nanotechnology in agriculture. In *Methods in Microbiology* (Vol. 46, pp. 115–142).
- Chukwuka, K. S., Iwuagwu, M., & Uka, U. (2013). Evaluation of nutritional components of *Carica papaya* L. at different stages of ripening. *IOSR Journal of Pharmacy and Biological Sciences*, 6(4), 31–36. <https://doi.org/10.9790/3008-0641316>
- Cosme Silva, G. M., Silva, W. B., Medeiros, D. B., Salvador, A. R., Cordeiro, M. H. M., Da Silva, N. M., Santana, D. B., & Mizobutsi, G. P. (2017). The chitosan affects severely the carbon metabolism in mango (*Mangifera indica* L. Cv. Palmer) fruit during storage. *Food Chemistry*, 237, 372–378. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.05.123>
- Cutrim, C. S., & Cortez, M. A. S. (2018). Una revisión sobre polifenoles: Clasificación, efectos beneficiosos y su aplicación en productos lácteos. *International Journal of Dairy Technology*, 71, 564–578. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12515>
- De los Santos, F., Becerra-León, N. E., Mosqueda-Vázquez, A., & Vargas García, A. B. (1997). *Manual de producción de papaya en el estado de Veracruz*. INIFAP.
- De Pro, E. S. (1979). *Manual de procedimientos analíticos para alimentos de consumo animal*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Del Caro, A., Piga, A., Vacca, V., & Agabbio, M. (2004). Changes of flavonoids, vitamin C and antioxidant capacity in minimally processed citrus segments and juices during storage. *Food Chemistry*, 84(1), 99–105. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(03\)00180-8](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(03)00180-8)
- Ding, D., Ahmad, S. H., Abdul, R. A. R., Mohammed, M. T. M., & Saari, N. (2007). Plastid unstructured, chlorophyll content and color expression during ripening of Cavendish banana at 18 and 27 °C. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 35, 201–210.
- EFSA Panel on Food Additives and Nutrient Sources Added to Food. (2016). Scientific opinion on the re-evaluation of silver (E 174) as food additive.

- EFSA Journal, 14(1), Article e04364.
<https://doi.org/10.2903/j.efsa.2016.4364>
- Epstein, E. (1999). Silicon. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 50(1), 641–664.
<https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.641>
- Eswaran, A., Patel, S., Sahu, T., & Sahu, S. (2022). Development computation of performance and economic evaluation of SPV assisted evaporative cooling vegetable vending cart. *The Pharma Innovation Journal*, SP-11(7), 429–435.
- Fahiminia, S., & Naseri, L. (2015). Effect of nano-composite packages on quality properties and shelf life of Santa Rosa plum (*Prunus salicina* L.). *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 11, 88–99.
- FAO. (2020). *Estadísticas de producción de papaya*. FAO.
- FAO. (2024). *Agricultural production statistics 2010–2023*. FAOSTAT Analytical Briefs No. 96.
- Fuentes, G., & Santamaría, J. M. (2014). Papaya (*Carica papaya* L.): Origin, domestication, and production. In *Genetics and genomics of papaya* (pp. 3–15). Springer.
- Gao, L., Li, Q., Zhao, Y., Wang, H., Liu, Y., Sun, Y., Wang, F., Jia, W., & Hou, X. (2017). Silver nanoparticles biologically synthesised using tea leaf extracts and their use for extension of fruit shelf life. *IET Nanobiotechnology*, 11(6), 637–643. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2016.0207>
- Gapper, N. E., McQuinn, R. P., & Giovannoni, J. J. (2013). Molecular and genetic regulation of fruit ripening. *Plant Molecular Biology*, 82(6), 575–591.
- García-Mateos, M. del R., Corrales-García, J., Cornejo-Vivar, T., & Hernández-Ramos, L. (2023). Recubrimiento biodegradable antifúngico a base de quitosano y aceite esencial de cítricos para la conservación de papaya. *Ciencia UAT*, 17(2), 165–180.
<https://doi.org/10.29059/cienciauat.v17i2.1703>
- Gemail, M. M., Elesawi, I. E., Jghef, M. M., Alharthi, B., Alsanei, W. A., Chen, C., El-Hefnawi, S. M., & Gad, M. M. (2023). Influence of wax and silver nanoparticles on preservation quality of Murcott mandarin fruit during cold storage and after shelf-life. *Coatings*, 13, Article 90.
<https://doi.org/10.3390/coatings13010090>
- Ghai, K., Gupta, P. K., & Gupta, A. K. (2016). Physiochemical behaviour changes during ripening in fruits of *Trewia nudiflora* Linn. *Perspectives in Science*, 8, 596–598. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.06.031>
- Ghidan, A. Y., Al-Antary, T. M., Awwad, A. M., Ghidan, O. Y., Araj, S.-E. A., & Ateyyat, M. A. (2018). Comparison of different green synthesized nanomaterials on green peach aphid as aphicidal potential. *Fresenius Environmental Bulletin*, 27, 7009–7016.
- Grabber, J. H., Ralph, J., Lapierre, C., & Barrière, Y. (2004). Genetic and molecular basis of grass cell-wall degradability. I. Lignin–cell wall matrix interactions. *Comptes Rendus Biologies*, 327(5), 455–465.
<https://doi.org/10.1016/j.crv.2004.02.009>
- Hernández-Madrigal, J. V., Barragán-Vázquez, F. J., Calvo-Carrillo, M. C., & Aguilar-Medina, E. D. (2020). Determinación de compuestos bioactivos en

- papaya (*Carica papaya* L., cv. Maradol) en el estado de Colima en dos estados de madurez. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 5(1), 238–243.
- Hiwasa, K., & Ezura, H. (2014). Part I: Physiology and metabolism (pp. 1–99). In P. Nath, M. Bouzayen, J. Pech, & A. Mattoo (Eds.), *Fruit ripening: Physiology, signalling and genomics*. CABI.
- Hu, Q., Fang, Y., Yang, Y., Ma, N., & Zhao, L. (2011). Effect of nanocomposite-based packaging on postharvest quality of ethylene-treated kiwifruit during cold storage. *International Food Research Journal*, 44, 1589–1596.
- Ijaz, I., Gilani, E., Nazir, A., & Bukhari, A. (2020). Detail review on chemical, physical and green synthesis, classification, characterizations and applications of nanoparticles. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 13(3), 59–81. <https://doi.org/10.1080/17518253.2020.1802517>
- Instituto de Investigaciones de Fruticultura Tropical. (2023). *Cultivo y comercialización de la papaya*. IIFT. <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2023-08/PNUD-Cuba-intructivo-t%C3%A9cnico-papaya.pdf>
- Jagota, S. K., & Dani, H. M. (1982). A new colorimetric technique for the estimation of vitamin C using Folin phenol reagent. *Analytical Biochemistry*, 127, 178–182.
- Jeyakumar, P., Kavino, M., Kumar, N., & Soorianathasundaram, K. (2007). Physiological performance of papaya cultivars under abiotic conditions. *Acta Horticulturae*, 740, 25–30.
- Johney, J., Ragunathan, R., & Mozhi, K. A. (2014). Development of low molecular chitosan and its silver nanocomposites for edible fruit coating to improve shelf life. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 5(6), 40–47.
- Kah, M., & Hofmann, T. (2014). Nanopesticide research: Current trends and future priorities. *Environment International*, 63, 224–235. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.11.015>
- Kim, J. S., Kuk, E., Yu, K. N., Kim, J.-H., Park, S. J., Lee, H. J., Kim, S. H., Park, Y. K., Park, Y. H., & Hwang, C.-Y. (2007). Antimicrobial effects of silver nanoparticles. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 3, 95–101. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2006.12.001>
- Knee, M. (1995). Copper reverses silver inhibition of flower senescence in *Petunia hybrida*. *Postharvest Biology and Technology*, 6, 121–128. [https://doi.org/10.1016/0925-5214\(94\)00038-T](https://doi.org/10.1016/0925-5214(94)00038-T)
- Krishna, K. L., Paridhavi, M., & Patel, J. A. (2008). Review on nutritional, medicinal and pharmacological properties of papaya (*Carica papaya* Linn.). *Natural Product Radiance*, 7(4), 364–373.
- Lee, S., Lee, J., Kim, K., et al. (2009). Eco-toxicity of commercial silver nanopowders to bacterial and yeast strains. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 14, 490–495. <https://doi.org/10.1007/s12257-008-0254-6>
- Li, H., Li, F., Wang, L., Sheng, J., Xin, Z., Zhao, L., Xiao, H., Zheng, Y., & Hu, Q. (2009). Effect of nano-packing on preservation quality of Chinese jujube. *Food Chemistry*, 114(2), 547–552. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.085>

- Lieu, M. D., Dang, T. K. T., & Nguyen, T. H. (2024). Green synthesized silver nanoparticles, a sustainable approach for fruit and vegetable preservation: An overview. *Food Chemistry: X*, 23, Article 101664. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101664>
- López, B., & González, R. (2013). *Diseño y análisis de experimentos* (2.^a ed.). Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Maisarah, A. M., Asmah, R., & Fauziah, O. (2014). Proximate analysis, antioxidant and antiproliferative activities of different parts of *Carica papaya*. *Journal of Nutrition & Food Sciences*, 4, Article 267. <https://doi.org/10.4172/2155-9600.1000267>
- Martínez-Molina, E. C., Abud-Archila, M., Freile-Pelegrín, Y., Luján-Hidalgo, M. C., Gutiérrez-Miceli, F. A., & Ovando-Chacón, S. L. (2022). Recubrimientos a base de alginato de sodio extraído de *Sargassum fluitans* y nanopartículas de plata para prolongar la vida en anaquel de papaya. *Biotecnia*, 24(3), 159–168. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v24i3.1739>
- Martínez-Molina, E. C., Freile-Pelegrín, Y., Ovando-Chacón, S. L., Gutiérrez-Miceli, F. A., Ruiz-Cabrera, M. A., Grajales-Lagunes, A., Luján-Hidalgo, M. C., & Abud-Archila, M. (2022). Development and characterization of alginate-based edible film from *Sargassum fluitans* incorporated with silver nanoparticles obtained by green synthesis. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16, 126–136. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-01156-6>
- Miranda, S. P., Fagundes, G., Filho, J. A., De Moraes, A., De Lima, L., & Yamanishi, O. (2002). Características físicas y químicas de mamões ‘Solo’ y ‘Formosa’. En *XVII Congresso Brasileiro de Fruticultura*.
- Moazzami Farida, S. H., Karamian, R., & Albrechtsen, B. R. (2020). Silver nanoparticle pollutants activate oxidative stress responses and rosmarinic acid accumulation in sage. *Physiologia Plantarum*, 170(3), 415–432.
- Montesinos, A. R. (2003). *Especificación cromática de gamas de colores usadas en la industria del calzado* (Trabajo de investigación). Universidad de Alicante.
- Mulate Zerihun, & Masresha Minuye. (2020). Physicochemical and sensorial analysis of papaya varieties in Ethiopia. *International Journal of Food Engineering and Technology*, 4(2), 46–51. <https://doi.org/10.11648/j.ijfet.20200402.16>
- Nair, R., & Varghese, S. H. (2010). Nanoparticulate material delivery to plants. *Plant Science*, 179(3), 154–163.
- Nakasone, H. Y., & Paull, R. E. (1998). Papaya. En *Tropical fruits* (pp. 239–269). CAB International.
- Nasr, S., & Soliman, G. (2024). Effect of ethylene inhibitors on regulation of ripening and quality of “Fuerte” avocado fruits. *Egyptian Journal of Horticulture*, 51(1), 27–40. <https://doi.org/10.21608/ejoh.2023.215847.1252>
- Njombolwana, N. S., Erasmus, A., Van Zyl, J. G., Du Plooy, W., Cronje, P. J., & Fourie, P. H. (2013). Effects of citrus wax coating and brush type on imazalil residue loading, green mould control and fruit quality retention of

- sweet oranges. *Postharvest Biology and Technology*, 86, 362–371. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.07.017>
- NMX-FF-041-SCFI-2007. (2007). *Productos alimenticios no industrializados para consumo humano—Fruta fresca: Papaya (Carica papaya L.)—Especificaciones*.
- Numan, A. (2021). *Contemporary nanomaterials in material engineering applications* (1.^a ed.). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-62761-4>
- Pê, P. R., Gouvêia, J. P. G., da Silva, F. L. H., Silva, D. R. S., dos S. Silva, G., & de Castro, D. S. (2015). Avaliação das características físico-químicas do mamão “Formosa” in natura, osmodesidratado e seco. *Tecnologia & Ciência Agropecuária*, 9, 17–21.
- Pardo, L., Arias, J., & Molleda, P. (2022). Elaboración de nanopartículas de plata sintetizadas a partir de extracto de hojas de romero (*Rosmarinus officinalis* L.) y su uso como conservante. *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida*, 35(1), 45–58. <https://doi.org/10.17163/lgr.n35.2022.04>
- Pezzuto, A., Losasso, C., Mancin, M., Gallochio, F., Piovesana, A., Binato, G., Gallina, A., Marangon, A., Mioni, R., Favretti, M., & Ricci, A. (2015). Food safety concerns deriving from the use of silver-based food packaging materials. *Frontiers in Microbiology*, 6, Article 1109. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01109>
- Podsedek, A. (2007). Natural antioxidants and antioxidant capacity of Brassica vegetables: A review. *LWT-Food Science and Technology*, 40(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.07.023>
- Prasanna, V., Prabha, T. N., & Tharanathan, R. N. (2007). Fruit ripening phenomena-An overview. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 47(1), 1–19. <https://doi.org/10.1080/10408390600976841>
- Rai, M., Ribeiro, C., Mattoso, L., & Durán, N. (2015). *Nanotechnologies in food and agriculture*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14024-7>
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rive-Evans, C. (1999). Antioxidant activity: An improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26(9–10), 1231–1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Rivera-Pastrana, D. M., Yahia, E. M., & González-Aguilar, G. A. (2010). Phenolic and carotenoid profiles of papaya fruit (*Carica papaya* L.) and their contents under low temperature storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(14), 2358–2365.
- SADER. (2023). *Panorama agroalimentario de la papaya en México*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Salem, N. M., Albanna, L. S., Abdeen, A. O., Ibrahim, Q. I., & Awwad, A. M. (2016). Sulfur nanoparticles improve root and shoot growth of tomato. *Journal of Agricultural Science*, 8, 179–185. <https://doi.org/10.5539/jas.v8n4p179>
- Salisbury, F. B., & Ross, C. W. (2000). *Fisiología de las plantas. 1. Células: agua, soluciones y superficies* (J. M. Alonso, Trad.). Paraninfo/Thomson Learning. (Obra original publicada en 1992).

- Santamaría-Basulto, F., Díaz-Plaza, R., Sauri-Duch, E., Espadas-y-Gil, F., Santamaría-Fernández, J. M., & Larqué-Saavedra, A. (2009). Características de calidad de frutos de papaya Maradol en la madurez de consumo. *Agricultura Técnica en México*, 35(3), 347–353.
- Scheller, H. V., & Ulvskov, P. (2010). Hemicelulosas. *Annual Review of Plant Biology*, 61, 263–289. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112315>
- Serek, M., Woltering, E. J., Sisler, E. C., Frello, S., & Sriskandarajah, S. (2006). Controlling ethylene responses in flowers at the receptor level. *Biotechnology Advances*, 24, 368–381. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2006.01.007>
- Shah, S. W. A., Jahangir, M., Qaisar, M., Khan, S. A., Mahmood, T., Saeed, M., Farid, A., & Liaquat, M. (2015). Storage stability of Kinnow fruit (*Citrus reticulata*) as affected by CMC- and guar gum-based silver nanoparticle coatings. *Molecules*, 20(12), 22645–22661. <https://doi.org/10.3390/molecules201219870>
- Shahat, M. S., Ibrahim, M. I., Osheba, A. S., & Taha, I. M. (2020). Preparation and characterization of silver nanoparticles and their use for improving the quality of apricot fruits. *Al-Azhar Journal of Agricultural Research*, 45(1), 38–55.
- Sharma, A., Bachheti, A., Sharma, P., Bachheti, R. K., & Husen, A. (2020). Fitoquímica, actividades farmacológicas, fabricación de nanopartículas, productos comerciales y aprovechamiento de residuos de *Carica papaya* L.: Una revisión exhaustiva. *Current Research in Biotechnology*, 2, 145–160. <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2020.11.001>
- Shen, Y. H., Yang, F. Y., Lu, B. G., Zhao, W. W., Jiang, T., Feng, L., Chen, X. J., & Ming, R. (2019). Exploring the differential mechanisms of carotenoid biosynthesis in the yellow peel and red flesh of papaya. *BMC Genomics*, 20, Article 49. <https://doi.org/10.1186/s12864-018-5388-0>
- Steinberg, W., Grashorn, M. A., Klünter, A. M., & Schierle, J. (2000). Comparative pigmentation efficiency of two products containing either apo-ester or tagetes extracts in egg yolks and liquid eggs. *Archiv für Geflügelkunde*, 64(4), 180–187.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2006). *Plant physiology* (2nd ed.). Sinauer Associates.
- Thiruvengadam, M., Gurunathan, S., & Chung, I. M. (2015). Physiological, metabolic, and transcriptional effects of biologically synthesized silver nanoparticles in turnip (*Brassica rapa* ssp. *rapa* L.). *Protoplasma*, 252(4), 1031–1046.
- Trigo, J. M., Albertini, S., Spoto, M. H. F., Sarmiento, S. B. S., Reyes, A. E. L., & Sarriés, G. A. (2012). Efeito de revestimentos comestíveis na conservação de mamões minimamente processados. *Brazilian Journal of Food Technology*, 15(2), 125–133. <https://doi.org/10.1590/S1981-67232012005000005>
- Triyono, A., Ardiansyah, R. C. E., & Hapsari, M. C. (2019). Studying the effects of inhibitor solution soaking time on guava (*Psidium guajava* L.) storability. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 251, Article 012033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/251/1/012033>

- Valdés, J. L., & Valero, D. (2017). Nanotechnology in the agri-food sector: Implications for food safety and quality. *Food Control*, 73, 561–570.
- Vázquez-Yanes, C., Batis-Muñoz, A. I., Alcocer-Silva, M. I., Gual-Díaz, M., & Sánchez-Dirzo, C. (1999). *Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación*. CONABIO / Instituto de Ecología, UNAM.
- Vieira, A. C. F., de Matos Fonseca, J., Menezes, N. M. C., Monteiro, A. R., & Valencia, G. A. (2020). Active coatings based on hydroxypropyl methylcellulose and silver nanoparticles to extend papaya (*Carica papaya* L.) shelf life. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 489–498. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.130>
- Von Linnaeus, C. (1753). *Species plantarum* (Vol. 1). Laurentii Salvii.
- Waterman, P. G., & Mole, S. (1994). *Analysis of phenolic plant metabolites*. Blackwell Scientific Publications.
- Workneh, T. S., Azene, M., & Tesfay, S. Z. (2012). A review on the integrated agrotechnology of papaya fruit. *African Journal of Biotechnology*, 11(85), 15098–15110.
- Zhang, C., Li, W., Zhu, B., Chen, H, Chi, H., Li, L., Qin, Y., & Xue, J. (2018). The quality evaluation of postharvest strawberries stored in nano-Ag packages at refrigeration temperature. *Polymers*, 10(8), Article 894. <https://doi.org/10.3390/polym10080894>
- Zuhair, R. A., Aminah, A., Sahilah, A. M., & Eqbal, D. (2013). Antioxidant activity and physicochemical properties changes of papaya (*Carica papaya* L. cv. Hongkong) during different ripening stages. *International Food Research Journal*, 20(4), 1653-1659