



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

POSGRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

**PRODUCCIÓN Y CALIDAD DE LIMÓN PERSA PARA
EXPORTACIÓN DESPUÉS DE APLICACIONES PRECOSECHA
DE GIBERELINAS**

TESIS DE MAESTRÍA

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA



APROBADA



Presenta:

JUAN CAMILO CASTRO PARRA

Bajo la supervisión de: José Joel Enrique Corrales García, Dr.



Chapingo, Estado de México, noviembre de 2023

**PRODUCCIÓN Y CALIDAD DE LIMÓN PERSA PARA EXPORTACIÓN
DESPUÉS DE APLICACIONES PRECOSECHA DE GIBERELINAS**

Tesis realizada por **JUAN CAMILO CASTRO PARRA** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA
AGROALIMENTARIA**

DIRECTOR:



DR. JOSÉ JOEL ENRIQUE CORRALES GARCÍA

ASESOR:



DRA. PATRICIA LANDA SALGADO

ASESOR:



DRA. DIANA GUERRA RAMÍREZ

ASESOR:



DRA. MARTHA ELVA RAMÍREZ GUZMÁN

Chapingo, Estado de México, noviembre de 2023

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
DEDICATORIA	vii
AGRADECIMIENTOS	ix
DATOS BIOGRÁFICOS.....	xii
RESUMEN GENERAL	xiii
GENERAL ABSTRACT	xiv
1 INTRODUCCIÓN GENERAL	15
2 REVISIÓN DE LITERATURA	19
2.1 Producción de limón persa en México	19
2.1.1 Cultivo de limón persa en México.....	19
2.1.2 Prácticas precosecha de manejo de limón persa en México.....	21
2.1.3 Prácticas poscosecha de manejo de limón persa en México	22
2.2 Fisiología del fruto de limón persa	23
2.2.1 Cambios poscosecha del fruto	23
2.2.2 Cambios físicos	24
2.2.3 Cambios químicos.....	25
2.2.4 Factores que afectan la calidad poscosecha del limón persa	26
2.3 Fitohormonas.....	27
2.3.1 Descripción y función de las fitohormonas	27
2.3.2 Tipos de fitohormonas.....	28
2.3.3 Funciones de las giberelinas en las plantas.....	30
2.3.4 Efectos de las giberelinas en la calidad del fruto	30
2.4 Marco de referencia.....	31
2.4.1 Contexto internacional de la producción de limón persa	31
2.4.2 Estado actual de la producción de limón persa en México.....	32
2.4.3 Producción de limón persa en Mgartínez de la Torre, Veracruz ...	34

2.4.4	Descripción geográfica de la huerta “El Relicario”	35
2.5	Literatura citada	36
3	EFFECTO DEL ÁCIDO GIBERÉLICO EN LA PRODUCCIÓN DE LIMÓN PERSA (<i>Citrus latifolia</i> T.) CALIDAD JAPÓN	42
3.1	Introducción	42
3.2	Materiales y métodos.....	44
3.2.1	Sitio de estudio, muestreo y aplicación de tratamientos de ácido giberélico	44
3.2.2	Análisis estadístico.....	46
3.2.3	Caracterización de los frutos de limón persa calidad Japón	46
3.3	Resultados y discusión	48
3.4	Bibliografía.....	54

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Asignación de tratamientos aplicados en esta investigación..... 45

Cuadro 2. Parámetros físicos y contenido total de clorofila de frutos de limón persa cosechados en árboles con diferentes tratamientos de ácido giberélico (AG₃) o no tratados. 52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Producción anual (miles de toneladas) de limón persa en México para la década (2012-2021).....	20
Figura 2. Producción mensual nacional (%) de limón en México.....	21
Figura 3. Indicadores agrícolas y económicos del limón persa en México para el año 2021.....	32
Figura 4. Valor de la producción de las tres principales entidades federativas productoras de limón persa en México (en porcentaje de su aportación nacional).	33
Figura 5. Top 10 en volumen de producción anual y variación porcentual (%) de las principales entidades federativas productoras de limón persa en México para el periodo 2020-2021.	34
Figura 6. Peso en kilogramos (kg) de frutos cosechados con calidad Japón en árboles que tuvieron una o dos aplicaciones de ácido giberélico (AG ₃) en concentraciones de 0, 10 y 50 ppm en diferentes periodos (15, 30 o 45 días antes de cosecha).	50
Figura 7. Fotografía de frutos de limón persa calidad Japón.	53

DEDICATORIA

A DIOS por sostenerme, motivarme y recordarme que todo es posible con su ayuda; también, por las personas maravillosas que puso en mi camino, quienes fueron instrumentos de Dios para brindarme apoyo en cada paso. Él es mi padre quien guía mis pasos y le da sentido a mi vida. “Dichosos más bien los que oyen la palabra de Dios y la obedecen” Lucas 11:28.

A mi familia, principalmente a mi mamá MARÍA ROCÍO PARRA TORRES y a mi abuelita ARACELY TORRES DIAZ por su amor incondicional, comprensión y apoyo durante toda mi vida. Los logros personales, son primeramente gracias a Dios y segundo gracias a ellas. Son ejemplos de fortaleza, bondad y generosidad. Gracias por ser grandes personas y por ser mi inspiración y motivación para salir adelante.

La mayoría de personas que estoy nombrando en esta dedicatoria probablemente no la leerán, pero hay una persona en particular, a la que me hubiera encantado que llegara y que pudiera leerla; Mi papá HENRY ANTONIO CASTRO PÉREZ sé que, si todavía estuvieras con nosotros, estarías lleno de orgullo, siempre me dijiste que te sentías orgulloso de que fuera tu hijo y agradezco esas palabras, yo también me siento orgulloso de que hayas sido mi papá en la tierra.

A mi director de tesis el DR. JOSÉ JOEL ENRIQUE CORRALES GARCÍA, por su valiosa orientación, paciencia y dedicación, siento que algunas veces lo decepcioné, pero, aun así, siempre me apoyó y me mostró el camino para salir adelante. Su experiencia, profesionalismo y mentoría fueron fundamentales en mi crecimiento académico y profesional, me gustaría destacar la calidad humana y profesional del Dr. Corrales, quien ha dejado una huella imborrable en mi camino académico.

A ERIKA DANIELA REYES CARMONA por su amor y apoyo en todo momento, eres una gran compañía que me da alegría y fortaleza; sé que puedo contar contigo en las buenas y en las malas.

A todos mis amigos principalmente a TONATHIU RESCENDIZ GUTIÉRREZ, JHAN LEONARDO GARCÍA MARROQUÍN, RAMON JOAQUIN FERNANDEZ MORENO, JOSÉ MARIA HUICHO LEYVA y DIEGO ANDRÉS ROJAS LEZAMA, quienes siempre estuvieron a mi lado brindándome su apoyo y alegría y con los que podía contar cuando los necesitaba.

A Lucas mi fiel compañero de cuatro patas, que ha sido mi compañía desde el 2009, crecimos juntos y de una u otra manera podría considerarlo como mi hermano.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco primeramente a Dios

Le agradezco a MÉXICO por su calidez y generosidad, me siento afortunado por haber tenido la oportunidad de conocer, compartir y ser parte de esta hermosa cultura, he encontrado personas amables y acogedoras. México es un país con un corazón gigante, y estoy agradecido por la hospitalidad que he experimentado aquí.

Le agradezco al CONAHCYT por la beca que me han brindado para la maestría, espero honrar esta oportunidad con dedicación y logros.

Le agradezco a la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO, AL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL Y AL POSGRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA por brindarme la oportunidad de aprendizaje y crecimiento en sus instalaciones. Me siento muy orgulloso de egresar de esta prestigiosa institución.

Le agradezco a mi director el DR. JOSÉ JOEL ENRIQUE CORRALES GARCÍA, ha sido un honor trabajar bajo su dirección y estoy agradecido por la oportunidad de aprender de uno de los mejores en el área. Este logro no habría sido posible sin su guía.

Le agradezco a mi asesora la DRA. PATRICIA LANDA SALGADO su ayuda en el laboratorio de poscosecha y, su dedicación en la corrección de mi trabajo de grado fue indispensables para la finalización con éxito del mismo, siempre recibí un trato muy cordial de su parte.

Le agradezco a mi asesora la DRA. DIANA GUERRA RAMÍREZ por su dedicación para con este trabajo, por su apoyo en el laboratorio de fitoquímica, sin su orientación y supervisión la mayoría de las pruebas de laboratorio no

hubieran sido posibles, Su contribución tanto profesional como moral, fueron fundamentales, es una excelente persona, estoy realmente muy agradecido.

Le agradezco a mi asesora la DRA. MARTHA ELVA RAMÍREZ GUZMÁN por brindarme apoyo en el campo de la estadística, gracias a sus conocimientos en el área logramos interpretar los resultados de la mejor manera posible. Sigo sintiendo que le debo una disculpa por las veces que no pude comprender plenamente sus enseñanzas, a pesar de sus mejores esfuerzos. Valoré enormemente su paciencia y compromiso, es una gran profesional.

Le agradezco al investigador del INIFAP el MC. SERGIO ALBERTO CURTI DIAZ quién fue fundamental para el desarrollo de esta investigación, estoy muy agradecido por su apoyo en campo; su experiencia y destacada trayectoria en investigaciones relacionadas al limón en México fueron indispensables para finalizar con éxito este trabajo; es el mejor investigador del INIFAP de esta área y fue un honor haber trabajado en conjunto con él, es un excelente profesional y persona.

Le agradezco al jefe de producción ING. ERNESTO ALEXIS ROSAS LANDA y al Encargado de la huerta “Rancho El Relicario” ING. CARLOS HERNÁNDEZ GUERRA por abrir las puertas de su huerta y proporcionar un apoyo inestimable en la logística de campo. Su colaboración fue esencial para la obtención de las muestras de limón analizadas en esta investigación. Además, quisiera destacar la generosidad y el compromiso de estos profesionales por desarrollar estrategias que permitan mejorar la calidad del limón persa producido en México.

Le agradezco al profesor del taller de ajedrez el M.C. JOSÉ RODRIGO ALONSO SÁNCHEZ por la influencia que ha tenido en mi vida y en mi visión del ajedrez. Gracias a su dedicación y apoyo, no solo aprendí a amar este deporte nuevamente, sino que también encontré en él a un amigo confiable.

Por último, me gustaría expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que han sido parte de este proyecto me queda muy difícil nombrar a cada uno, pero todos han contribuido de manera única y esencial, ya sea a través de su apoyo, amistad, mentoría o colaboración. Siempre estaré agradecido, gracias por formar parte esta investigación, directa o indirectamente.

DATOS BIOGRÁFICOS

NOMBRE

Juan Camilo Castro Parra

FECHA DE NACIMIENTO

20 de abril de 1998

LUGAR DE NACIMIENTO

Villavicencio, Meta, Colombia

CURP

CAPJ980420HNESRN02

PROFESIÓN

Ingeniero Agroindustrial

MATRÍCULA PROFESIONAL (COPNIA – COLOMBIA)

091016-0530308 CND

BACHILLERATO

Escuela normal superior de Villavicencio

LICENCIATURA

Universidad de los Llanos, Colombia.



RESUMEN GENERAL

EFFECTO DEL ÁCIDO GIBERÉLICO EN LA PRODUCCIÓN DE LIMÓN PERSA (*Citrus latifolia* T.) CALIDAD JAPÓN¹

En México, el limón persa (*Citrus latifolia*) calidad Japón está catalogado como el principal producto cítrico de exportación. El mercado japonés exige una calidad de limón muy especial; sin embargo, dicha exigencia se compensa con las ganancias obtenidas. Un árbol de limón persa, produce de manera natural alrededor de un 2 % calidad Japón; como se aprecia, la proporción natural de producción es muy baja, se sabe que los reguladores de crecimiento como el ácido giberélico (AG₃) tienen la capacidad de aumentar el tamaño de los tejidos vegetales, debido a esto se infiere que podría aumentar esta producción. El objetivo de este estudio fue y evaluar el efecto de la aplicación precosecha de AG₃, sobre la producción de frutos de limón persa calidad Japón y caracterizar física y fisicoquímicamente los frutos que cumplen con los estándares del mercado japonés. Los tratamientos de AG₃ se aplicaron en 54 árboles, se asignaron tres unidades experimentales (tres árboles) a cada tratamiento (tres repeticiones). El AG₃ se aplicó a los 45, 30 y 15 días antes de cosecha (las aplicaciones consistieron en dos esquemas: una o dos dosis), a tres concentraciones (0, 10 y 50 ppm). Los árboles tratados con AG₃ presentaron una mayor producción de frutos calidad Japón en contraste con los que no recibieron tratamiento, en particular los árboles que recibieron una sola aplicación de AG₃ a una dosis de 10 ppm, 30 o 15 días antes de cosecha presentaron la mayor producción (2.2 kg) de frutos calidad Japón que equivalen a 8.43 % del total de frutos; en comparación con el promedio de producción de los árboles testigo que fue de 0.92 kg (4.1 % del total de frutos cosechados). La aplicación precosecha de AG₃ aumentó la producción de frutos de limón persa calidad Japón.

Palabras clave: limón persa, *Citrus latifolia*, ácido giberélico, calidad Japón, caracterización.

¹ Tesis de Maestría en Ciencia, Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Juan Camilo Castro Parra

Director de Tesis: Dr. José Joel Enrique Corrales García

GENERAL ABSTRACT

EFFECT OF GIBBERELLIC ACID ON THE PRODUCTION OF PERSIAN LEMON (*Citrus latifolia* T.) JAPAN QUALITY²

In Mexico, the Persian lime (*Citrus latifolia*) Japanese quality is classified as the main citric product for exportation. The Japanese market demands a specific quality of lime. However, this requirement is compensated by the profits obtained. A Persian lime tree, grown following agronomic practices focused on the production of great quality fruits for exportation, naturally produces around 2% of Japanese quality. As you can see, the natural production ratio is very low, we are looking for new strategies to increase its production. The objective of this article is to evaluate the effect on preharvest application of gibberellic acid (GA₃) on the production of Persian lime fruits Japanese quality. GA₃ treatments were applied to 54 trees, the sampling unit was one tree. Gibberellic acid was applied 45, 30, and 15 days before harvesting the fruits (the application of GA₃ consisted of two schemes: a single dose or two doses), with three concentrations (0, 10, and 50 ppm), each application was done in triplicate. According to the results, trees treated with GA₃ showed higher production of Japanese quality fruits compared to those that did not receive treatment. Particularly, trees that received a single application of GA₃ with a dose of 10 ppm, 30 or 15 days before harvest showed the highest production (2.2 kg) of Japanese quality fruits, equivalent to 8.43 % of the total fruits; compared to the average production of control trees, which was 0.92 kg (4.1 % of the total harvested fruits). The pre-harvest application of GA₃ increased the proportion of Persian lime fruits that meet the Japanese market standards.

Index words: Persian Lemon, *Citrus Latifolia*, Gibberellic Acid, Japan Quality, Characterization

² Thesis of Master Science. Program of Agro-Food Science and Technology, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Juan Camilo Castro Parra

Advisor: Dr. José Joel Enrique Corrales García

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

La citricultura en México es una de las actividades más importantes dentro del sector hortícola; México es el segundo exportador de limón a nivel mundial con 12.29 % del valor de las exportaciones mundiales. La naranja fue el cultivo perenne con la mayor superficie sembrada a nivel nacional con un total de 344 mil hectáreas. En cuanto al limón, tuvo una superficie sembrada de 215 mil hectáreas, con un volumen de producción anual superior a 7.54 millones de toneladas de estos cultivos (SIAP, 2022).

En los últimos años, México ha sido uno de los principales países productores de cítricos (limón, naranja y toronja) satisfaciendo gran parte de la demanda requerida a nivel mundial. El limón se posiciona como el cítrico de producción y exportación más importante ya que supera a la naranja y la toronja en términos económicos teniendo una participación en el PIB agrícola nacional de 1.5 %, en comparación con la naranja 1.15 % y la toronja 0.13 % (SAGARPA, 2016).

En relación a la producción de limón, de éste se cultivan tres especies: limón persa (*Citrus latifolia* Tan.), limón mexicano o agrío (*Citrus aurantifolia* Swingle) y en menor escala limón italiano (*Citrus lemon*) (Corrales & Lozano, 2003).

Según el SIAP, (2022), el 95 % de la exportación de limón corresponde al limón persa, mientras que las exportaciones de limón mexicano sólo representaron un 4 % de los envíos a otros países.

Los principales países destino de las exportaciones mexicanas de limón persa son Estados Unidos de América con un 90 %, y el 10 % restante se distribuyó entre países como Reino Unido, Países bajos, Rusia, Japón, Francia, Corea del Sur, Canadá, España, Irak y Bélgica (SIAP, 2022). México ha logrado cubrir más del 90 % de la demanda de limón persa en Japón; esto es importante destacarlo

debido a que el mercado japonés genera el mayor margen de ganancia gracias a su mejor cotización (SADER, 2022).

De acuerdo con Curti *et al.* (2000) los frutos con calidad exportable deben reunir atributos como: alto porcentaje de superficie de la cáscara con color verde oscuro, alta rugosidad del epicarpio (cáscara), estado de madurez adecuada e integridad del fruto (sin manchas ni laceraciones), estos atributos pueden variar de acuerdo al mercado de exportación, teniendo como el más exigente al mercado japonés. Por otro lado, Corrales-García *et al.* (2009) indican que este mercado exige frutos de gran tamaño, de cáscara gruesa y de color verde intenso. La calidad de frutos de limón persa solicitada por el mercado japonés consiste en frutos de gran tamaño, por lo que coloquialmente, en las empacadoras, para este mercado se manejan las siguientes categorías: 32 - 36, 40 - 48 y 52 - 54 frutos por caja de 4.53 Kg (Corrales-García *et al.*, 2009).

En promedio, un árbol de limón persa cultivado con adecuadas prácticas agronómicas produce de manera natural aproximadamente el 80 % calidad Estados Unidos, 10 % calidad Francia y sólo un 2 % calidad Japón (Curti *et al.*, 2000); como puede verse, la proporción natural de producción de la calidad Japón (que es la mejor cotizada) es muy baja, por lo que aumentarla sería muy deseable; esto podría ser posible con un adecuado manejo agronómico, o bien, con la aplicación de tratamientos basados en reguladores de crecimiento como las giberelinas enfocadas principalmente a aumentar el tamaño de los frutos, sin perder rugosidad y color verde intenso en cáscara.

En cuanto a manejo agronómico, Corrales-García *et al.*, (2009) encontraron que, en general, las condiciones de cultivo que en la zona de producción de Martínez de la Torre, Veracruz favorecen un mayor volumen de producción de frutos con calidad Japón son: sistema de plantación en cuadro o rectángulo, con distancias entre árboles de 6 m x 6 m o 6 m x 5 m, y una densidad de 316 árboles por ha, 3 aplicaciones de plaguicidas y fungicidas por año (diferentes dosis), 3 aplicaciones de fertilizantes al suelo a base de N-P-K (distintas dosis) y dos podas: una de formación o de sanidad y la otra de aclareo central.

De acuerdo con la información presentada, se tiene conocimiento acerca del tipo de manejo agronómico que favorece la producción de limón persa con calidad Japón, sin embargo, se desconoce si hubiera efecto del ácido giberélico, en diferentes dosis, momentos y tiempos de aplicación para lograr aumentar el número de frutos exigidos por el mercado japonés.

El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de aplicaciones precosecha de ácido giberélico en dos concentraciones (10 y 50 ppm), tres momentos (45, 30 y 15 días antes de cosecha) y con una o dos aplicaciones, en la producción y parámetros de calidad poscosecha de los frutos de limón persa. Con esto se busca Aportar información sobre efectos de aplicaciones precosecha de giberelinas en el aumento de frutos con mayor tamaño, pero sin afectar color verde intenso ni la rugosidad de cáscara, esto para lograr satisfacer la calidad exigida por el mercado japonés.

El presente documento está conformado por tres capítulos. El primer capítulo incluye la introducción general donde se hace una breve contextualización del problema de investigación. El segundo capítulo consiste en la revisión de literatura, donde se plasman inicialmente aspectos generales información relacionada con la producción de limón persa en México. Se aborda el cultivo de limón persa en el país, así como las prácticas precosecha y poscosecha utilizadas en su manejo; también, se examina la fisiología del fruto, incluyendo la maduración y los cambios físicos y químicos que ocurren durante este proceso y los factores que pueden afectar la calidad poscosecha del limón persa.

En cuanto a las fitohormonas, se describe su función y se ofrecen detalles sobre los diferentes tipos existentes. Se hace especial énfasis en las giberelinas, analizando sus funciones en las plantas y sus efectos en la calidad del fruto.

Por último, se presenta el marco de referencia, donde se aborda el panorama internacional de la producción de limón persa, el estado actual de la producción en México y se destaca la producción en Martínez de la Torre, Veracruz.

El tercer capítulo corresponde al artículo científico, donde se tuvo como objetivo evaluar el efecto de aplicaciones precosecha de ácido giberélico en dos concentraciones (10 y 50 ppm), tres momentos (45, 30 y 15 días antes de cosecha) y con una o dos aplicaciones, en la producción y parámetros de calidad poscosecha de los frutos de limón persa.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Producción de limón persa en México

2.1.1 Cultivo de limón persa en México

El limón persa (*Citrus latifolia*), es un importante cítrico cultivado en México; se caracteriza por su distintivo sabor, alta acidez y versatilidad en aplicaciones culinarias.

La producción de limón persa en México ha cobrado una importancia significativa tanto a nivel nacional como internacional; es ampliamente cultivado, destacando por sus favorables condiciones de cultivo en ciertas regiones del país. Según García-Cruz *et al.* (2016), las principales zonas de producción incluyen los estados de Veracruz, Michoacán, Colima y Jalisco. Estas regiones ofrecen climas adecuados y suelos fértiles, lo que permite un cultivo exitoso y altos rendimientos.

Las prácticas eficientes de cosecha y poscosecha juegan un papel crucial en el mantenimiento de la calidad y la comerciabilidad de los limones persas. Esto se puede afirmar debido a que Investigadores como García-Cruz *et al.* (2016) han enfatizado en la importancia de aplicar técnicas de cosecha adecuadas; ya que de esta forma se minimiza el daño de la fruta y maximiza la vida útil. Las técnicas o tratamientos poscosecha implementadas normalmente, son la clasificación, lavado y desinfección del fruto, encerado y manejo de temperatura, durante el almacenamiento y transporte.

En México se producen tres especies: limón persa (*Citrus latifolia* Tan.), limón mexicano o agrío (*Citrus aurantifolia* Swingle) y en menor escala limón italiano (*Citrus lemon*) (Corrales & Lozano, 2003).

La citricultura en México ocupa una posición destacada dentro del ámbito hortícola en términos de extensión y volumen de producción. Según el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2021).

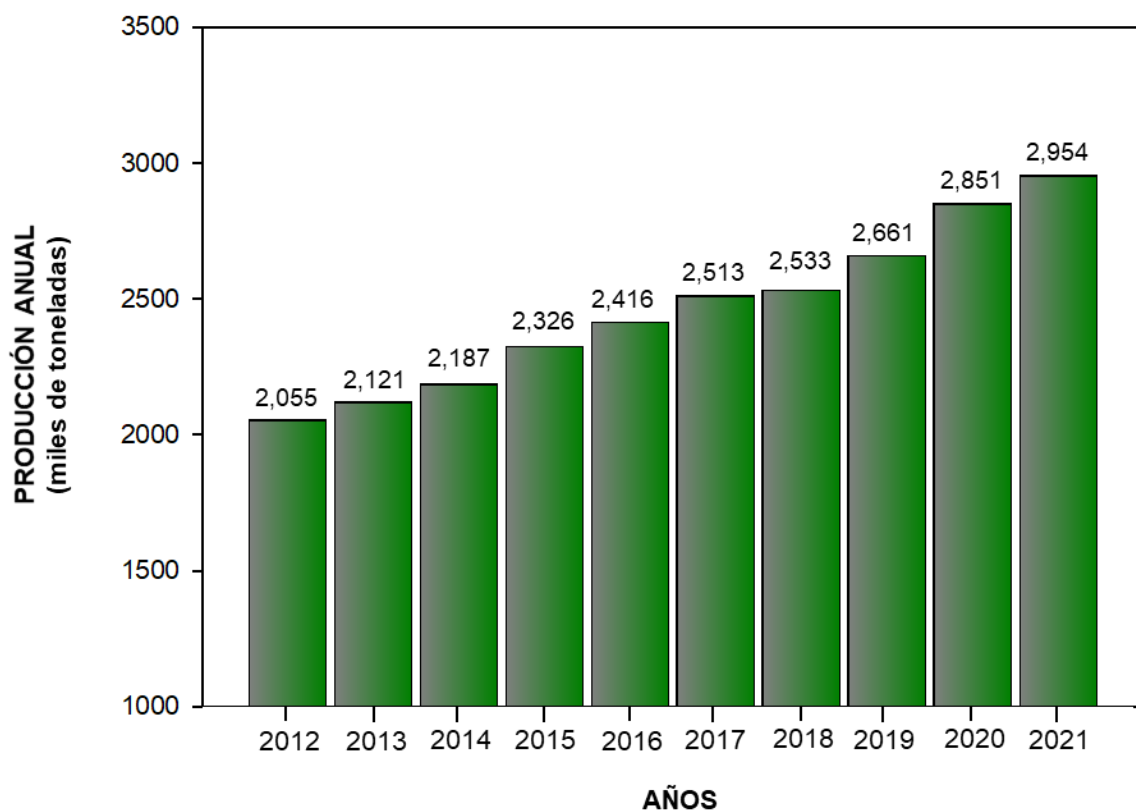


Figura 1. Producción anual (miles de toneladas) de limón persa en México para la década (2012-2021).

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP (2022).

Los volúmenes de exportación de limón persa para el periodo 2020-2021 fueron de 852 mil toneladas, 6 % más que en 2019; Dicha proporción representa más del 85 % de las exportaciones de cítricos, catalogando así al limón persa como el principal producto cítrico de exportación de México y teniendo como uno de los principales compradores a Estados Unidos de América (Friedman & Levin, 2012).

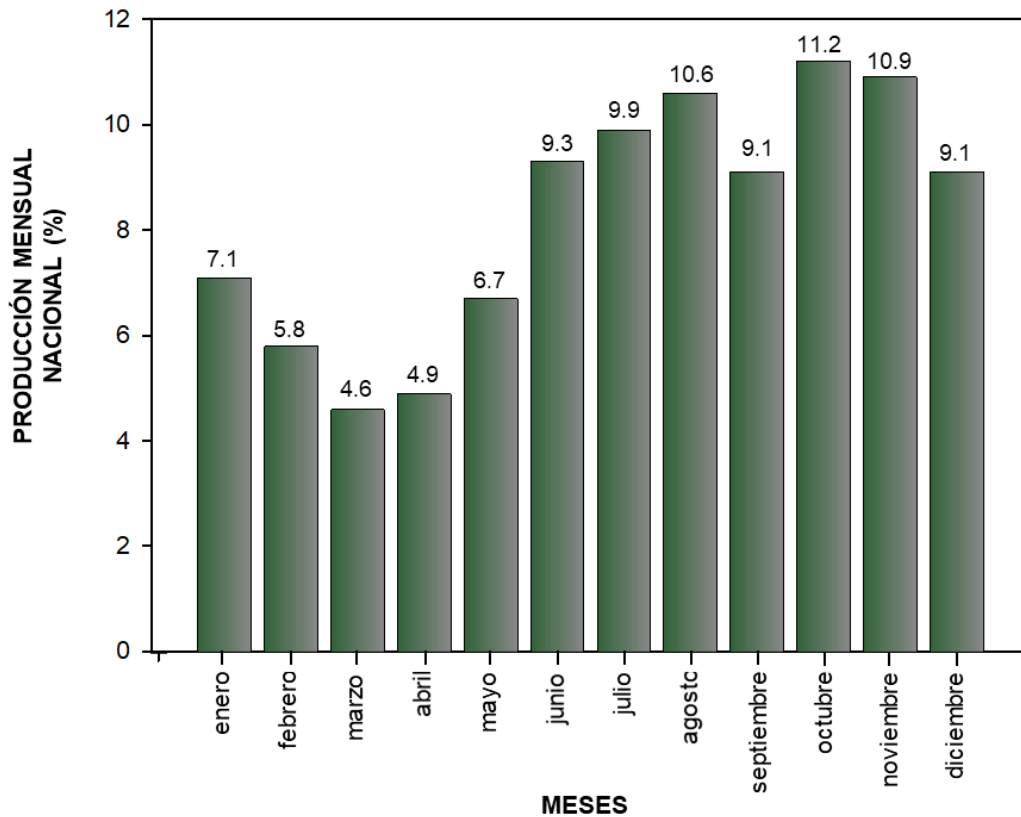


Figura 2. Producción mensual nacional (%) de limón en México.

Fuente: Elaboración propia con datos de SIAP (2022).

Todo parece indicar que las proporciones mencionadas anteriormente no han variado significativamente, y esto probablemente se deba a las condiciones climáticas adecuadas para el normal desarrollo del cultivo de limón, ya que México tiene producción a lo largo del año, con un mínimo de 136 mil toneladas en marzo y un máximo de 331 mil toneladas en octubre (SIAP, 2022).

2.1.2 Prácticas precosecha de manejo de limón persa en México

Según Mora-Aguilera *et al.* (2019), el manejo del limón persa en México involucra varias prácticas de campo encaminadas a maximizar el rendimiento y la calidad del fruto. Una de las prácticas clave es la poda, que ayuda a controlar el tamaño

de los árboles, aumentar la penetración de la luz y promover la producción de frutos. Además, el uso de fertilizantes se puede catalogar como otra práctica de campo clave ya que proporciona el nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S) y microelementos (que son necesarios en dosis más pequeñas) como hierro, manganeso, zinc, cobre, boro y molibdeno, este conjunto de nutrientes debe estar presentes en el suelo dónde se cultiva el limón persa para obtener un adecuado desarrollo de los árboles y de los frutos. El riego es otro factor a tener en cuenta; especialmente durante la estación seca, debido a que es fundamental para mantener la salud y la productividad de los árboles (Mora-Aguilera *et al.*, 2019).

En cuanto al manejo de plagas, se emplean diversas estrategias. Sánchez-Hernández *et al.* (2018) destacan la importancia de las prácticas de manejo integrado de plagas (MIP), que combinan el uso de agentes de control biológico, prácticas culturales y controles químicos para manejar las poblaciones de patógenos de manera efectiva, reduciendo así el uso de agentes químicos y pesticidas sintéticos que pueden generar alteraciones a los ecosistemas y a la salud humana.

Las prácticas de cosecha Según Ramírez-González *et al.* (2015), son un factor muy importante a la hora de disminuir pérdidas poscosecha; por este motivo es de gran importancia recolectar frutos en la etapa correcta de madurez, evitar daños mecánicos, contar con el material de campo necesario, planificar adecuadamente la cosecha y evitar la exposición de los frutos al sol directo; además tener muy presente que para mantener la calidad de la fruta y prolongar la vida útil es fundamental el lavado, la desinfección y el almacenamiento a temperaturas adecuadas, ya que de nada sirve realizar un correcto manejo en campo si posterior a el mismo, los frutos se someterán práctica poscosecha inadecuadas.

2.1.3 Prácticas poscosecha de manejo de limón persa en México

Según Arana-Sánchez *et al.* (2020), en México, las prácticas más comunes para el manejo de los limones persas incluyen el uso de recubrimientos de cera y el

almacenamiento a baja temperatura. Los recubrimientos de cera son un factor clave para reducir la pérdida de agua y de esta manera contribuir a mantener la calidad del fruto durante el almacenamiento y transporte (García *et al.*, 2014). Según Serrano *et al.* (2018) el tipo de cera que se utiliza y el método de aplicación afectan significativamente la calidad de los cítricos. Se tiene conocimiento que aplicar una combinación de agua caliente + cera reduce la pérdida de peso, la descomposición y los trastornos fisiológicos en limas persas durante el almacenamiento (Martínez-Valenzuela *et al.*, 2018).

El almacenamiento a baja temperatura también es una práctica común para preservar la calidad de los limones persa en México. Según Ramírez-González *et al.* (2015), almacenar frutos de limón persa a 10 °C prolonga la vida útil de los frutos y conserva su calidad durante 35 días; por el contrario, tiempos de almacenamiento más largos y temperaturas más bajas causan daño por frío. El daño por frío en los frutos de limón persa se puede evidenciar por el desarrollo de manchas marrones y sabores extraños en la fruta (Ding *et al.*, 2018).

2.2 Fisiología del fruto de limón persa

2.2.1 Cambios poscosecha del fruto

Los limones sufren varios cambios fisiológicos durante el proceso de maduración. Uno de los cambios más significativos es la descomposición de la clorofila y la degradación de las membranas de los tilacoides en los cloroplastos, cuando esto sucede los frutos comienzan a sufrir la pérdida del color verde y a desarrollar pigmentación amarilla (Kumar *et al.*, 2014). Este cambio de color es característico de la maduración de los frutos de limón persa y se acompaña de otros cambios como lo son la pérdida de textura o ablandamiento, la generación de compuestos volátiles (limoneno, citral y linalool) responsables del olor a cítrico, y deterioro del sabor principalmente relacionado a la disminución del ácido cítrico (Gómez *et al.*, 2012).

La acumulación de azúcares solubles, como glucosa y fructosa, y la degradación del almidón son otros de los cambios que sufren los frutos durante la maduración;

estos cambios se deben a la conversión de almidones a azúcares simples y la hidrólisis de sacáridos (Giné-Bordonaba *et al.*, 2019). Este aumento en el contenido de azúcar también está relacionado con el trabajo realizado por dos enzimas que forman parte del metabolismo de azúcares; las cuales son sacarosa sintasa que se encarga de la síntesis de sacarosa (disacárido formado por glucosa y fructosa) e invertasa que convierte la sacarosa en glucosa y fructosa (Pott *et al.*, 2010).

Durante el proceso de maduración se presenta una disminución de la acidez, la cual es provocada por la descomposición de ácidos orgánicos, en el caso del limón el ácido orgánico predominante es el ácido cítrico; este disminuye su concentración durante la maduración debido a la respiración, actividad enzimática, conversión en azúcares y cambios en el pH (Moyano *et al.*, 2011).

Por último, también encontramos que se generan cambios en la producción y señalización de hormonas vegetales, como es el caso del etileno y el ácido abscísico (ABA). El etileno es una hormona gaseosa que se produce en respuesta al estrés y la maduración de la fruta, también cumple funciones como la regulación del color, la textura y el desarrollo del sabor (Liu *et al.*, 2015). Por otra parte, el ácido abscísico (ABA) regula el metabolismo de azúcares y ácidos orgánicos, así como las respuestas al estrés durante el proceso de maduración (Cruz-Castillo & Reyes-Díaz, 2019).

2.2.2 Cambios físicos

La maduración del limón es un proceso que involucra cambios físicos como pérdida de peso, reducción de tamaño, cambios de color y cambios en la textura y composición química, el fruto sufre un proceso de ablandamiento, a causa de la degradación de las paredes celulares, esta degradación es generada por enzimas como las poligalacturonasas (PG) y las pectinas metilesterasas (PMEs) que catalizan la hidrólisis de las pectinas en la pared celular y la desmetilación de las pectinas al eliminar grupos metilo de las cadenas de ácido galacturónico (desmetilesterificación) (Chaves-Silva *et al.*, 2017).

El principal cambio físico que se produce durante la maduración del limón es la pérdida de peso o pérdida de agua, a causa del aumento de las tasas de respiración y transpiración de los frutos (Alós *et al.*, 2018). Otro cambio físico que ocurre durante la maduración del limón es la reducción de tamaño, esta se debe principalmente a la pérdida de agua y la degradación de las paredes celulares, lo que hace que el fruto se encoja (Chaves-Silva *et al.*, 2017).

Además de la pérdida de peso y la reducción de tamaño, también se producen cambios de color durante la maduración del limón. El fruto del limón cambia de verde a amarillo debido a la descomposición de la clorofila y la acumulación de carotenoides, principalmente xantofilas (Pott *et al.*, 2010).

2.2.3 Cambios químicos

La maduración del limón se caracteriza por cambios significativos en la composición química; durante el proceso de maduración, se presenta una disminución de los ácidos orgánicos y un aumento de los azúcares solubles, lo que se traduce en una disminución de la acidez general del fruto (Girardi *et al.*, 2018). La disminución de los ácidos orgánicos se debe principalmente a la degradación del ácido cítrico, que es el ácido orgánico principal en la fruta del limón (Santos *et al.*, 2018).

El proceso de maduración también implica la descomposición de carbohidratos complejos como la pectina, lo que da como resultado un ablandamiento de la fruta (Biale, 1960).

Los limonoides son compuestos amargos que se encuentran en la cáscara y la pulpa del limón y son responsables del sabor amargo de los limones no maduros; durante la maduración, los niveles de estos compuestos disminuyen, resultando así, en una disminución del amargor del fruto (Girardi *et al.*, 2018).

2.2.4 Factores que afectan la calidad poscosecha del limón persa

La calidad poscosecha depende de varios factores, como el tiempo de cosecha, la temperatura de almacenamiento, la humedad relativa y los tratamientos poscosecha.

El tiempo de cosecha es un factor clave que puede desencadenar deterioro y pérdida de frutos, esto debido a que una cosecha temprana da como resultado una maduración incompleta, mientras que una cosecha tardía conduce a maduración excesiva y deterioro. Por lo tanto, es importante planificar y realizar la cosecha de los frutos en la etapa correcta de madurez (Pott *et al.*, 2010).

La temperatura de almacenamiento es otro factor que influye positiva o negativamente en la calidad. Las bajas temperaturas retrasan la maduración y reducen las tasas de respiración, razón por la cual se retrasa la senescencia y se prolonga la vida útil. Sin embargo, las temperaturas excesivamente bajas pueden provocar daños por frío, causando la descomposición de la fruta y sabores extraños (Moyano *et al.*, 2011). Por otro lado, las altas temperaturas de almacenamiento aceleran la maduración, aumentan las tasas de respiración y acortan la vida útil.

La humedad relativa también es un factor importante que influye en la calidad del limón persa durante el almacenamiento poscosecha; mantener altos niveles de humedad relativa puede prevenir la pérdida de humedad y reducir la pérdida de peso de la fruta, lo cual es crucial para mantener la frescura y la firmeza de la fruta. Sin embargo, la humedad excesiva puede promover el crecimiento de hongos y bacterias, lo que provoca la descomposición y el deterioro de la fruta (Pott *et al.*, 2010).

Los tratamientos poscosecha como el etileno, el encerado y el envasado en atmósfera modificada (MAP) también pueden afectar la calidad de la fruta de limón durante el almacenamiento. El tratamiento con etileno puede inducir la maduración y la senescencia, mientras que el encerado puede reducir la pérdida de humedad y prevenir la descomposición. MAP puede modificar el entorno de

almacenamiento, reducir las tasas de respiración y retrasar la senescencia. Sin embargo, la efectividad de estos tratamientos depende de varios factores como la madurez de la fruta, la temperatura de almacenamiento y la duración del almacenamiento (Moyano *et al.*, 2011).

2.3 Fitohormonas

2.3.1 Descripción y función de las fitohormonas

Las plantas poseen sistemas reguladores que les permiten responder a diversas señales externas e internas. Las fitohormonas, también conocidas como hormonas vegetales, desempeñan un papel crucial en la regulación del crecimiento y desarrollo de las plantas; estas se definen como "compuestos endógenos que se sintetizan en una parte de la planta y se transportan a otra parte, donde provocan una respuesta fisiológica" (Ljung, 2013).

Hay cinco clases principales de fitohormonas, que incluyen auxinas, citoquininas, giberelinas, ácido abscísico y etileno, cada una con funciones únicas en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Sakakibara, 2018). Las auxinas, por ejemplo, están involucradas en el alargamiento celular, la dominancia apical y el desarrollo de las raíces (Woodward & Bartel, 2005). Las citoquininas, por otro lado, promueven la división celular y retrasan la senescencia (Kieber & Schaller, 2014). Las giberelinas son importantes para el alargamiento del tallo y la germinación de las semillas (Yamaguchi, 2008), mientras que el ácido abscísico desempeña un papel crucial en la regulación del cierre de los estomas y las respuestas al estrés abiótico (Cutler *et al.*, 2010). El etileno, por su parte, está involucrado en la maduración de la fruta y las respuestas al estrés biótico (Schaller & Bleeker, 2017).

Las fitohormonas trabajan en conjunto para regular diversos aspectos relacionados con el crecimiento y desarrollo de las plantas, esto sucede a través de complejas vías de señalización. Por ejemplo, las auxinas y las citoquininas tienen una relación antagónica en la regulación de la división y diferenciación celular (Moubayidin *et al.*, 2009), mientras que las giberelinas y las auxinas

pueden tener efectos sinérgicos sobre el alargamiento del tallo (Sakamoto *et al.*, 2006). El ácido abscísico y el etileno también interactúan para regular las respuestas al estrés, como la sequía y las inundaciones (Pei *et al.*, 2018).

2.3.2 Tipos de fitohormonas

Las fitohormonas son un grupo de compuestos orgánicos naturales que regulan varios procesos fisiológicos en las plantas, incluido el crecimiento, el desarrollo y la respuesta a los estímulos ambientales (Sakakibara, 2018). Hay varios tipos de fitohormonas; estas se suelen clasificar en estimuladoras de crecimiento (auxinas, brasinoesteroides, giberelinas y citoquininas) e inhibidoras de crecimiento (ácido abscísico y etileno) (Woodward & Bartel, 2005).

Las auxinas son uno de los tipos más importantes de fitohormonas vegetales, ya que juegan un papel crucial en la regulación del crecimiento y desarrollo de las plantas (Woodward & Bartel, 2005). Promueven la elongación y diferenciación celular y son responsables de varios procesos, como tropismos, dominancia apical e iniciación de raíces (Ljung, 2013). Según Terol *et al.* (2016), las auxinas en el limón cumplen funciones del ciclo reproductivo de la planta; entre las cuales encontramos la diferenciación del polen en las flores, desarrollo de tubos polínicos, diferenciación de flores y génesis de órganos florales.

Las citoquininas tienen la capacidad de promover la división celular y retrasar la senescencia en las plantas. La señalización de citoquininas está mediada por un sistema de dos componentes, que involucra receptores de histidina quinasa, proteínas de fosfotransferencia y reguladores de respuesta (Hwang & Sheen, 2001). Las citoquininas, también trabajan en conjunto con las auxinas para regular la división y diferenciación celular y también desempeñan un papel en la promoción del crecimiento de los brotes y la activación de las yemas (Schaller & Bleeker, 2017). En limón, las citoquininas promueven la regeneración de tejidos a partir de explantes nodales maduros y la organogénesis (formación de nuevos órganos y estructuras a partir de tejidos maduros); además está relacionada con la producción de etileno (Pérez-Jiménez *et al.*, 2022).

Las giberelinas son otra clase de fitohormonas vegetales que regulan el crecimiento y desarrollo de las plantas (Olszewski *et al.*, 2002). Están involucrados en la promoción de la elongación del tallo, la germinación de semillas y el desarrollo de las flores y también desempeñan un papel en la regulación de la maduración de la fruta y el metabolismo del azúcar (Hedden & Phillips, 2000). Las giberelinas en limón mexicano, estimulan la elongación celular de las vesículas de jugo, generando así frutos de mayor tamaño (Dupont, 1999). Además, la aplicación de ácido giberélico en poscosecha prolongó la vida de anaquel y mantuvo la calidad en la conservación de los frutos durante el almacenamiento (Ariza Flores *et al.*, 2017).

El ácido abscísico está involucrado en la regulación de procesos fisiológicos, como la latencia de semillas y las respuestas al estrés, principalmente sequía, frío, calor extremo y salinidad (Finkelstein *et al.*, 2002). También desempeña un papel en la regulación del cierre estomático y, por lo tanto, ayuda a las plantas a conservar agua durante los períodos de sequía (Nambara & Marion-Poll, 2005).

El etileno es una fitohormona vegetal que se encuentra en estado gaseoso; este participa en la maduración, senescencia y abscisión de los frutos (Abeles *et al.*, 2012). También juega un papel en la regulación de las respuestas de las plantas al estrés biótico y abiótico; para el caso del limón, el etileno está involucrado en la regulación del desarrollo, señalización, regeneración y maduración de tejidos para la formación de nuevos órganos, realizando estas funciones en sinergia con las citoquininas (Pérez-Jiménez *et al.*, 2022).

Finalmente, los brasinoesteroides son fitohormonas que promueven el crecimiento vegetal, regulan el desarrollo de tejidos, la germinación de semillas y la senescencia, además también están relacionadas con la formación de hojas y flores (Sakamoto *et al.*, 2006).

En naranja cv “Valencia” se determinó que la aplicación de un complejo hormonal a base de auxinas, giberelinas y citocininas incrementó el rendimiento de fruto y jugo concentrado con la aplicación de 3 L ha⁻¹ (Ruiz, 1999).

2.3.3 Funciones de las giberelinas en las plantas

Las giberelinas son una clase de fitohormonas que juegan un papel importante en varios aspectos del crecimiento y desarrollo de las plantas; estas están involucrados en la regulación del alargamiento del tallo, la germinación de semillas, la expansión de las hojas y el desarrollo de las flores (Hedden & Phillips, 2000). También promueven el crecimiento de frutos y la producción de semillas (Olszewski *et al.*, 2002).

Una de las funciones más conocidas de las giberelinas es su papel en la elongación del tallo. En *Arabidopsis thaliana*, por ejemplo, las giberelinas estimulan la elongación de las células madre al promover la división y la elongación celular (Daviere & Achard, 2016). De manera similar, en el arroz, promueven la elongación del tallo al aumentar el número de células en los entrenudos (Sakamoto *et al.*, 2006).

Las giberelinas también están involucradas en la germinación de semillas. Los estudios han demostrado que esta fitohormona es necesaria para romper la latencia de las semillas y el inicio de la germinación (Groot *et al.*, 2003). Además, pueden promover el crecimiento de las plántulas al aumentar la división y elongación celular (Gazzarrini & McCourt, 2001).

Otra función importante de las giberelinas es su papel en el desarrollo de las flores. Las giberelinas regulan la identidad de los meristemas y la determinación del tamaño de los órganos florales (Hedden & Phillips, 2000). Además, influyen en el momento de la floración de las plantas, por este motivo en algunos cultivos se aplican para adelantar o retrasar cosechas (Hedden & Phillips, 2000).

2.3.4 Efectos de las giberelinas en la calidad del fruto

Se ha encontrado que las giberelinas tienen un impacto significativo en la calidad de los frutos en varias especies de plantas. Por ejemplo, en los tomates, las giberelinas juegan un papel en el tamaño y la calidad del fruto. Los estudios han demostrado que la aplicación de giberelinas puede aumentar el tamaño de los frutos, mejorar su color y reducir el agrietamiento (Martínez-Ballesta *et al.*, 2018).

Además, en las uvas, se ha descubierto que las giberelinas afectan la maduración y la calidad de la fruta. La aplicación de giberelinas en las etapas apropiadas del desarrollo de la uva puede conducir a un aumento en el tamaño de la fruta, el contenido de azúcar y un mejor aroma (Sun *et al.*, 2020).

Además, en los cítricos, se ha demostrado que las giberelinas mejoran la calidad de la fruta. En las naranjas, se ha descubierto que las giberelinas mejoran el tamaño y el peso de la fruta y reducen la aparición de rajaduras (Siviero *et al.*, 2017). Además, se ha demostrado que las giberelinas mejoran el color y la calidad de los frutos de limón al aumentar su contenido de jugo y reducir la aparición de malformaciones (González-Mas *et al.*, 2016).

Las giberelinas tienen un impacto significativo en la calidad de la fruta en varias especies de plantas. La aplicación de giberelinas puede conducir a un aumento en el tamaño, el peso, el color, el contenido de azúcar y el aroma de la fruta, y a una reducción del agrietamiento, la división y la malformación.

2.4 Marco de referencia

2.4.1 Contexto internacional de la producción de limón persa

La producción de limón persa a nivel mundial ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas, impulsada por el aumento en la demanda de este cítrico en diferentes mercados. El limón persa, también conocido como lima persa, es originario de Asia, pero se ha adaptado bien a diferentes regiones del mundo gracias a su resistencia a las enfermedades y su alta productividad (Bhalla *et al.*, 2020).

Los principales países productores de limón persa en el mundo son México, Argentina, India, Turquía e Irán (FAO, 2022). En México, se producen alrededor de 1,807,786 toneladas de limón persa al año, lo que representa el 30 % de la producción mundial (SIAP, 2022). En Argentina, se producen alrededor de 1,600,000 toneladas al año, lo que representa el 27 % de la producción mundial (FAO, 2022). En India, se producen alrededor de 880,000 toneladas al año, lo que representa el 15 % de la producción mundial (FAO, 2022). En Turquía e Irán,

se producen alrededor de 450,000 y 400,000 toneladas al año, respectivamente (FAO, 2022).

El limón persa es un cultivo de alto valor económico para muchos países productores, ya que genera empleo y divisas. Según datos de la FAO, en 2021 se produjeron 6,709,830 toneladas de limón en el mundo, de las cuales 6,007,352 toneladas correspondieron al limón persa (FAO, 2022). Estos números muestran una tendencia al alza en la producción de limón persa en el mundo, lo que se traduce en un aumento en la oferta y en la exportación del producto.

La producción de limón persa a nivel mundial ha experimentado algunos desafíos en los últimos años, como la presencia de enfermedades en los árboles y la competencia de otros países productores. Sin embargo, los avances en la investigación y la tecnología han permitido a los productores mejorar la calidad y la productividad del cultivo, lo que ha contribuido al crecimiento de la producción y la exportación de limón persa en el mundo (Bhalla *et al.*, 2020).

2.4.2 Estado actual de la producción de limón persa en México

La producción de limón persa en México es una de las actividades económicas más importantes en el país, generando empleo y divisas. El limón persa, también conocido como lima persa, es originario de Asia, pero se ha adaptado bien al clima y suelo mexicanos, lo que ha permitido una producción exitosa. México es uno de los principales productores de limón persa en el mundo, con una participación del 30 % en la producción mundial (SIAP, 2022).

	Superficie			Volumen	Valor	Rendimiento	Precio Medio Rural	
Periodo	Sembrada	Siniestrada	Cosechada	Miles de toneladas	Millones de pesos	Toneladas/hectárea	Pesos/tonelada	
	Miles de hectáreas							
(2021-2022)	215	NA	193	2,954	19,694	15.3	6,666	
(2020-2021)	3.5	NA	4.4	3.6	4.9	-0.8	1.3	
(2012-2021)	2.9	NA	2.9	4.1	16.7	1.2	12.1	
Variaiones (%)						Aumenta	Disminuye	No aplica

● Aumenta ● Disminuye ● No aplica

Figura 3. Indicadores agrícolas y económicos del limón persa en México para el año 2021.

Fuente: Elaboración propia con datos de SIAP (2022).

La producción de limón persa en México se concentra principalmente en los estados de Veracruz, Colima, Michoacán, Jalisco y Guerrero (SIAP, 2022). Según datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), en 2021 se produjeron 2,645,231 toneladas de limón en el país, de las cuales 1,807,786 toneladas correspondieron al limón persa (SIAP, 2022). Estos números muestran una tendencia al alza en la producción de limón persa en México, lo que se traduce en un aumento en la oferta y en la exportación del producto.



Figura 4. Valor de la producción de las tres principales entidades federativas productoras de limón persa en México (en porcentaje de su aportación nacional).

Fuente: (SIAP, 2022).

El limón persa es un cultivo de alto valor económico para México, no solo por su producción sino también por su exportación. Según datos del Banco de México, en 2021 las exportaciones de limón persa alcanzaron los 647 millones de dólares (Banco de México, 2022). Estados Unidos es el principal destino de las exportaciones de limón persa de México, representando el 82 % del total (SIAP, 2022). Otros destinos importantes son Canadá, Japón, Países Bajos y Reino Unido (SIAP, 2022).

La producción de limón persa en México ha sido fomentada por el gobierno, el cual ha implementado programas y políticas para apoyar a los productores y fomentar la innovación en el sector agroalimentario. Además de desarrollar iniciativas para mejorar la calidad y la inocuidad de los productos agrícolas, lo que ha contribuido a la consolidación de México como un importante productor y exportador de limón persa en el mundo (SIAP, 2022).

2.4.3 Producción de limón persa en Martínez de la Torre, Veracruz

La producción de limón persa en Martínez de la Torre, Veracruz, es una actividad económica importante para la región y para el país en general. El limón persa es uno de los principales cultivos frutales en Veracruz, y se ha convertido en un producto clave para la exportación a diferentes mercados internacionales (Torres *et al.*, 2019).

Rank	Entidad federativa	Región	Producción (toneladas)	Variación (%) 2020-2021
Total nacional			2,954,431	3.6
1	Veracruz	Sur-Sureste	804,729	2.1
2	Michoacán	Centro-occidente	800,219	0.2
3	Oaxaca	Sur-Sureste	306,009	8.7
4	Colima	Centro-occidente	299,506	9.1
5	Tamaulipas	Noreste	141,917	21.4
6	Jalisco	Centro-occidente	107,064	3.0
7	Yucatán	Sur-Sureste	96,991	21.3
8	Tabasco	Sur-Sureste	87,368	1.5
9	Guerrero	Centro-occidente	80,533	0.6
10	San Luis Potosí	Centro-occidente	45,296	-0.7
Resto			184,799	-5.7

● Aumenta ● Disminuye

Figura 5. Top 10 en volumen de producción anual y variación porcentual (%) de las principales entidades federativas productoras de limón persa en México para el periodo 2020-2021.

Fuente: Elaboración propia con datos de SIAP (2022).

Martínez de la Torre está ubicado en la región de la Huasteca veracruzana, esta región destaca por ser una de las zonas con mayor producción de limón persa en el estado. Según datos del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera, en 2021 se produjeron alrededor de 360,000 toneladas de limón persa; esta producción se concentra principalmente en pequeñas y medianas parcelas, que son cultivadas por agricultores locales (SIAP, 2022). El clima cálido y húmedo de la región, así como el tipo de suelo, son factores que favorecen el crecimiento del limón persa en esta zona (Torres *et al.*, 2019).

El limón persa en Martínez de la Torre es cosechado durante todos los meses del año, siendo noviembre y diciembre los meses de mayor producción (SIAP, 2022). Una vez cosechado, el limón persa es llevado a centros de acopio donde se realiza su clasificación, empaque y distribución a diferentes destinos, tanto nacionales como internacionales. Según datos del SIAP, en 2021 se exportaron alrededor de 60,000 toneladas de limón persa producido en Veracruz, lo que representa el 20 % de las exportaciones totales de limón persa de México (SIAP, 2022). Los principales destinos de las exportaciones de limón persa producido en Martínez de la Torre son Estados Unidos, Canadá, Japón y Europa (SIAP, 2022).

2.4.4 Descripción geográfica de la huerta “El Relicario”

El Rancho “El Relicario” se encuentra ubicado en las cercanías del municipio de Martínez de la Torre (“20°01’38.4” N 97°08’14.8” W”), en el estado de Veracruz, México, específicamente en Tlapacoyan. Esta región se caracteriza por tener un clima cálido y húmedo, con una temperatura promedio anual de 25 °C y una precipitación promedio de 2,000 mm al año. La zona está cubierta por una densa vegetación, lo que le otorga una gran biodiversidad (Torres *et al.*, 2019).

La huerta “El Relicario” se encuentra a una altitud de aproximadamente 120 metros sobre el nivel del mar y cuenta con una extensión de alrededor de 70 hectáreas. Se encuentra rodeada de una amplia variedad de árboles frutales, y el cultivo principal de la huerta es el limón persa.

2.5 Literatura citada

- Abeles, F. B., Morgan, P. W., & Saltveit Jr, M. E. (2012). *Ethylene in plant biology*. Academic Press.
- Alós, E., Rodrigo, M. J., Zacarías, L. (2018). Differential effects of postharvest treatments on the metabolism of organic acids and carbohydrates in lemon fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 136, 132-141.
- Arana-Sánchez, A., Gallegos-Vázquez, C., Carrión-Álvarez, M., Ramírez-Valverde, R., Sánchez-Pardo, M. E., & Zavaleta-Mancera, H. A. (2020). Physicochemical and microbiological quality of Persian lime (*Citrus latifolia* Tan.) coated with chitosan and stored at different temperatures. *Postharvest Biology and Technology*, 159, 111002.
- Ariza Flores, R., Barrios Ayala, A., Herrera García, M., Barbosa Moreno, F., Michel Aceves, A., Otero Sánchez, M. A., & Tejacal, I. A. (2017). Fitohormonas y bioestimulantes para la floración, producción y calidad de lima mexicana de invierno. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(7). <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i7.557>.
- Banco de México. (2022). Comercio exterior de México. Recuperado el 23 de marzo de 2023, de <https://www.banxico.org.mx>
- Bhalla, M., Kaur, G., & Singh, A. (2020). Perspectives on Lemon Production and Trade. In S. K. Gupta, A. Pandey, & S. K. Mishra (Eds.), *Advances in Citrus Nutrition* (pp. 255-278). Springer.
- Biale, J. B. (1960). The biochemistry of fruit ripening. *Annual Review of Plant Physiology*, 11(1), 21-48.
- Chaves-Silva, S., Santos, G. R. D., Gomes, A. C. M. M., do Nascimento, J. R. O., de Brito, E. S., & Alves, R. E. (2017). Characterization of physical and chemical changes during lemon (*Citrus limon* Burm. F) fruit maturation. *Journal of Food Quality*, 2017.
- Corrales, G. J. y E. Lozano L., (2003) *Situación y perspectivas del sistema agroindustrial limón persa en Martínez de la Torre*, Ver. IV Congreso Internacional "Las cadenas agroalimentarias de Hortalizas, Frutas y flores en América Latina". Guadalajara, Jalisco, México.
- Corrales, G. J.; Cruz, C. J.; Lozano, L. E.; Famiani, F., (2009) Condiciones tecnológicas de huertas de Lima Persa (*Citrus Latifolia* Tan.) para el mercado japonés en Veracruz, México. *J. Agric. Universidad de Puerto Rico* 93(1-2): 143-147.
- Cutler, S. R., Rodriguez, P. L., Finkelstein, R. R., & Abrams, S. R. (2010). Absciscic acid: Emergence of a core signaling network. *Annual Review of Plant Biology*, 61, 651-679.

- Cruz-Castillo, J. G., & Reyes-Díaz, M. M. (2019). Absciscic acid and fruit ripening. *Plant Hormones and Environmental Challenges* (pp. 307-323). Springer.
- Davière, J. M., & Achard, P. (2016). Gibberellin signaling in plants. *Development*, 143(23), 3482-3498.
- Ding, P., Wang, Y., Cao, Y., Zhang, K., Zhang, Y., & Sun, C. (2018). Chilling injury in fruits and vegetables: A review. *Postharvest Biology and Technology*, 141, 3-15.
- Du Pont. (1999) *Uso de Pro Gibb en limón mexicano*. Abbot Laboratories, Du Pont. México, D.F. 2p.
- FAO. (2022). FAOSTAT. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- Finkelstein, R., Gampala, S. S., & Rock, C. D. (2002). Absciscic acid signaling in seeds and seedlings. *The Plant Cell*, 14(suppl 1), S15-S45.
- Friedman, M., & Levin, C. E. (2012). Review of methods for determining citrus fruit origin. *Journal of agricultural and food chemistry*, 60(34), 8093-8102.
- García-Cruz, N. V., González-Mendoza, D., Tellez-Mendez, I. J., Villarreal-Guerrero, F., & Martínez-Téllez, M. A. (2016). Mexican lime (*Citrus aurantifolia*) and its potential cultivation areas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(2), 487-497.
- García-Sánchez, F., Artés-Hernández, F., Aguayo, E., & Artés, F. (2014). Antifungal activity of chitosan coatings and films against *Penicillium italicum* and *Rhizopus stolonifer* in simulated cold storage of mandarin fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 91, 1-8.
- Gazzarrini, S., & McCourt, P. (2001). Cross-talk in plant hormone signalling: what *Arabidopsis* mutants are telling us. *Annals of Botany*, 87(5), 617-628.
- Giné-Bordonaba, J., Prats-Mateu, B., Rufat, J., & Echeverría, G. (2019). Metabolite profiling of Spanish lemon (*Citrus limon*) genotypes with different post-harvest yellowing susceptibility. *Food Research International*, 121, 584-590.
- Girardi, C. L., Figueiredo, F. A., Chagas, E. A., Silveira, A. C., & Rogez, H. (2018). Changes in quality parameters and bioactive compounds during ripening of lemon fruit (*Citrus limon* Burm. f.). *Food Chemistry*, 242, 553-560. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.09.058.
- Gómez, P., Martínez-Cuenca, M. R., Legaz, F., & Primo-Millo, E. (2012). Application of reflectance spectroscopy for non-destructive determination of citrus fruit quality. *Journal of Food Engineering*, 111(4), 669-675.
- Gonzalez, J. (1998) *Evaluación del ácido giberélico en limón persa* [En línea]. Recuperado el 29 de octubre de 2021 de:

- chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3A%2F%2Frepositorio.uaaan.mx%3A8080%2Fxmlui%2Fbitstream%2Fhandle%2F123456789%2F607%2FT09972%2520GONZALEZ%2520PRECIADO%2520JOSE%2520MANUEL.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy&cliclen=790363
- Groot, S. P. C., Karssen, C. M., & Bentsink, L. (2003). Seed dormancy and germination. In H. A. J. M. T. Aarts & S. B. M. Eugster-Meijer (Eds.), *Molecular mechanisms of plant development* (pp. 231-256). Springer.
- Hwang, I., & Sheen, J. (2001). Two-component circuitry in Arabidopsis cytokinin signal transduction. *Nature*, 413(6854), 383-389.
- Hedden, P., & Phillips, A. L. (2000). Gibberellins and their role in crop improvement. *Annals of Applied Biology*, 137(2), 167-188.
- Kieber, J. J., & Schaller, G. E. (2014). *Cytokinins*. The Arabidopsis Book, 12, e0168.
- Kumar, P., Pandey, A. K., Singh, B., & Singh, R. P. (2014). Changes in physico-chemical, enzymatic and antioxidant properties of mandarin (*Citrus reticulata*) during ripening. *Journal of Food Science and Technology*, 51(9), 1978-1985.
- Liu, M., Pirrello, J., Chervin, C., Roustan, J. P., & Bouzayen, M. (2015). Ethylene control of fruit ripening: revisiting the complex network of transcriptional regulation. *Plant Physiology*, 169(4), 2380-2390.
- Ljung, K. (2013). Auxin metabolism and homeostasis during plant development. *Development*, 140(5), 943-950.
- Martínez-Ballesta, M. C., Moreno-Fernández, D. A., & Muries, B. (2018). Gibberellins in tomato fruit development and ripening. *Journal of Plant Growth Regulation*, 37(4), 1006-1015.
- Martínez-Valenzuela, M. E., Yáñez-Mansilla, E., Miranda-López, R., Aguilar-Ávila, J., Gutiérrez-Méndez, N., & Martínez-Téllez, M. A. (2018). Effect of hot water and waxing treatments on the postharvest quality of Mexican Persian lime (*Citrus latifolia* Tan.). *Postharvest Biology and Technology*, 139, 7-14.
- Mora-Aguilera, G., Martínez-Damián, M. A., Flores-Guerrero, J. L., González-Hernández, V. A., & Avilés-Gutiérrez, L. (2019). Effect of pruning severity on tree growth and yield of Persian lime in Veracruz, Mexico. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 41(6), e-173.
- Moubayidin, L., Perilli, S., Dello Iorio, R., Di Mambro, R., Costantino, P., & Sabatini, S. (2009). The rate of cell differentiation controls the Arabidopsis root meristem growth phase. *Current Biology*, 19(14), 1191-1197.

- Moyano, E., Martínez-Romero, D., Alacid, M., & Alférez, F. (2011). Effect of ethylene treatment on carotenoid accumulation in lemon (*Citrus limon* L. Burm. f.) fruit. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(5), 1638-1644.
- Nambara, E., & Marion-Poll, A. (2005). Absciscic acid biosynthesis and catabolism. *Annual Review of Plant Biology*, 56, 165-185.
- Olszewski, N., Sun, T. P., & Gubler, F. (2002). Gibberellin signaling: biosynthesis, catabolism, and response pathways. *Plant Cell*, 14(Suppl), S61-S80.
- Pei, Z.-M., Murata, Y., Benning, G. A., Thomine, S., Klüsener, B., Allen, G. J., Grill, E., & Schroeder, J. I. (2000). *Calcium channels activated by hydrogen peroxide mediate abscisic acid signalling in guard cells*.
- Pérez-Jiménez, M., Celdrán-Sánchez, V. & Pérez-Tornero, O. Role of endogenous cytokinins and ethylene in adventitious shoot regeneration in lemon (*Citrus limon*). *In Vitro Cell.Dev.Biol.-Plant* 58, 787–793 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11627-022-10286-5>
- Pott, E. B., Monteiro Belém, M. J., & Morgado, C. M. A. (2010). Physical and chemical changes during citrus fruit maturation. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 32(1), 173-180.
- Pott, D. M., do Nascimento, J. R. O., Neves, A. L. M., & Coelho, S. R. M. (2010). Ethylene biosynthesis and activity in ripening of non-climacteric fruits: a review. *Food Science and Technology*, 30(1), 1-13.
- Pott, E. B., dos Santos, C. A., de Souza, R. G., & Cecilio Filho, A. B. (2010). Lemon quality during postharvest storage. *Ciência Rural*, 40(6), 1395-1402.
- Ramírez-González, M. A., Romero-Maya, D., Márquez-Quiroz, C., and Ramírez-Ortega, F. A. (2015). Evaluación de la calidad de limón persa (*Citrus latifolia* Tan.) tratado con recubrimientos comestibles. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 16(1), 49-56.
- Ramírez-González, M. A., Romero-Maya, D., Márquez-Quiroz, C., & Serrano, M. (2015). Influence of temperature and packaging material on Persian lime fruit during postharvest. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(1), 1-13.
- Ruiz, B. O. 1999. *Fisiología de la floración y reguladores de crecimiento*. In: IV Curso Internacional de Citricultura. Unidad Académica Multidisciplinaria Agronomía y Ciencias, UAT. Cd. Victoria, Tamaulipas. 21-25 de septiembre de 1999.
- Schaller, G. E., & Bleecker, A. B. (2017). Ethylene and the regulation of plant development. *BMC Biology*, 15(1), 94.
- Sakakibara, H. (2018). Cytokinins: Activity, biosynthesis, and translocation. *Annual Review of Plant Biology*, 69(1), 1-27.

- Sakamoto, T., Morinaka, Y., Inukai, Y., Kitano, H., & Fujioka, S. (2006). Auxin signal transcription factor regulates expression of the brassinosteroid receptor gene in rice. *Plant Journal*, 48(1), 68-77.
- Sánchez-Hernández, C., Leos-Martínez, J., Ruiz-Sánchez, E., & González-Hernández, V. A. (2018). Management of key pests and diseases of Persian lime in the Gulf of Mexico. *Acta Horticulturae*, 1194, 149-156.
- Santos, M. D., Almeida, D. P., Silva, C. A., & Rufino, M. S. M. (2018). *Organic acids in fruits: metabolism, functions and contents*. In *Organic Acids: Characteristics, Properties and Synthesis* (pp. 39-58). Nova Science Publishers, Inc.
- Serrano, M., Martínez-Romero, D., Guillén, F., Valero, D., & Castillo, S. (2018). Quality changes in 'Persian' lime fruit stored under cold and ambient conditions: Effect of fruit maturity stage. *Scientia Horticulturae*, 237, 202-211.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) (2020). *Panorama Agroalimentario 2020, Datos de un campo que avanza sin dejar a nadie atrás*.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2021) *Panorama Agroalimentario 2020, Datos de un campo que avanza sin dejar a nadie atrás*.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2022). *Producción agrícola*.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2022). *Estadísticas Agroalimentarias. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural*.
- Siviero, A., Pimentel, R. M. A., de Souza, S. R., Coletta-Filho, H. D., & Machado, M. A. (2017). Gibberellin application reduces fruit splitting in 'Pêra Rio' sweet orange. *Scientia Horticulturae*, 225, 781-785.
- Sun, X., Han, C., & Feng, X. (2020). Gibberellins and their role in grapevine development and fruit quality improvement: A review. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 41(1), 1-8
- Terol J., Tadeo F., Ventimilla D., Talon M. (2016). An RNA-Seq-based reference transcriptome for Citrus. *Plant Biotechnology Journal*.
- Torres, L., Oviedo, A., & Acevedo, J. (2019). Factores que influyen en la producción de limón persa (*Citrus latifolia Tanaka*) en el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz, México. *Revista Científica UDO Agrícola*, 19(3), 813-820.
- Woodward, A. W., & Bartel, B. (2005). Auxin: regulation, action, and interaction. *Annals of Botany*, 95(5), 707-735.

Yamaguchi, S. (2008). Gibberellin metabolism and its regulation. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 225-251.

3 EFECTO DEL ÁCIDO GIBERÉLICO EN LA PRODUCCIÓN DE LIMÓN PERSA (*CITRUS LATIFOLIA* T.) CALIDAD JAPÓN

3.1 Introducción

La citricultura en México es una de las actividades más importantes dentro del sector hortícola; se producen tres especies de limón: limón persa (*Citrus latifolia*), limón mexicano o agrío (*Citrus aurantifolia*) y en menor proporción limón italiano (*Citrus lemon*) (Corrales & Lozano, 2003; SIAP, 2022). México es el segundo exportador de limón persa con 12.29 % del valor de las exportaciones a nivel mundial,

En promedio, un árbol de limón persa cultivado con adecuadas prácticas agronómicas produce de manera natural aproximadamente el 80 % de frutos calidad Estados Unidos de América (EUA), 10 % calidad Francia y sólo un 2 % calidad Japón (Curti *et al.*, 2000); como puede observarse, la proporción de producción natural de la calidad Japón es muy baja; esto es importante debido a que, Según el SIAP, en 2022 el 95 % de la exportación de limón correspondió al limón persa, siendo el mercado japonés el que generó un mayor margen de ganancia gracias a su mejor cotización (Maya C., 2017).

Los frutos con calidad exportable deben reunir atributos físicos visibles en el epicarpio cuyas características de calidad deben ser: alto porcentaje de superficie color verde oscuro y alta rugosidad, además el fruto debe encontrarse sin manchas ni laceraciones y en estado de madurez adecuado, estos atributos pueden variar de acuerdo con el mercado de exportación, teniendo como el más exigente al mercado japonés (Curti *et al.*, 2000; Corrales-García *et al.*, 2009).

Además, la calidad de frutos de limón persa exigida por el mercado japonés consiste en frutos de gran tamaño, por lo que, en las empacadoras, para este

mercado se manejan las siguientes categorías: 32 - 36, 40 - 48 y 52 - 54 frutos por caja de 4.53 Kg (Corrales-García *et al.*, 2009).

Las fitohormonas son moléculas orgánicas que en pequeñas concentraciones regulan la expresión de genes implicados en el crecimiento y desarrollo vegetal; éstas pueden ser sintetizadas en diferentes órganos de la planta y su acción varía en función de los cambios ambientales que modifican la expresión génica del organismo, por lo cual tienen un impacto prominente en el desarrollo y productividad de las plantas (Damam *et al.*, 2016; Gouda *et al.*, 2018). Mediante los avances en la biotecnología, se han sintetizado reguladores de crecimiento que pueden imitar el rol de las fitohormonas, uno de ellos es el AG₃, el cual tiene una gran relevancia en el desarrollo de tejidos, como lo pueden ser la elongación de raíces, hojas jóvenes, floración, frutos, entre otros procesos vegetales (Gupta *et al.*, 2013; George *et al.*, 2008).

En estudios previos se ha reportado que la aplicación de AG₃ en árboles productores de cítricos, contribuye a reducir el número de flores formadas y aumenta la generación de frutos de mejor tamaño bajo condiciones de estrés climático (Sanches *et al.*, 2001). Asimismo, en investigaciones con otras variedades de limón, se ha reportado que la aplicación postcosecha de este regulador de crecimiento contribuye a reducir las pérdidas de peso y cambios de color en los frutos almacenados (Álvarez-Armenta *et al.*, 2010).

En cuanto a manejo agronómico, Corrales-García *et al.* (2009) encontraron que, en general, las condiciones de cultivo que en la zona de producción de Martínez de la Torre, Veracruz favorecen un mayor volumen de producción de frutos con calidad Japón son: sistema de plantación en cuadro o rectángulo, con distancias entre árboles de 6 m x 6 m o 6 m x 5 m, y una densidad de 316 árboles por ha, tres aplicaciones de plaguicidas y fungicidas por año (diferentes dosis), tres aplicaciones de fertilizantes y dos podas: una de formación o de sanidad y la otra de aclareo central.

De acuerdo con la información presentada anteriormente, se tiene conocimiento acerca del tipo de manejo agronómico que favorece la producción de limón persa

con calidad Japón, así como la respuesta que presenta otra variedad de limón ante la aplicación de AG₃. Sin embargo, se desconoce del efecto del AG₃, en diferentes dosis, número de aplicaciones y tiempos de aplicación para lograr aumentar el número de frutos exigidos por el mercado japonés y los parámetros físicos que deben cumplir estos frutos.

El presente trabajo aporta avances respecto a la caracterización física y de contenido total de clorofilas de frutos de limón persa calidad Japón y los efectos del AG₃ sobre las características y producción del limón persa calidad Japón, estos avances representan una investigación exploratoria que desempeña un papel fundamental para futuras investigaciones en beneficio de los productores y sus ingresos, con la finalidad de proporcionar una serie de recomendaciones enfocadas a aumentar la proporción de frutos que cumplen con los estándares exigidos por el mercado japonés.

El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de aplicaciones precosecha de AG₃ a diferentes concentraciones y momentos de cosecha en la producción de frutos de limón persa calidad Japón y caracterizar el contenido total de clorofilas ($\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$), grosor de cáscara (mm), diámetro ecuatorial y polar (mm), ángulo de tono (°) y peso (g) de frutos de limón persa que cumplen con los estándares exigidos por el mercado japonés.

3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Sitio de estudio, muestreo y aplicación de tratamientos de ácido giberélico

La presente investigación se llevó a cabo en el Rancho “El Relicario”, el cual está enfocado en la producción de limón persa para exportación, es propiedad de la empresa “Cítricos SaaO C.V®” y está ubicado en Tlapacoyan, Veracruz, México, sus coordenadas geográficas son “20°01'38.4"N 97°08'14.8"W”. El rancho El Relicario se sitúa a una altitud de 120 metros sobre el nivel del mar (msnm) y abarca una extensión de alrededor de 70 hectáreas. Esta área destaca por su

clima cálido y húmedo, con una temperatura promedio anual de 25°C y una precipitación promedio de 2,000 mm al año (SIAP, 2022).

La identificación del productor y del huerto, la selección de los árboles y la recolección de las muestras estuvo a cargo del personal del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) de Veracruz.

Dentro del rancho fueron seleccionados 54 árboles a los cuales se le asignó 18 tratamientos, cada tratamiento estaba conformado por tres unidades experimentales (tres repeticiones), cada unidad experimental fue un árbol. Los tratamientos se agruparon e identificaron con letras de acuerdo a los días de aplicación antes de cosecha como se puede observar en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Asignación de tratamientos aplicados en esta investigación.

Tratamiento	Grupo de tratamientos	Días de aplicación antes de cosecha	Número de aplicaciones	Dosis de AG_3
1	A	45	1	0 ppm
2		45	1	10 ppm
3		45	1	50 ppm
4	B	30	1	0 ppm
5		30	1	10 ppm
6		30	1	50 ppm
7	C	15	1	0 ppm
8		15	1	10 ppm
9		15	1	50 ppm
10	D	45 y 30	2	0 ppm
11		45 y 30	2	10 ppm
12		45 y 30	2	50 ppm
13	E	45 y 15	2	0 ppm
14		45 y 15	2	10 ppm
15		45 y 15	2	50 ppm
16	F	30 y 15	2	0 ppm
17		30 y 15	2	10 ppm
18		30 y 15	2	50 ppm

Fuente: Elaboración propia.

Se seleccionaron los árboles cuyos frutos tenían aproximadamente un diámetro de 10 mm en el momento de la primera aplicación; el AG_3 se obtuvo del producto

comercial conocido como Activol 40 (BioSciences Valent®, E.U.A); la preparación de las dosis se hizo de acuerdo a las indicaciones del fabricante. El AG₃ se combinó con un coadyuvante adherente comercial (marca MEZFER® Guadalajara, Jalisco, México), y se aplicó con un aspersor tipo mochila con motor de dos tiempos (marca GIMEX®, México).

Las aplicaciones de AG₃ se hicieron durante los meses de febrero y marzo de 2023 a cielo abierto, alrededor de las 9:30 AM en días soleados con baja probabilidad de lluvia. Para la evaluación de los resultados, se recolectaron los frutos de los árboles tratados. Dichas muestras se obtuvieron a las 9 horas del día 17 de marzo de 2023; cada árbol se descargó de manera manual e independiente en una canasta de campo rotulada con su respectivo tratamiento y número de repetición, posterior a ello se llevó a cabo la evaluación y pesaje de los frutos de cada árbol. La evaluación consistió en separar los frutos destinados al mercado japonés y registrar su peso. Finalmente, se procedió a tomar una muestra al azar de 9 frutos calidad Japón por árbol. Las muestras se transportadas durante 7 horas por carretera, para ser almacenados en una cámara frigorífica a una temperatura de $10\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5$ y una humedad relativa de $90\% \pm 2$; las condiciones de temperatura y humedad relativa fueron controladas con un data logger (marca Testo SE & Co., Alemania).

3.2.2 Análisis estadístico

El diseño de tratamientos fue un diseño completamente al azar, la asignación de tratamientos a unidades experimentales se realizó de manera aleatoria, (18 tratamientos) con 3 unidades experimentales cada uno, es decir 3 repeticiones; cada unidad experimental fue un árbol. El análisis estadístico fue realizado en R v.3.6.3 a 64 bits. Se comprobó la normalidad de los datos mediante la prueba de Shapiro-Wilk, se realizó un análisis de varianza (ANOVA), se realizó una comparación de medias múltiple (Tukey) y por último se realizó una prueba de independencia residual Durbin-Watson.

3.2.3 Caracterización de los frutos de limón persa calidad Japón

Las características físicas y el contenido de clorofila total fueron determinadas en 162 frutos que cumplieron con los estándares de calidad Japón, sin distinción de tratamientos, teniendo únicamente en cuenta la evaluación previa de los frutos. Las variables físicas evaluadas fueron: peso (g), diámetro ecuatorial y polar (mm), grosor de cáscara (mm) (vernier digital marca Mitutoyo modelo CD-6" CSX, Kanagawa, Japón). El color de la cáscara de los frutos, se midió utilizando un colorímetro (Hunter-Lab® MiniScan EZ, MSEZ-4500L, USA) con geometría 45/0 referido al iluminante D65 y ángulo de visión 10°, se midieron las dimensiones a^* y b^* y se calculó el parámetro HUE, siguiendo la fórmula planteada por McGuire, (1992). La cuantificación de clorofilas totales ($\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) se determinó mediante el método espectrofotométrico propuesto por Lichtenthaler (1987). El pericarpio se mezcló con metanol al 90% en relación 1:20 (p/v). Las clorofilas fueron extraídas por agitación en vórtex (10 minutos a 3000rpm), sonicación (Cole-Parmer®, 8890, Vernon Hills, USA) durante 15 minutos, y finalmente, agitación en vórtex (10 minutos a 3,000 rpm). En una microplaca de 96 pozos se transfirieron 200 μL de cada extracto y se midieron las absorbancias un lector de microplacas marca Biotek®, (Sinergy 2, Vermont, USA) a 652 nm y 665 nm para la obtención de las clorofilas a y b. La clorofila total se calculó de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$C_{total} = \frac{(0.28 A_{665} + 27.64 A_{652}) * V}{m} * 100$$

Dónde: A es la absorbancia a 665 y 652 nm; V = es el volumen en litros de metanol al 90% y m= es el peso en gramos de la muestra en base fresca.

Cada una de las pruebas se hizo por triplicado y los resultados se reportaron como la media con su respectiva desviación estándar.

3.3 Resultados y discusión

De manera general, se observó que las dosis de AG₃ aplicadas en los árboles de limón persa, con las condiciones de cada tratamiento (Figura 1), coadyuvaban al aumento de la producción de limones que cumplieron con las características físicas atribuidas a frutos calidad Japón; siendo los árboles que recibieron una concentración de 10 ppm de AG₃ con las condiciones del tratamiento C y B los que mostraron una producción mayor y estadísticamente significativa en comparación con los árboles testigo, teniendo una producción total de 2.45 kg para el tratamiento C y 2.2 kg de frutos con calidad Japón para el tratamiento B. Los árboles a los cuales se les aplicó una dosis de 50 ppm de AG₃, con las condiciones del tratamiento C, también mostraron un aumento en la producción de frutos calidad Japón, de los cuales se obtuvieron 1.8 kg. En contraste, la producción total de limones calidad Japón, obtenida de los árboles testigos, fue de 1.2 kg para el tratamiento C y 0.71 kg para el tratamiento B. Los valores de peso de frutos con calidad Japón determinados en el presente estudio coinciden con los observados en maracuyá (Paya Herrera *et al.*, 2021), quien reportó diferencias significativas en el peso de la pulpa y porcentaje de acidez de los frutos de maracuyá que fueron tratado con una dosis de 75 ppm de AG₃.

En producción de naranja Fidelibus *et al.* (2002), encontró que aplicar AG₃ por aspersión al follaje de las plantas retrasó el cambio de color de verde a amarillo de los frutos de naranja 'Hamlin', 'Pineapple' y 'Valencia', los cuales presentaron una coloración más verde y una cáscara con mayor resistencia a los daños por punción, en relación con los frutos de los árboles testigo. Para lima mexicana con aplicaciones de AG₃ y ácido glutámico, se reportaron diferencias significativas respecto a índice de color (Ariza Flores *et al.*, 2017) y diámetro del fruto, se mejoró el tamaño por fruto, pero no el rendimiento de los árboles tratados, es decir, obtuvieron menos frutos, pero de mejor tamaño (Gowan, 2002).

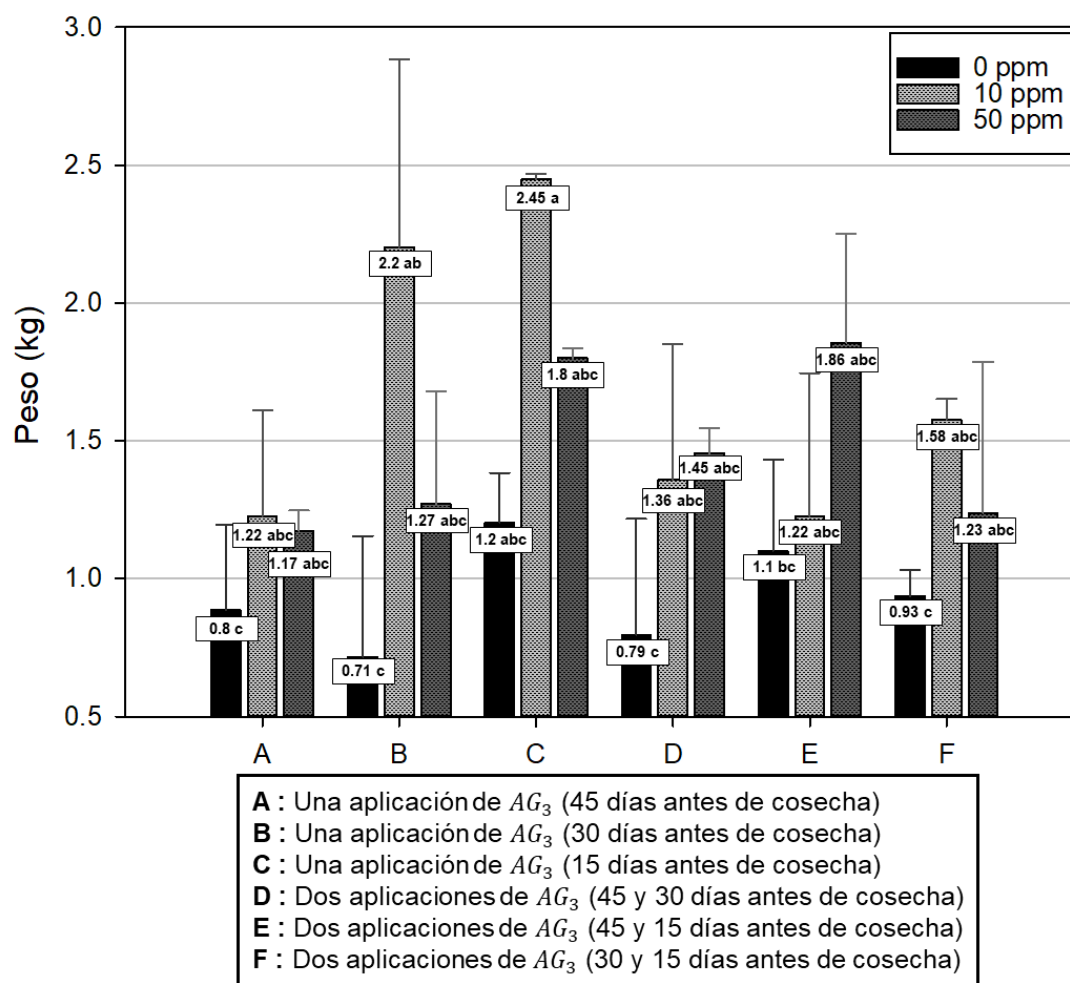
Los árboles a los cuales se les aplicó 10 ppm de AG₃ con las condiciones del tratamiento F, así como los árboles que se les aplicó 50 ppm de AG₃, con los

tratamientos D y E, no mostraron diferencias estadísticamente significativas en su producción.

Por último, los árboles que recibieron una aplicación de AG₃ 45 días antes de la cosecha (Tratamiento A), no mostraron diferencias significativas en su producción en contraste con los árboles testigo.

Una de las principales funciones del AG₃ es la señalización celular que regula el desarrollo de los frutos mediante el proceso bioquímico conocido como transducción; las células y los tejidos en un fruto perciben y responden a estas señales hormonales generadas por el AG₃, las cuales dan como resultado un incremento en el número de células y la longitud de las mismas (Taiz y Zeiger 2004).

Al respecto, Rademacher (2000), argumenta que el estímulo de crecimiento generado por parte del AG₃ es el resultado de la ampliación de la célula debido a la pérdida de firmeza de la pared celular lo cual cambia la presión del turgor dentro de la célula permitiendo así el crecimiento de la misma. Además, es importante destacar que la mayor acumulación de AG₃ ocurre en los tejidos jóvenes y es allí donde se produce la mayor biosíntesis de esta hormona (Bari y Jones 2009). Según Jomori *et al.*, (2003) la aplicación por aspersión de AG₃ tiene la capacidad de aumentar los niveles endógenos en la planta lo que podría explicar un crecimiento más acelerado de los frutos en las ramas fructíferas tratadas con AG₃.



Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales ($p < 0.05$).

Figura 6. Peso en kilogramos (kg) de frutos cosechados con calidad Japón en árboles que tuvieron una o dos aplicaciones de ácido giberélico (AG₃) en concentraciones de 0, 10 y 50 ppm en diferentes periodos (15, 30 o 45 días antes de cosecha).

Para la efectividad de las aplicaciones de AG₃ se deben considerar factores climáticos, etapa fenológica de la planta y dosificación, debido a que podrían generarse daños fisiológicos a la planta y malformaciones en los frutos (Paya Herrera *et al.*, 2021).

Kataoka *et al.* (2003), encontraron resultados positivos en frutos de tomate partenocárpico tratados con una dosis de 5 ppm de AG₃ en la época de antesis, favoreciendo el crecimiento del fruto. Según Coloma *et al.* (2017), las

aplicaciones de giberelinas son viables en pequeñas dosis para evitar la alteración de los ciclos de crecimiento de la planta y de los frutos. Por último, Zea-Hernández *et al.* (2016) evaluó una y dos aplicaciones precosecha de AG₃ en la calidad y vida de anaquel de tres variedades de limón mexicano, y concluyó que el tratamiento precosecha con este regulador de crecimiento y una dosis de 30 ppm presentó mejores resultados respecto a calidad de fruto y recomienda usar una única aplicación para minimizar costos. Estas investigaciones concuerdan con nuestros resultados, dónde los árboles tratados con una dosis de 10 ppm y una sola aplicación en proximidad al día de cosecha, generó mayor cantidad de frutos calidad Japón en comparación con los árboles tratados con una dosis de 50 ppm y lo árboles no tratados.

Aplicaciones de AG₃ directamente en las flores y frutos estimula el crecimiento y llenado de los mismos, reduciendo el número de frutos por árbol y la cantidad de semillas por fruto, pero aumentando la cantidad de pulpa, y con ello el tamaño promedio por fruto (Ortega *et al.*, 2013; Coloma (2017); Pichardo *et al.*, 2018).

El AG₃ es muy utilizado en el caso de la exportación, y su modo de acción es retrasar la senescencia de la fruta porque es antagónico al etileno. Incluso en frutos no climatéricos, como la lima 'Tahití', el etileno producido en bajas concentraciones parece regular el proceso de senescencia (Jomori *et al.*, 2003).

En el Cuadro 2 se muestran las medias de los parámetros poscosecha evaluadas en laboratorio para la caracterización de los frutos que cumplen con los estándares exigidos por el mercado japonés, en cuanto a los atributos físicos y de contenido total de clorofilas de los limones producidos por árboles tratados con AG₃ y los frutos de los árboles testigo.

Cuadro 2. Parámetros físicos y contenido total de clorofila de frutos de limón persa cosechados en árboles con diferentes tratamientos de ácido giberélico (AG₃) o no tratados.

Parámetro	Frutos de limón persa que cumplen con los estándares de calidad Japón
Masa (g)	123.44 ± 11.21
Tono (°)	118.49 ± 2.30
Diám. Ecuat. (mm)	58.72 ± 2.40
Diám. Polar (mm)	71.35 ± 3.93
Grosor cáscara (mm)	2.85 ± 0.45
Clorofilas totales (mg · 100 g ⁻¹)	11.21 ± 1.77

Se reporta la media con su respectiva desviación estándar.

Se observó que los frutos clasificados como calidad Japón (Figura 2) presentaron coloración verde intensa y uniforme, además, mostraron valores superiores respecto a tamaño promedio de fruto, en comparación con los datos reportados por Curti-Díaz *et al.*, (2012) para frutos calidad exportación EEUU (70 % o más de superficie de color verde, menos de 10 % de daños y no sobre madurados con turgencia y rugosidad visibles), dónde nos indican que el peso promedio por fruto es de 87.67 g, y los calibres dominantes fueron 230, 200 y 175, cuyas frutas tienen en promedio 55 mm diámetro ecuatorial; en contraste con los 58.72 mm de diámetro ecuatorial y 123.4 g de peso promedio por fruto reportados en la presente investigación.

Este estudio es el primer reporte acerca de los efectos de aplicaciones de AG₃ en la producción de frutos de limón persa calidad Japón; los árboles que recibieron dosis de AG₃ presentaron un efecto positivo en su producción de frutos para el mercado japonés, específicamente en los que recibieron una única aplicación con una dosis de 10 ppm, 30 o 15 días antes de cosecha.



Figura 7. Fotografía de frutos de limón persa calidad Japón.

Para futuras investigaciones, se recomienda ampliar el alcance del estudio evaluando un rango más amplio de concentraciones, un mayor número de árboles y considerando varias cosechas consecutivas; ya que esto permitirá una evaluación más completa y con ello determinar cuál es la mejor combinación de variables para optimizar los resultados.

3.4 Bibliografía

- Álvarez-Armenta, R., Saucedo-Veloz, C., Chávez-Franco, S., Medina-Urrutia, V., Colinas-León, M. T., & Báez-Sañudo, R. (2010). Aplicación de ácido giberélico en precosecha y cera en poscosecha a frutos de limón mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1(1), 95-100.
- Ariza Flores, R., Barrios Ayala, A., Herrera García, M., Barbosa Moreno, F., Michel Aceves, A., Otero Sánchez, M. A., & Tejacal, I. A. (2017). Fitohormonas y bioestimulantes para la floración, producción y calidad de lima mexicana de invierno. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(7).
- Bari, R. y Jones, J. 2009. Role of plant hormones in plant defence responses. *Plant Molecular Biology*, 69:473–488.
- Coloma, J., 2017. *Efecto de fitohormonas para la floración en el cultivo de maracuyá (Passiflora edulis)*. Tesis de grado. Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Agrarias. Ecuador
- Corrales, G. J. y E. Lozano L., (2003) *Situación y perspectivas del sistema agroindustrial limón persa en Martínez de la Torre*, Ver. IV Congreso Internacional "Las cadenas agroalimentarias de Hortalizas, Frutas y flores en América Latina". Guadalajara, Jalisco, México.
- Corrales, G. J.; Cruz, C. J.; Lozano, L. E.; Famiani, F., (2009) Condiciones tecnológicas de huertas de Lima Persa (*Citrus Latifolia* Tan.) para el mercado japonés en Veracruz, México. *J. Agric. Universidad de Puerto Rico* 93(1-2): 143-147.
- Curti, D.; Loredó, S.; Díaz, Z.; Sandoval, J.; Hernández, J. (2000). *Tecnología para producir Limón Persa*. INIFAP–CIRGOC. Campo Experimental Ixtacuaco. Libro técnico No. 8. Veracruz, México. 144 p.
- Curti-Díaz, S. A., Hernández-Guerra, C., & Loredó-Salazar, R. X. (2012). Productividad del limón persa injertado en cuatro portainjertos en una huerta comercial de Veracruz, México. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 18(3), 95-104.
- Damam, M., K. Kaloori, B. Gaddam, & R. Kausar (2016). Plant growth promoting substances (phytohormones) produced by rhizobacterial strains isolated from the rhizosphere of medicinal plants. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*. 37: 130-136.
- Fidelibus, M. W.; Davies, F. S. and Campbell, C. A. 2002. Gibberellic acid application timing affects fruit quality of processing oranges. *Sci. Hort.* 37(2):353-357.
- George, E. F., Hall, M. A., & Klerk, G.-J. D. (2008). Plant Growth Regulators I: Introduction; Auxins, their Analogues and Inhibitors. *Plant Propagation by Tissue Culture*, 175–204. doi:10.1007/978-1-4020-5005-3_5

- Gouda, S., R. G. Kerry, G. Das, S. Paramithiotis, H. S. Shin, & J. K. Patra. 2018. Revitalization Of Plant Growth Promoting Rhizobacteria For Sustainable Development In Agriculture. *Microbiological Research* 206: 131-140.
- Gowan. 2002. *Diccionario de Especialidades Agroquímicas*. División Agrícola. Mexicali, B. C. México.
- Gupta, R., & Chakrabarty, S. K. (2013). Gibberellic acid in plant: still a mystery unresolved. *Plant signaling & behavior*, 8(9), e25504.
- Jomori, M. L. L., Kluge, R. A., Jacomino, A. P., & Tavares, S. (2003). Conservação refrigerada de lima ácida "Tahiti": uso de 1-metilciclopropeno, ácido giberélico e cera. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 25(3).
- Kataoka, K., Uemachi, A. y Yazawa, S. 2003. Fruit growth and pseudoembryo development affected by uniconazole, an inhibitor of gibberellin biosynthesis, in pat-2 and auxin-induced parthenocarpic tomato fruits. *Scientia Horticulturae* 98: 9-16.
- Lichtenthaler, H. K. 1987. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*. 148(C), 350-382.
- Maya Ambía, C. J. (2017). *Cítricos mexicanos en el mercado japonés: experiencias y oportunidades para Sinaloa. México y la cuenca del Pacífico*, 16, 107-142. Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Sociales y Humanidades, Departamento de Estudios del Pacífico.
- McGuire, R. G (1992). Reporting of objective color measurements. *HortScience*, 21(12) 1254-1255.
- Ortega Martínez, L., Ocampo Mendoza, J., Martínez Valenzuela, C., Pérez Serrano, A., Sánchez Olarte, J., 2013. Efecto de las giberelinas sobre el crecimiento y calidad de plántulas de tomate. *BIOtecnia*, 15(3), 56.
- Paya Herrera, L. D., Perdomo Medina, D., & Quinchoya Penna, D. K. (2021). Efecto de la aplicación de la hormona Giberelina en el crecimiento y desarrollo del cultivo de Maracuyá (*Passiflora edulis*) establecido en la vereda Fátima del municipio de La Plata, Huila. *Ingeniería y Región*, 25.
- Pichardo, J., Guevara, L., Gonzales, L., 2018. Efecto de las Giberelinas n el rendimiento de chile Jalapeño (*Capsicum annum* L.). *Revista Mexicana de ciencias agrarias*, 9(5).
- Rademacher, W. 2000. Growth retardants: effects on gibberellin biosynthesis and other metabolic pathways. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 51: 501–531.s.eu/
- Sanches, F. R., Leite, I. C., & Castro, P. R. D. C. E. (2001). Efeito do Ácido Giberélico (AG₃) na floração e produção da lima ácida "Tahiti" (*Citrus latifolia* Tan.). *Revista Brasileira de Fruticultura*, 23(3).

- SIAP. (2022). *Estadísticas Agroalimentarias*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Taiz, L. y Zeiger, E. 2004. *Fisiologia vegetal*. 3 edição. Porto alegre – Artmed, p. 613-641.
- Zea-Hernández, L. O., Saucedo-Veloz, C., Cruz-Huerta, N., Ramírez-Guzmán, M. E., & Robles-González, M. M. (2016). Evaluación de aplicaciones precosecha de ácido giberélico en la calidad y vida de anaquel de tres variedades de limón mexicano. *Revista Chapingo, Serie Horticultura* (Vol. 22, Issue 1).