



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
CHAPINGO**



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

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

**SILICIO Y FOSFITOS EN LA MORFOLOGÍA, ANATOMÍA Y
ESTADO NUTRIMENTAL DE *Citrus latifolia* EN SUELOS
ÁCIDOS.**

TESIS

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

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

PRESENTA

LILIANA TORRES RUEDA

BAJO LA DIRECCIÓN DE

DR. ROGELIO CASTRO BRINDIS

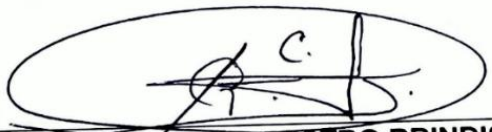
Chapingo, Estado de México, diciembre de 2025.



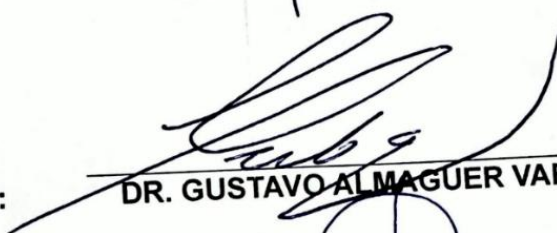
**SILICIO Y FOSFITOS EN LA MORFOLOGÍA, ANATOMÍA Y ESTADO
NUTRIMENTAL DE *Citrus latifolia* EN SUELOS ÁCIDOS.**

Tesis realizada por **Liliana Torres Rueda** bajo la supervisión del comité asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA


DIRECTOR: **DR. ROGELIO CASTRO BRINDIS**


ASESOR: **DR. JUAN AYALA ARREOLA**


ASESOR: **DR. GUSTAVO ALMAGUER VARGAS**


ASESOR: **DR. ANTONIO VÁZQUEZ ALARCÓN**

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	2
Objetivos específicos	2
1.2. HIPÓTESIS	2
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Importancia mundial y nacional del limón persa	3
2.1. La acidez de los suelos	3
2.2. Silicio en plantas.....	5
2.3. Fosfitos en plantas.....	7
3. MORFOLOGÍA Y ESTADO NUTRIMENTAL BAJO APLICACIONES FOLIARES DE SILICIO Y FOSFITO DE <i>Citrus x latifolia</i> 'Persa'.....	9
3.1. MATERIALES Y MÉTODOS	9
3.1.1. Ubicación.....	9
3.1.2. Material Vegetal.....	10
3.1.3. Unidad y diseño experimental	11
3.1.4. Diseño de tratamientos.....	11
3.1.5. Manejo experimental	11
3.1.6. Variables evaluadas	12
3.1.7. Análisis estadístico	15
3.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	16

3.2.1.	Análisis de varianza de parámetros morfológicos	16
3.2.2.	Análisis de varianza de concentración nutrimental.....	17
3.2.3.	Comparación de medias de parámetros morfológicos	18
3.2.4.	Comparación de medias de concentración nutrimental.....	21
3.2.5.	Correlación lineal.....	23
4.	ANATOMÍA DE LA CÁSCARA DEL FRUTO BAJO APLICACIONES FOLIARES DE SILICIO Y FOSFITO DE <i>Citrus x latifolia</i> 'Persa'.....	27
4.1.	MICROSCOPIA DE CORTES HISTOLÓGICOS.....	27
4.1.1.	Recolecta y fijación de material vegetal	27
4.1.2.	Deshidratación y procesamiento de muestras.....	28
4.1.3.	Unidad y diseño experimental	30
4.1.4.	Análisis estadístico	30
4.2.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
5.	CONCLUSIONES	37
6.	LITERATURA CITADA.....	38
7.	ANEXO.....	48

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características físicas y químicas del suelo en el sitio que se encuentra el cultivo de limón persa, Huimanguillo, Tabasco, México.	10
Cuadro 2. Tratamientos y concentración, aplicados a <i>Citrus x latifolia</i> 'Persa' en suelos ácidos.	11
Cuadro 3. Análisis de varianza para parámetros morfológicos de <i>Citrus x latifolia</i> 'Persa' bajo la aplicación foliar de silicio y fosfitos.	16
Cuadro 4. Análisis de varianza concentración nutrimental de hoja y fruto de <i>Citrus x latifolia</i> 'Persa' bajo la aplicación foliar de silicio y fosfitos.	17
Cuadro 5. Comparación de medias de parámetros morfológicos de <i>Citrus x latifolia</i> 'Persa' bajo la aplicación foliar de silicio y fosfitos.	20
Cuadro 6 Comparación de medias para la concentración mineral de hoja y fruto de <i>Citrus x latifolia</i> 'Persa' bajo la aplicación foliar de silicio y fosfitos.	22
Cuadro 7. Relación de bases catiónicas en hoja y fruto de <i>Citrus x latifolia</i> 'Persa' bajo aplicación foliar de silicio y fosfito en suelos ácidos.	23
Cuadro 8. Comparación de medias del grosor de las zonas que conforman la cáscara del fruto de <i>Citrus x latifolia</i> 'Persa' por el efecto de la aplicación foliar de silicio y fosfito. Huimanguillo, Tabasco 2025.	32
Cuadro 9. Comparación de medias de cuantificación de cristales en hoja y fruto de <i>Citrus x latifolia</i> 'Persa' bajo aplicaciones de fosfitos y silicio.	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica de “Rancho don Pastor”, Huimanguillo, Tabasco.	9
Figura 2. Imágenes fotográficas de cortes transversales del fruto de Citrus x latifolia 'Persa' fotografiados a bajo aumento, donde se aprecian diferencias en el grosor de la superficie ocupada por las zonas del flavedo(f), albedo (al) y endocarpio (en), bajo diferentes tratamientos A) testigo, B) silicato de potasio y C) fosfito de calcio.	32
Figura 3. Corte transversal en fruto de Citrus x latifolia 'Persa' procesadas en parafina de acuerdo Lester y Horner (2000), bajo diferentes tratamientos A1: flavedo del testigo, A2: albedo del testigo, B1: flavedo con aplicación de silicato de potasio, B2: albedo con aplicación de silicato de potasio, C1: flavedo con aplicación de fosfito de calcio, C2: albedo con aplicación de fosfito de calcio, e: epidermis constituida de 2 a 3 capas, f: clorénquima; co: cavidad oleífera; cl: clorénquima laminar colindante con la zona del albedo, pe: parénquima esponjoso, solo presente en albedo, hv: haz vascular presentes tanto en zona de flavedo y albedo, en: endocarpio.	34
Figura 4. Cortes trasversales de fruto de Citrus x latifolia 'Persa' procesadas en parafina de acuerdo Lester y Horner (2000), bajo la aplicación foliar de diferentes tratamientos. A) testigo, B) silicato de potasio, C) fosfito de calcio. Zona resaltada indica la presencia de cristales. Figura sin escala.	35
Figura 5 Vistas paradermales de hoja de Citrus x latifolia 'Persa' procesadas en parafina y aclaradas de acuerdo Lester y horner (2000). A1) corte transversal en hoja testigo, A2) hoja aclarada del testigo, B1) corte transversal con aplicación de silicato de potasio, B2) hoja aclarada con aplicación de silicato de potasio, C1) corte transversal con aplicación de fosfito de calcio, C2) hoja aclarada con aplicación de fosfito de calcio. Zona resaltada indica la presencia de cristales.	36

AGRADECIMIENTOS

A la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SCIHTI)**, por brindarme el financiamiento para la realización de mis estudios de maestría.

A la **Universidad Autónoma Chapingo** y al instituto de Horticultura por abrirme sus puertas y proporcionarme un entorno académico de excelencia para mi formación como maestrante.

Al Dr. **Rogelio Castro Brindis**, mi más sincero agradecimiento por su compromiso, dedicación y guía constante durante el desarrollo de este proyecto. Mas allá de su excelente labor como director, agradezco profundamente la amistad tan bonita que se formó a lo largo de este camino.

Al Dr. **Juan Ayala Arreola**, por ser mucho más que un asesor académico: un verdadero amigo. Su apoyo profesional y académico fue invaluable, pero aún más lo fue su respaldo personal en momentos decisivos.

Al Dr. **Gustavo Almaguer Vargas**, por compartir su experiencia como experto en el tema y enriquecer este trabajo de manera significativa y al Dr. **Antonio Vázquez Alarcón**, facilitarme sus laboratorios, equipos y personal técnico, así como el tiempo que dedicó a orientarme y enseñarme.

A la **M.C. Teresa Cervantes**, agradezco profundamente su disposición para compartir su conocimiento y guiarme en un área nueva para mí.

A **Rosario Genaro**, por su apoyo que trascendió lo académico, ha sido una amiga entrañable y una tía de corazón para mi hijo y para mí. Gracias por su entrega, paciencia y apoyo constante.

Al Ing. **Victor López Hernández**, mi esposo, por acompañarme con amor, paciencia y apoyo incondicional.

Al Ing. **Victor Lopez Andrade**, Por su generosidad y facilitarme el espacio necesario para realizar parte importante de esta investigación. Agradezco profundamente su ayuda y el respaldo que me ofreció en todo momento.

A Berenice Hernández, Víctor Vivar, Pablo Espejel, Javier Vega, Elizabeth Gaytán, Dennis reyes, Alan Rodríguez, Marla Juquila, Fernanda Ríos, Mariana Torres, Eliud Rodríguez, Lizbeth Lozoya, Germain Carlos y David Sánchez por su valiosa colaboración, disposición y acompañamiento a lo largo de este proyecto. Cada uno, con su apoyo y aportaciones, contribuyó de manera significativa al desarrollo de esta investigación. Y por su sincera amistad.

A la empresa **VADAGRI** por su apoyo y colaboración en este proyecto.

DEDICATORIA

A mi hijo, **Victor Damián**, que convirtió los laboratorios en su segundo hogar sin pedirlo. Con su ternura lleno de vida los pasillos y transformo cada día de trabajo en un recordatorio de amor y fortaleza. Gracias por ser mi motor más puro, mi alegría más grande y la razón más hermosa para no rendirme.

A mi esposo, **Victor Lopez**, por caminar a mi lado con amor, apoyo y comprensión. Gracias por sostenerme en los días difíciles y celebrar cada pequeño logro.

A mis padres, **Jesús y Emma**, por enseñarme el valor del esfuerzo y la disciplina. Gracias por creer en mi incluso cuando yo dudaba, por su apoyo inquebrantable y por el amor que me sostiene siempre.

A mis suegros, **Victor y Violeta**, por su cariño, su respaldo y por recibirme como parte de su familia. Gracias por su apoyo en los momentos en que más lo necesito.

A mis hermanas, **Mariana y Fernanda**, por sus palabras de aliento, su compañía y el apoyo que me dan siempre, gracias por estar presentes, aun en la distancia, con amor y fuerza.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre	Liliana Torres Rueda
Fecha de nacimiento	01 de julio de 1999
Lugar de nacimiento	Durango, Durango, México.
CURP	TORL990701MDGRDL05
Profesión	Agrónoma en Horticultura Protegida
Cedula profesional	14950095



Desarrollo académico

Licenciatura	2018-2022. Universidad Autónoma Chapingo
Preparatoria	2015-2018. Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Chapingo.
Secundaria	2011-2014. Escuela Secundaria General Profesor Constantino Carcaño Reyes, Durango.

RESUMEN GENERAL

SILICIO Y FOSFITOS EN LA MORFOLOGÍA, ANATOMÍA Y ESTADO NUTRIMENTAL DE *Citrus latifolia* EN SUELOS ÁCIDOS.

Los cítricos son mundialmente uno de los cultivos frutales más importantes, México es el segundo productor mundial, y Tabasco figura como el octavo productor nacional. La sabana de Huimanguillo, Tabasco presenta suelos ácidos que influye directamente en el transporte nutrimental provocando cambios visibles en la morfología y anatomía de los cítricos. La aplicación foliar de silicio y fosfito resulta una alternativa de bioestimulación, ya que son capaz de atenuar el estrés abiótico mediante la combinación de mecanismos físicos y bioquímicos, mejorar absorción y asimilación de nutrientes y calidad de frutos. El objetivo de la presente investigación fue evaluar componentes morfológicos, anatómicos y nutrimentales de *Citrus x latifolia* 'Persa', en función del suministro foliar de dos fuentes de silicio y dos fuentes de fosfito en etapa productiva en suelos ácidos. Se llevó a cabo en Huimanguillo, Tabasco, México, en plantas productivas de limón persa de 4 años. La unidad experimental constó de tres plantas, de las cuales se tomó la planta central para el registro de datos. El diseño experimental utilizado fue cuadro latino con 5 repeticiones. Además, se realizó microscopia de los cortes histológicos. El cuajado de fruto se favoreció por la aplicación de silicato y fosfito de calcio, aumentando 14.3 % y 13.8 % respectivamente, además el fosfito de calcio aumentó 11.6 % el peso fresco de fruto ($P \leq 0.05$). La concentración de calcio en hoja aumentó en un 0.18 % en las hojas asperjadas con fosfito de potasio ($P \leq 0.05$) y en fruto aumento 0.17 % en silicato de calcio ($P \leq 0.05$). El silicato de potasio disminuyó el espesor de la epidermis y albedo de fruto ($P \leq 0.05$) y formo de 1 a 4 capas más que el testigo de colénquima laminar intercalado con colénquima lagunar.

Palabras clave: bioestimulante, nutrición, anatomía, limón persa.

ABSTRACT

SILICON AND PHOSPHITES IN MORPHOLOGY, ANATOMY AND NUTRITIONAL STATE OF *Citrus latifolia* IN ACID SOILS.

Citrus fruits are one of the most important fruit crops worldwide. Mexico is the second largest world producer, and Tabasco ranks as the eighth largest domestic producer. The savanna of Huimanguillo, Tabasco, has acidic soils that directly influence nutrient transport, causing visible changes in the morphology and anatomy of citrus trees. Foliar application of silicon and phosphite is a biostimulation alternative, as it can mitigate abiotic stress through a combination of physical and biochemical mechanisms, improving nutrient absorption and assimilation, and enhancing fruit quality. The objective of this research was to evaluate the morphological, anatomical, and nutritional components of *Citrus x latifolia* 'Persa'. This study, conducted in Huimanguillo, Tabasco, Mexico, focused on the foliar application of two silicon sources and two phosphite sources during the productive stage in acidic soils. The experiment was carried out on four-year-old Persian lime trees. The experimental unit consisted of three plants, with the central plant used for data collection. The experimental design consisted of a latin square design with five replicates. Additionally, microscopy of the histological sections was performed. Fruit set was enhanced by the application of calcium silicate and calcium phosphite, increasing fruit set by 14.3% and 13.8%, respectively. Calcium phosphite also increased fruit fresh weight by 11.6% ($P \leq 0.05$). The concentration of calcium in leaves increased by 0.18% in leaves sprayed with potassium phosphite ($P \leq 0.05$), and in fruit it increased by 0.17% in those treated with calcium silicate ($P \leq 0.05$). Potassium silicate decreased the thickness of the epidermis and albedo of the fruit ($P \leq 0.05$) and in comparison, with the control, it formed 1 to 4 extra layers of lamellar collenchyma interspersed with spongy collenchyma.

Key words: biostimulant, nutrition, anatomy, Persian lime.

Thesis of Master of Science in Horticulture, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Liliana Torres Rueda

Thesis Advisor: Dr. Rogelio Castro Brindis.

1. INTRODUCCIÓN

Los cítricos son mundialmente uno de los cultivos frutales más importantes, esto debido a sus cualidades culinarias y sus derivados de procesamientos (Khan, Al-Yahyai y Al-Said, 2017). La producción mundial en 2023 de limas y limones fue de 26.06 millones de toneladas, de las cuales los tres principales países que destacan son India (14.5 %), México (12.4 %) y China (9.2 %), de acuerdo con La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2024).

El estado de Tabasco se destaca por ser el octavo productor a nivel nacional de limón persa, donde la producción se concentra principalmente en el municipio de Huimanguillo (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera de México [SIAP], 2024), en el cual predominan mayormente suelos ácidos, con fijación de fósforo, baja tasa de formación de amonio y nitratos, así como deficiencias de calcio, magnesio, potasio, zinc, boro y además un porcentaje alto de saturación de aluminio (Salgado et al., 2007). Aunque los cítricos son conocidos por su capacidad para prosperar en condiciones ácidas (Jiang et al., 2009), tales ambientes edáficos extremos, influyen directamente en el transporte nutrimental provocando cambios visibles en la morfología y anatomía del fruto de los cítricos (Salgado et al., 2017). En suelos ácidos, con alto contenido de aluminio, se limita el crecimiento foliar, induce cierre estomático, y reduce la fotosíntesis neta, además de combinarse el fósforo para formar complejos insolubles, así como generar una degradación de los pigmentos al crear especies reactivas al oxígeno y al nitrógeno (He et al., 2019).

La aplicación foliar de silicio y fosfito resulta una alternativa de bioestimulación para las plantas de *Citrus x latifolia*, ya que el silicio es capaz de atenuar el estrés abiótico en cítricos mediante la combinación de mecanismos físicos y bioquímicos (Mvondo-She et al., 2024), además de ayudar a mantener equilibrio hídrico en la planta (Mostofa et al., 2021), mejorar la eficiencia fotosintética (Rastogi et al, 2021) e impulsar la floración (de Souza et al., 2025), así como la calidad del cultivo (Costa et al., 2025). También, el fosfito mejora la absorción y

asimilación de nutrientes, tolerancia a estrés abiótico y calidad de frutos (Gómez y Trejo, 2015), además de aumentar el número de flores, cuajado, rendimiento, los sólidos solubles totales (Albrigo, 1999).

1.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar componentes morfológicos, anatómicos y nutrimentales de *Citrus x latifolia* 'Persa', en función del suministro foliar de dos fuentes de silicio y dos fuentes de fosfito en etapa productiva en suelos ácidos.

Objetivos específicos

- Determinar la respuesta en *Citrus x latifolia* 'Persa' a la aplicación de silicio bajo condiciones extremas de acidez del suelo, con el fin de comprender su influencia en el cuajado de frutos, así como la concentración nutrimental de la hoja y fruto.
- Evaluar el efecto del fosfito sobre la morfología y nutrición de *Citrus x latifolia* 'Persa', así como en los posibles efectos en la conformación anatómica de la cáscara del fruto en condiciones extremas de acidez de suelo.

1.2. HIPÓTESIS

La aplicación foliar de silicio y fosfito incrementa el cuajado, amarre, peso fresco y firmeza de fruto, así como la concentración mineral en hoja y fruto en plantas de *Citrus x latifolia* 'Persa' cultivadas en condiciones extremas de acidez, en comparación con plantas no tratadas. Además, estas aplicaciones generan cambios en la anatomía de la cáscara del fruto.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Importancia mundial y nacional del limón persa

La producción mundial en 2023 de limas y limones fue de 26.06 millones de toneladas, de las cuales los tres principales países que destacan son India (14.5 %), México (12.4 %) y China (9.2 %). En ese mismo año, México también se posicionó en segundo lugar, cultivando 210.7 mil toneladas (FAO, 2024).

El limón es el segundo cítrico más importante en nuestro país (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADER], 2018.), alcanzando una superficie establecida de limón en 2024 de 20 millones de hectáreas y una superficie cosechada de 19 millones de hectáreas (SIAP, 2025). Siendo los principales productores Michoacán, Veracruz, Colima, Oaxaca, Tamaulipas, Yucatán, Jalisco y Tabasco que registran el 89.4 % (SIAP, 2025). Con relación al limón persa, México cosecha aproximadamente 1.64 millones de toneladas, de las cuales el estado de tabasco ocupa el octavo lugar con una participación del 5.5 %, en el estado se destaca el municipio de Huimanguillo con una producción de 88.21 mil toneladas de limón persa, posicionándolo como el principal productor del estado (SIAP, 2025).

2.1. La acidez de los suelos

La acidificación del suelo es un proceso lento en condiciones naturales (Shi et al., 2019), provocada por la presencia de protones (H^+), los cuales tienen diversos orígenes en el suelo (Vázquez & Millán, 2017).

La acidez del suelo se origina de seis causas principales (Castellanos et al., 2000):

- a) Material parental según su reacción Al: $Ca + Mg + K$.
- b) Lixiviación de bases intercambiables del suelo.
- c) Remoción de Ca, Mg y K por los cultivos.
- d) Descomposición de la materia orgánica del suelo.
- e) Uso excesivo de fertilizantes (particularmente de reacción ácida).
- f) Lluvia ácida.

En regiones tropicales y subtropicales, la raíz del problema es por procesos genéticos naturales, los cuales provocan la pérdida de elementos esenciales (Hulugalle, 2006; Eppinger & Fuge, 2009; Vendrame et al., 2013), donde la lixiviación de bases como el calcio, magnesio y potasio es consecuencia de su alta precipitación pluvial (Castellanos et al., 2000), y temperaturas, además, el material se meteoriza intensamente y el silicio es lixiviado, junto con las bases (Vázquez & Millán, 2017).

Para que el proceso de lixiviación de bases se presente en los suelos, el drenaje positivo tiene un papel importante, ya que, la presencia de aniones para la formación de pares iónicos con las bases, son arrastrados a lo largo del perfil en la solución edáfica (Vázquez & Millán, 2017).

La acidez está relacionada con un valor menor de 7 en el pH del suelo, afectando de manera directa el crecimiento de las plantas y de forma indirecta incidiendo en la baja disponibilidad (Darusman et al., 1991; Dubiková et al., 2002), así como en la alteración de la dinámica y desbalance nutrimental con minerales importantes en el desarrollo de la planta como lo son el fósforo (Vázquez, 2007; Vázquez & Pagani, 2015), calcio, magnesio y potasio, además, se produce toxicidad por aluminio y manganeso (Shi et al., 2019).

La exposición al aluminio disminuye la división celular y altera la membrana plasmática radicular, lo que conlleva una disminución en calcio, magnesio y potasio, así como en fósforo y molibdeno, importantes en el desarrollo de la raíz (Riaz et al., 2018).

Los suelos de la sabana de Huimanguillo, Tabasco, se caracterizan por presentar niveles de pH menores a 5, con fijación de fósforo, deficiencias de calcio, magnesio, potasio, zinc, boro y además un porcentaje alto de saturación de aluminio (Salgado et al., 2007).

Los suelos de Huimanguillo, fueron estudiados por Zavala et al. (2014) y encontraron que pertenecen específicamente a los grupos Acrisol y Cambisol, pertenecientes al Horizonte Bt, con baja concentración de materia orgánica y

bajos niveles de capacidad de intercambio catiónico ($6.9 \text{ a } < 3 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$), niveles de pH menores a 4.8, así como bajo contenido de bases intercambiables. Tales condiciones se manifiestan en deficiencias foliares que afectan directamente el rendimiento y calidad del fruto de los cítricos (Salgado et al., 2017).

2.2. Silicio en plantas

El silicio es el segundo elemento más abundante después del oxígeno en el suelo (Ma & Yamaji, 2006) y en los últimos años ha tomado importancia como elemento influyente para reforzar la resiliencia de las plantas a una variedad de estreses bióticos y abióticos (de Souza et al., 2024), esto también concuerda con Liang et al. (2015).

El Silicio, al igual que el sodio, cobalto, selenio y aluminio son considerados elementos benéficos ya que pueden estimular el crecimiento, sin embargo, no son esenciales o solo lo son para ciertas especies vegetales o condiciones específicas.

Según lo señalado por de Souza Junior et al. (2021) los cítricos son plantas con concentraciones bajas/medias de silicio, y la aplicación foliar resulta una alternativa eficiente para aprovechar los beneficios que este elemento puede otorgar, evitando también las influencias directas del entorno agua-suelo, que pueden dificultar la absorción de silicio vía raíz (Laane, 2018). Por otro lado, Ma y Yamaji (2006), mencionan que el silicio depositado en los brotes se condensa por transpiración y posteriormente se transforma en sílice amorfa localizada en la pared celular de los tejidos epidérmicos y vasculares, lo que causa una reducción en la pérdida de agua. Por su parte, Marschner (2011), reporta que el silicio representa un papel significativo en la estabilidad de la pared celular, ya que puede actuar como puente entre los poliuirónidos así como estimular la síntesis de lignina, esto se traduce en la mejora del porte erecto de las plantas y las hojas, el aprovechamiento del agua, así como mayor protección contra plagas y enfermedades, a su vez, es consistente con Jones (1978), quien afirmó que el

silicio unido a la pared celular es derivado del éster del ácido silícico (R1-O-Si-O-R2), el cual actúa como puente estructural de los poliurónidos. Por otra parte, Emadian y Newton (1989) afirman que los depósitos de silicio en las paredes celulares de los vasos de la xilema previenen la compresión que es causado por las altas temperaturas o la sequía, también señalan que la Si-celulosa (Si-C) en la membrana epidermal protege a la planta de una pérdida excesiva causada por la transpiración.

Es señalado por Mvondo-She et al. (2024), que el silicio es eficaz para atenuar el estrés abiótico en cítricos mediante la combinación de mecanismos físicos y bioquímicos, lo cual también concuerda con Wang et al. (2021), quienes mencionan que estos mecanismos ayudan a mantener un equilibrio hídrico en la planta (Mostofa et al., 2021), mejorar la eficiencia fotosintética (Rastogi et al., 2021) e, impulsar la floración (de Souza et al., 2024), así como el rendimiento y la calidad del cultivo (Costa et al., 2025). Además, influye en propiedades biofísicas y bioquímicas del apoplasto de la hoja, lo cual se manifiesta en un mayor rendimiento y mejor calidad de fruto de los cítricos (Rachappanavar et al., 2024).

Es reconocido por Walker & Lance (1991), que el silicio acumulado en la materia seca de los brotes es un parámetro oportuno para calcular la eficiencia del uso del agua (WUE, Kg de agua transpirada $\geq$ kg² de materia seca producida) en cereales cultivados en secano, no obstante, Ma y Yamaji (2006), afirman que en plantas donde se encuentran correlaciones estrechas entre la transpiración y la acumulación de silicio, las raíces no son permeables libremente al transporte radial del silicio.

La deposición de silicio en hojas y cascara según Gong et al. (2005), mejora la resistencia y rigidez de las paredes celulares, lo cual también se refleja en una disminución de la transpiración de la cutícula, así como un aumento en la resistencia a las bajas y altas temperaturas, radiación, rayos UV y estrés por sequía, lo cual también afirman Liang et al. (2003).

En arroz, la concentración de fósforo, hierro y manganeso en hoja disminuye con la fertilización de silicio (Epstein, 1994).

2.3. Fosfitos en plantas

El fosfito (Phi) ha tomado relevancia en los últimos días como pesticida, fertilizante complementario y bioestimulante, el fosfito presenta similitud estructural con el fosfato, el cual se considera como análogo (Gómez & Trejo, 2015).

El Ácido fosforoso y sus sales en los fertilizantes tradicionales, contienen mayor concentración de fósforo (39 % P) que los fertilizantes tradicionales a base de fosfato (32 % P), siendo más solubles las sales de fósforo que sus análogas, lo cual facilita su absorción por hoja y raíz (Gómez & Trejo, 2015).

El fosfito no puede ser oxidado en fosfato dentro de la planta, debido a la ausencia del gen *ptxD*, el cual solo se encuentra en bacterias del suelo (Wu et al., 2018). No obstante, la expresión de genes como *LePT1*, *LePT2*, *AtPT1* y *AtPT2* (transportadores de alta afinidad de Pi); *LePS2* (fosfatasa ácida); y *PAP1* (fosfatasa ácida púrpura) es suprimida por la presencia de fosfito en la planta, implicada en la transducción de señales por Pi (Varadarajan et al., 2002).

Se han identificado cuatro familias de genes transportadores de Pi denominados *Pht1*, *Pht2*, *Pht3* y *Pht4* (López-Arredondo et al., 2014 y Shen et al., 2014). Por ejemplo, las enzimas *Pht* catalizan los procesos de absorción, translocación y homeostasis del fosfato inorgánico que se encuentran tanto en raíz como en parte aérea (Gómez & Trejo, 2015).

Debido a que el fosfito no es capaz de transformarse en fosfato en las plantas, no tiene la capacidad de realizar las actividades bioquímicas en las que está involucrado el fosfato (Varadarajan et al., 2002). y, por lo tanto, el fosfito no es metabolizable en los tejidos vegetales, lo cual en un exceso en la acumulación de este podría causar efectos deletéreos (Loera et al., 2015), sin embargo, Brunings et al. (2015), han observado que el fosfito presenta efectos sistémicos

y de alta estabilidad química en los tejidos vegetales, mostrando una alta movilidad a través de la planta.

Algunos hallazgos destacados del efecto del fosfito en las plantas esta especialmente centrado en el rendimiento, calidad de la fruto y tolerancia a los factores de estrés abiótico (Gómez & Trejo, 2015), por ejemplo, la aplicación foliar mejora el rendimiento y el contenido de ácido en frutas de cítricos (Lovatt, 1999); en durazno mejora el contenido de azúcares y sólidos solubles (Rickard, 2000).

El fosfito de potasio cobra relevancia en cítricos y aguacate, ya que se ha incorporado a programas de manejo en Sudáfrica y Australia sin presentar toxicidades aparentes (Lovatt, 1990).

Es mencionado por Gómez y Trejo (2015) que el fosfito mejora la absorción y asimilación de nutrientes, tolerancia a estrés abiótico y calidad de frutos, así como aumentar el rendimiento de los cultivos. Por su parte, Albrigo (1999), reportó que el fosfito aplicado de manera foliar a naranjas Valencia aumentaron el número de flores, cuajado y el rendimiento, además de incrementar los sólidos solubles totales, lo cual también es reportado por Lovatt y Mikkelsen (2006) en cítricos y aguacate, quienes también mencionan el aumento en tamaño del fruto y la concentración de antocianinas.

3. MORFOLOGÍA Y ESTADO NUTRIMENTAL BAJO APLICACIONES FOLIARES DE SILICIO Y FOSFITO DE *Citrus x latifolia* 'Persa'.

3.1. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.1. Ubicación

La presente investigación fue realizada en Rancho Don Pastor, localizado en el municipio de Huimanguillo, Tabasco, con coordenadas 17°52'29.6"N 93°38'10.2"O y 21 msnm.

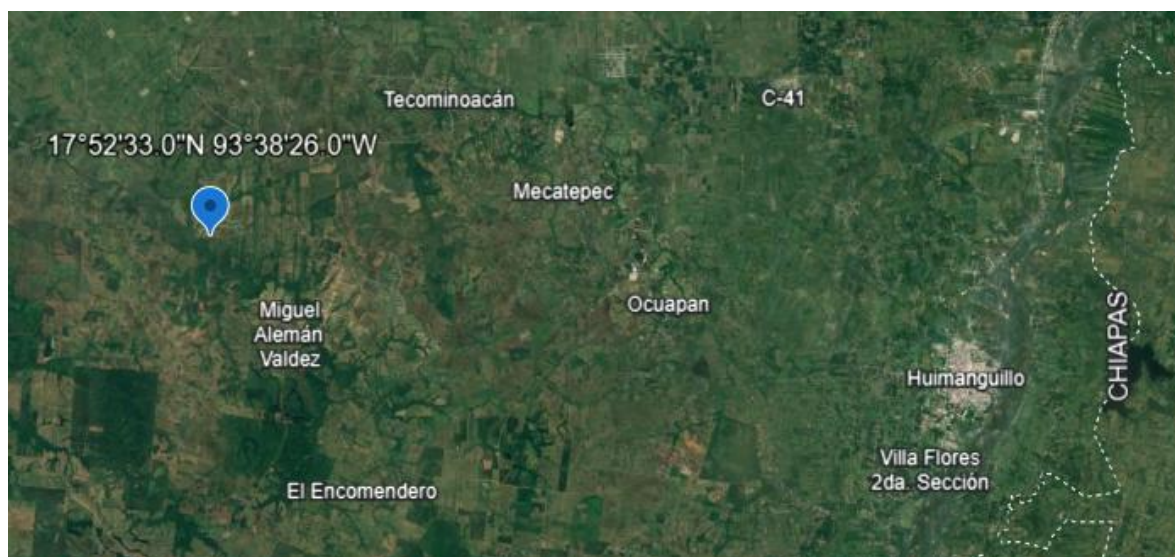


Figura 1. Localización geográfica de “Rancho don Pastor”, Huimanguillo, Tabasco.

La sabana de Huimanguillo presenta una temperatura promedio anual de 29 °C, en los meses de marzo a julio se reportan las temperaturas más altas del año, pudiendo llegar hasta 40 °C. Además, se tiene registro de hasta 2115 milímetros anuales de lluvia, de los cuales los meses más lluviosos corresponden a septiembre y octubre (Comisión Nacional de Agua [CONAGUA], 2025).

Como parte de la investigación, se realizó un análisis químico de suelo (Cuadro 1) con el propósito de corroborar las condiciones de acidez que mencionan algunos autores, y determinar la disponibilidad de nutrientes, de acuerdo con la [Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000](#), con ello se obtuvo un marco

de referencia y de antecedente para la interpretación de los posibles efectos de los tratamientos evaluados en este estudio.

Según Castellanos et al. (2000) un valor inferior a 4.6 presenta un grado de acidez extrema, además, como el valor de CIC es menor a 10 Cmol(+) Kg⁻¹ corresponde a un horizonte tipo B, el cual se caracteriza por la ausencia de minerales primarios intemperizables y acumulación de minerales secundario del grupo caolinitico y óxidos libres (Nom-021-RECNAT-2000).

Cuadro 1. Características físicas y químicas del suelo en el sitio que se encuentra el cultivo de limón persa, Huimanguillo, Tabasco, México.

Determinaciones	Valor	Interpretación	Método
pH	4.04	Fuertemente acido	AS-02
CE (dS/m)	0.37	Efectos despreciables de salinidad	AS-18
M.O %	4.89	Alto	AS-07
Arena	73.28		
TEXTURA Arcilla	51.07	Cr: franco arcilloso	AS-09
Limo	48.93		
Ni (mg kg ⁻¹)	4.67	Muy bajo	AS-08
Fosforo (mg kg ⁻¹)	0.13	Muy bajo	AS-11
Ca (Cmol(+) Kg ⁻¹)	4.65	Bajo	AS-12
Mg (Cmol(+) Kg ⁻¹)	0.56	Bajo	AS-12
K (Cmol(+) Kg ⁻¹)	0.54	Medio	AS-12
Na (Cmol(+) Kg ⁻¹)	1.87		AS-12
CIC (Cmol(+) Kg ⁻¹)	6.14	Clorita con grado de intemperismo alto	AS-12
Mn (mg kg ⁻¹)	0.45	Deficiente	AS-14
Zn (mg kg ⁻¹)	0.13	Deficiente	AS-14
Cu (mg kg ⁻¹)	0.12	Deficiente	AS-14
Relación Ca/Mg	8.29		

Fuente: Elaboración propia. Ni: Nitrógeno inorgánico.

3.1.2. Material Vegetal

El material vegetal empleado en este estudio, fueron plantas productivas de limón persa (*Citrus x latifolia* 'Persa') de 4 años, injertadas en el portainjerto de naranja agria (*Citrus latifolia* x *Citrus aurantium*).

3.1.3. Unidad y diseño experimental

El cultivo se encuentra establecido en un marco de plantación de 8 m x 4 m, lo que equivale a una densidad de 312 plantas por hectárea. La unidad experimental (UE) constó de tres plantas, de las cuales se tomó la planta central para el registro de datos y el diseño experimental utilizado fue el cuadro latino con 5 repeticiones, ya que dentro del área de interés se encontró la presencia de dos gradientes de pendiente correspondientes al 5 % y 3 %. Esto nos permitió tomar en cuenta la variación que pudiese estar relacionada a estos gradientes y así minimizar el error experimental.

3.1.4. Diseño de tratamientos

Se utilizó un arreglo de tratamientos completamente al azar, con 2 fuentes de silicatos, 2 fuentes de fosfitos y un testigo, lo que generó 5 tratamientos (Cuadro 2).

Los tratamientos fueron aplicados de manera quincenal, durante los meses de octubre a enero.

Cuadro 2. Tratamientos y concentración, aplicados a *Citrus x latifolia* 'Persa' en suelos ácidos.

Tratamientos	Si (mM)	Phi (mM)	K (mM)	Ca (mM)
T1. Testigo	-	-	-	-
T2. Silicato de potasio	0.824	-	0.491	-
T3. Fosfito de potasio	-	1.19	1.54	-
T4. Silicato de calcio	0.640	-	-	0.40
T5. Fosfito de calcio	-	0.31	-	0.14

3.1.5. Manejo experimental

Las plantas evaluadas llevaron un manejo convencional sin ningún tipo de poda durante el periodo de evaluación.

La aplicación de los tratamientos fue con una moto aspersora Stihl 450 con capacidad de 12 litros, también se les adicionó un surfactante (INEX-A), con el

fin de obtener mejor dispersión y penetración de las aplicaciones. Durante el periodo de evaluación se realizó un lavado de troncos de las plantas con aplicación de Yara Mila nitrabor (300 g) por árbol, por la presencia de *Atta cephalotes*.

3.1.6. Variables evaluadas

Las variables fueron evaluadas durante cuatro ocasiones mensualmente de noviembre del 2024 a febrero del 2025 los días 15 de cada mes, a excepción de la densidad estomática y los cortes histológicos, que fueron evaluados solo una vez.

Determinación de número de flores

La planta central, representativa de la unidad experimental fue seccionada en cuadrantes, uno de los cuadrantes (sureste) fue el que se marcó y se evaluó el número de flores presentes, posteriormente éste se extrapolo para estimar el número total de flores por árbol.

Porcentaje de cuajado de frutos (%)

Se cálculo en el cuadrante del árbol, entre el número de frutos cuajados, el valor obtenido fue extrapolado para obtener el valor para la copa total del árbol. Para obtener el resultado en porcentaje, se multiplico por 100.

Porcentaje de amarre de frutos (%)

En el mismo cuadrante, se determinó el número total de frutos que permanecieron después de la caída fisiológica, 21 días aproximadamente después del cuajado, donde posteriormente se extrapolo para obtener los datos de la copa total del árbol, y finalmente se multiplico por 100 para así obtener el porcentaje.

Determinación de peso fresco de fruto y hoja (g)

Se tomó el peso promedio de cinco frutos y el peso promedio de diez hojas, los cuales fueron determinados mediante una balanza de precisión Scout™ SPX.

Peso seco de fruto y hoja (g)

Para determinar los pesos secos de fruto y hoja, los frutos fueron rebanados en rodajas y colocados en cajas Petri, y las hojas fueron colocadas en bolsas de papel, y posteriormente fueron sometidos durante 48 horas a 75 °C para su secado en una estufa de aire forzado RIOSA ECF-120, donde se tomó el promedio del peso de cinco frutos secos y promedio de diez hojas secas, medidos mediante una balanza de precisión Scout™ SPX.

Índice de redondez

Se calculó mediante la relación diámetro polar y diámetro ecuatorial (DP/DE). Los cuales se midieron a través de un vernier digital JUGLETE 15 cm/6”.

Firmeza de fruto (Newton)

La firmeza fue determinada en tres sitios del fruto ecuatoriales y polares, tomados al azar, mediante un texturómetro Chatillon DFE-025 de acuerdo con la norma NMX-FF-014-1982, fruta fresca- Determinación de la resistencia a la penetración.

Sólidos solubles totales (°Brix)

Su determinación fue dada a través de un refractómetro digital ATAGO, modelo PAL-1, donde se extrajeron 2 gotas de jugo y se colocaron directamente en el prisma del refractómetro, reportando los datos en grados Brix.

Acidez titulable (%)

El análisis se realizó a través del método de titulación volumétrica, la cual se describe en AOAC,2005, utilizando fenolftaleína ($C_{20}H_{14}O_4$) al 1% en solución alcohólica como indicador, para su extracción se utilizó 0.5 ml de jugo de limón, 50 ml de agua destilada, y se tituló con hidróxido de sodio (NaOH) al 0.1 N a pH 8.1, hasta obtener una coloración rosácea tenue.

Color de fruto

El color de los frutos se cuantificó con un General Colorimeter NR-20XE/NR-60CP/NR-110, se evaluó con base en los parámetros L^* , C^* y H^* , donde L corresponde a luminosidad (escala de 0 para negro a 100 para blanco), C^* el croma (escala de 0 para gris a 60 para extremadamente saturado) y H el tono o ángulo hue (escala de 0 para rojo a 270 para azul), las mediciones se registraron por triplicado para cada fruta.

Densidad estomática (estomas/mm²)

Fue realizada mediante la técnica de esmalte transparente donde se obtuvieron improntas, las cuales son réplicas de la epidermis de la hoja, el esmalte se colocó sobre un área de aproximadamente 50 mm² en la superficie abaxial de la hoja, se dejó aproximadamente 2 min para el secado del esmalte, y posteriormente fue removido y colocado en un portaobjetos, donde se observaron cinco campos en un microscopio Olympus modelo CX31RBSFA con el objetivo 40X.

Índice de verdor (SPAD)

El valor del índice SPAD fue determinado mediante un medidor de clorofila portátil (SPAD 502, Chlorophyll Meter) en hojas fotosintéticamente activas de las mismas características, entre el ápice y la base de la hoja, evitando la vena central, alrededor de 9:00 a 10:00 am. Se realizaron dos tomas en cinco hojas por unidad experimental.

Concentración nutrimental

Las muestras de hoja y fruto fueron colocadas durante 48 horas a 75 °C para su secado en una estufa de aire forzado RIOSA ECF-120, posteriormente, el material deshidratado fue molido finamente en un molino tipo WILLYE y sometido a digestión húmeda con una mezcla diácida ((H₂SO₄: HClO₄, 4:2) y 2 ml de peróxido de hidrógeno concentrado. La mezcla de muestra y reactivos fue colocada en una parrilla Manon SH420F Graphite Digester a 400 °C hasta que la mezcla se tornó transparente, del extracto resultante se evaluaron las siguientes variables para cada unidad experimental:

- Concentración de amonio en hoja y fruto (%), mediante el método de Kjeldahl, en un destilador de arrastre de vapor Kjeldahl.
- Concentración de calcio y magnesio (%), y cobre, manganeso, hierro y zinc en hoja y fruto (mg kg^{-1}), mediante espectrofotometría de Absorción Atómica (AAS) – Marca GBC – Modelo SavantAA Zeeman endurecido.
- Concentración de fósforo en hoja y fruto (%), mediante espectrofotometría UV- Visible (UV-VIS)- GENESYS 150- thermoscientific.
- Concentración de potasio y sodio en hoja y fruto (%), se determinó a través de FLAME PHOTOMETER PFP-7 BUCK SCIENTIFIC.

Para hacer los cálculos correspondientes se utilizó la siguiente fórmula (Alcantar y Sandoval, 1999):

$$\%Ca, Mg, P, K, Na = \frac{ppm * V_{digestion} * V_{dilucion} * 100}{aliquota * peso \text{ de la muestra}}$$

Donde:

ppm= Partes por millón.

V digestión: volumen de la digestión (50 ml)

V dilución= volumen de la dilución (10 ml)

Alícuota= 1 ml

Peso de la muestra = 0.5 g

3.1.7. Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza y comparaciones de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) de los caracteres evaluados. Adicional, se obtuvo la correlación lineal de Pearson para cada par de variables. Todos los análisis fueron realizados mediante el paquete estadístico SAS versión 9.1.

3.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.2.1. Análisis de varianza de parámetros morfológicos

El análisis de varianza de parámetros morfológicos (Cuadro 3) mostró diferencias estadísticamente significativas en porcentaje de amarre y cuajado de frutos ($P \leq 0.01$), número de estomas por mm^2 ($P \leq 0.05$), peso fresco ($P \leq 0.01$) e índice de redondez del fruto ($P \leq 0.01$), por lo que al menos uno de los tratamientos aplicados en plantas de *Citrus latifolia* tuvo comportamiento diferencial al testigo en estas variables.

Cuadro 3. Análisis de varianza para parámetros morfológicos de *Citrus x latifolia* 'Persa' bajo la aplicación foliar de silicio y fosfitos.

FV	HI	REP	TRAT	ERROR	TOTAL	CV
GL	4.0	4.0	4.0	12.0	24	
NTF	20827	13469	13427	3387		5.0
AF	1.69	8.17	210.15	** 2.83		1.98
CF	3.59	6.36	146.10	** 10.42		3.56
SD	436.47	2240.19	1276.76	** 358.25		8.26
SPAD	3.94	65.90	5.32	3.11		2.37
PFH	0.29	0.69	0.34	0.29		5.79
PSH	0.07	0.11	0.07	0.05		7.26
PFF	7.13	10.84	170.54	** 22.62		5.01
PSF	1.08	9.72	2.35	1.12		7.65
IR	0.00	0.00	0.002	** 0.00		3.12
FZA	6.72	24.49	12.49	5.18		7.35
ATT	6.00	14.59	4.11	6.50		3.97
BRIX	0.03	0.10	0.27	0.10		3.26
L	40.03	88.70	15.71	40.68		18.19
C	7.07	11.52	12.19	12.85		14.23
H	177.00	111.39	27.62	50.06		7.01

FV: fuente de variación, HI: hileras, CV: coeficiente de variación, GL: grados de libertad, NTF: número de flores por árbol, AF: porcentaje de amarre de fruto, CF: porcentaje de cuajado de fruto, SD: densidad estomática, SPAD: índice de verdor, PFH: peso fresco de hoja, PSH: peso seco de hoja, PFF: peso fresco de fruto, PSF: peso seco de fruto, IR: índice de redondez, FZA: firmeza del fruto, ATT: porcentaje de acidez titulable, SST: sólidos solubles totales, L: luminosidad del fruto, C: croma del fruto, H: tono del fruto. ** Significativo con $P \leq 0.01$, *Significativo con $P \leq 0.05$.

3.2.2. Análisis de varianza de concentración nutrimental

El análisis de varianza realizado para la concentración nutrimental de hoja y fruto (Cuadro 4), solo mostró diferencias estadísticas en la concentración de potasio en fruto, concentración de calcio en hoja y fruto ($P \leq 0.05$), así como la concentración de cobre en hoja ($P \leq 0.01$). Esto significa que la concentración de estos elementos, bajo la aplicación de los tratamientos tuvo un comportamiento diferencial con respecto al testigo.

Cuadro 4. Análisis de varianza para la concentración nutrimental de hoja y fruto de *Citrus x latifolia* 'Persa' bajo la aplicación foliar de silicio y fosfitos.

FV	HI	REP	TRAT	ERROR	TOTAL	CV
GL	4.0	4.0	4.0	12.0	24	
NH	1.70E-04	6.62E-05	2.33E-04	1.76E-04		9.9
NF	4.11E-06	7.03E-05	6.14E-06	3.18E-05		11.1
PH	1.62E-04	2.61E-04	2.03E-05	1.81E-04		10.9
PF	2.10E-04	1.95E-04	1.91E-04	1.55E-04		10.7
KH	1.19E-02	7.16E-03	2.36E-02	1.00E-02		5.0
KF	1.16E-02	2.50E-02	5.17E-02 *	1.76E-02		7.7
CaH	2.89E-03	1.42E-01	2.00E-02 *	4.65E-03		8.4
CaF	1.02E-04	1.87E-02	2.89E-04 *	5.69E-04		10.1
MgH	2.67E-03	5.37E-02	9.17E-04	5.07E-03		3.8
MgF	7.02E-04	1.74E-02	2.80E-03	1.54E-03		4.6
NaH	5.17E-04	2.05E-03	9.57E-05	2.16E-04		6.7
NaF	1.05E-04	3.92E-04	1.02E-04	1.08E-04		5.6
CuH	3.29E-01	6.41E-01	8.30E+00 **	9.16E-01		16.0
CuF	4.43E-01	2.91E-01	2.21E-01	2.81E-01		17.2
MnH	3.53E-02	1.89E-01	2.99E-01	6.81E-01		12.9
MnF	4.28E-02	6.77E-02	8.13E-02	4.07E-02		11.4
FeH	4.50E+01	4.40E+01	1.35E+01	2.79E+01		9.5
FeF	5.35E-01	1.52E+00	5.48E-01	6.55E-01		9.2
ZnH	2.69E-01	8.64E-01	8.32E-01	8.56E-01		8.9
ZnF	4.15E-01	4.63E-02	7.29E-02	1.17E-01		11.2

FV: fuente de variación, HI: hileras, CV: coeficiente de variación, GL: grados de libertad, DMSH: diferencia mínima significativa honesta. NH: concentración de amonio en hoja; NF: concentración de amonio en fruto; PH: concentración de fosforo en hoja; PF: concentración de fosforo en fruto; KH: concentración de potasio en hoja; KF: concentración de potasio en fruto; CaH: concentración de calcio en hoja; CaF: concentración de calcio en fruto; MgH: concentración de magnesio en hoja; MgF: concentración de magnesio en fruto; NaH: concentración de sodio en hoja; NaF: concentración de sodio en fruto; CuH: concentración de cobre en hoja; CuF: concentración de cobre en fruto; MnH: concentración de manganeso en hoja; MnF: concentración de manganeso en fruto; FeH: concentración de hierro en hoja; FeF: concentración de hierro en fruto; ZnH: concentración de zinc en hoja; ZnF: concentración de zinc en fruto.

3.2.3. Comparación de medias de parámetros morfológicos

El análisis de varianza mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados, la comparación de medias de Tukey a su vez nos permitió identificar cuales tratamientos tuvieron superioridad o inferioridad estadística con respecto al testigo.

En relación con el número de flores en las plantas de limón, estadísticamente ($P \leq 0.05$) todos los tratamientos tuvieron el mismo número de flores con respecto al testigo (Cuadro 4), Albrigo (1999) encontró resultados no consistentes en la aplicación foliar de Phi antes de la floración en naranjos valencia, donde logró aumentar el número de flores, además se observó que la aplicación de fosfito de calcio aumentó 47.2 % la intensidad florar con respecto al testigo. A pesar del comportamiento de esa variable, el porcentaje de amarre de fruto se vio favorecido con la aplicación de fosfito de calcio en un 19.2 %. Por otro lado, el cuajado de fruto se vio favorecido ($P \leq 0.05$) por los tratamientos de silicato de calcio y fosfito de calcio, con un aumento de 14.3 % y 13.8 % respectivamente, Albrigo (1999) encontró resultados similares en su estudio de fosfito en naranjos valencia, sin embargo, Lovatt (2013), en árboles de aguacate 'Hass' con aplicaciones foliares de fosfito, reportó que logró aumentar el tamaño del fruto, mas no el cuajado. En el híbrido Tangor 'Ellendale' en España y Uruguay, a medida que la intensidad floral aumenta, disminuye el número de frutos cuajados, y esto suele revelar la capacidad que tiene la planta para nutrir los ovarios en desarrollo (Gravina et al., 1996), sin embargo, el presente estudio evidencia lo contrario, ya que el fosfito de calcio logró aumentar en 47.2 % la intensidad florar, y a su vez también aumentó el cuajado de fruto en 13.8 %, por lo anterior, se infiere que esta respuesta está dada por la función que otorga el calcio a la lámina media de la pared celular en la formación de pectatos de calcio, así mismo, al combinarse la acción del fosfito con el calcio, se logra la activación de defensa e inhibidores de la poligalacturonasa, la cual es una enzima encargada de disolver los pectatos de la lámina media y ablandar los tejidos, teniendo así el reforzamiento del ovario y el pedúnculo (Mengel & Kirkby, 2000), lo cual da como resultado menor aborto de frutos.

Con respecto al índice de verdor de la hoja (SPAD), la aplicación de silicato de calcio aumentó el índice de verdor en un 3 % con respecto a las plantas testigo, estadísticamente no presentó diferencias con los demás tratamientos ($P \leq 0.05$). Al respecto, Juárez et al. (2022), encontraron resultados no consistentes en el cultivo de fresa con la aplicación de 20 y 15 mg L⁻¹ de silicio con un aumento en 8 % de unidades SPAD. Cázares et al. (2023) encontraron resultados similares en su ensayo “producción de tomate en respuesta a dosis de silicio”, donde la concentración de 50 mg L⁻¹ presentó un aumento del 4.9 % con respecto al verdor foliar del tratamiento testigo.

El peso fresco y seco de hoja, así como el peso seco de fruto (Cuadro 5) no mostraron diferencias estadísticas ($P \leq 0.05$) con respecto al testigo, sin embargo, en el peso fresco de fruto, los que fueron asperjados con fosfito de calcio mostraron un aumento del 11.6 % en su peso fresco, y los asperjados con fosfito de potasio presentaron un decremento del 4 % con respecto al testigo ($P \leq 0.05$), este efecto de debió probablemente por el acompañamiento que le dio el calcio al fosfito, el cual es constituyente de pared celular, ayudando mediante pectatos de calcio a unir células, además une a fosfolípidos y proteínas en la membrana celular, lo cual le confiere estabilidad, a su vez aumenta el flujo de fotoasimilados, lo cual se refleja en mayor peso de fruto, ya que estos no se quedan estancados en hojas (Bhatla & Lal, 2018).

En el índice de redondez de fruto (Cuadro 5), los frutos asperjados con fosfito de calcio presentaron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) con respecto a los frutos testigo, sin embargo, todos los frutos en los diferentes tratamientos correspondieron a una forma ovalada, ya que son mayor a 1.

En la variable firmeza de fruto, los datos obtenidos muestran que todos los tratamientos tuvieron el mismo comportamiento ($P \leq 0.05$), Álvarez et al. (2023) encontraron resultados divergentes en frutos de durazno donde la aplicación de 900 y 1200 kg ha⁻¹ de silicio mostraron valores superiores a los 35 Newton y menos daño poscosecha, esto podría deberse a que los fertilizantes de Si preparan los mecanismos de resistencia de las plantas (Zhang et al., 2013), lo

cual resulta en una producción alta de lignina, además al estar combinado con iones como el potasio y el calcio, hacen que la desesterificación de la pectina no exhiba los residuos carboxílicos que pueden ser reticulados por el calcio, atribuyéndole resistencia y un efecto en la expansión de la pared celular (Conn et al., 2016), lo cual se deriva en frutos más firmes.

Cuadro 5. Comparación de medias de parámetros morfológicos de *Citrus x latifolia* 'Persa' bajo la aplicación foliar de silicio y fosfitos.

Variable	Tratamientos										
	Testigo		K-Si		K-Phi		SiCa		PhiCa		DMSH
NTF	245.6	a	248.0	a	284.0	a	272.0	a	361.6	a	117.3
AF (%)	77.3	c	78.4	c	90.1	ab	86.9	b	92.2	a	3.4
CF (%)	84.0	c	85.4	bc	91.7	ab	96.1	a	95.6	a	6.5
SD (Nº.mm ⁻²)	227.4	ab	247.7	a	205.4	b	238.2	ab	226.7	ab	38.2
SPAD	73.4	a	73.8	a	73.9	a	76.2	a	74.5	a	3.6
PFH (g)	8.9	a	9.2	a	9.4	a	9.0	a	9.7	a	1.1
PSH (g)	3.1	a	3.3	a	3.2	a	3.1	a	3.0	a	0.5
PFF (g)	92.4	bc	99.3	ab	87.9	c	91.4	bc	102.9	a	9.5
PSF (g)	14.4	a	14.5	a	12.8	a	13.9	a	13.4	a	2.1
IR	1.1	c	1.1	ab	1.1	bc	1.1	abc	1.1	a	0.0
FZA (N)	28.7	a	32.4	a	32.8	a	30.6	a	30.4	a	4.6
ATT (%)	62.7	a	64.6	a	65.6	a	63.6	a	64.3	a	5.1
SST (°BRIX)	10.2	a	9.8	a	9.7	a	9.9	a	9.6	a	0.6
L (°)	38.5	a	36.8	a	38.7	a	38.0	a	38.4	a	4.8
C (°)	28.7	a	27.1	a	25.6	a	26.9	a	28.7	a	3.1
H (°)	111.8	a	124.4	a	112.1	a	113.7	a	114.0	a	17.0

Medias con la misma letra en sentido horizontal, son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$). NTF: número de flores por árbol, AF: porcentaje de amarre de fruto, CF: porcentaje de cuajado de fruto, SD: densidad estomática, SPAD: índice de verdor; PFH: peso fresco de hoja, PSH: peso seco de hoja, PFF: peso fresco de fruto, PSF: peso seco de fruto, IR: índice de redondez, FZA: firmeza del fruto, ATT: porcentaje de acidez titulable, SST: sólidos solubles totales, L: luminosidad del fruto, C: croma del fruto, H: tono del fruto. DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Aunque la acidez y el color son parámetros de calidad importantes en los frutos de *Citrus x latifolia* 'Persa', no se reflejaron con incremento o decremento significativo bajo los diferentes tratamientos ($P \leq 0.05$), por lo que ningún tratamiento tuvo efecto sobre estas variables.

Álvarez et al. (2023), mencionaron que la aplicación de 600 y 1200 kg ha⁻¹ de silicio aumenta los valores de Sólidos solubles totales en frutos de durazno con respecto al testigo, además, Lovatt & Mikkelsen (2006), indican que la aplicación foliar de fosfitos influye en el aumento de los sólidos solubles totales, generalmente desde la primera aplicación, resulta inconsistente con los resultados obtenidos con este estudio (Cuadro 5), donde la aplicación de los tratamientos no tuvo comportamiento estadísticamente ($P \leq 0.05$) diferente al testigo.

3.2.4. Comparación de medias de concentración nutrimental

Las plantas de pomelo 'Xuegan' (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) y 'Shatian' (*Citrus grandis* (L.) Osbeck) al ser expuestas a aluminio, característica de suelos ácidos, disminuyen su absorción de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre (Guo et al., 2018)

Con relación al contenido nutrimental en hoja y fruto (Cuadro 6), únicamente hubo diferencias estadísticamente significativas en la concentración de calcio en hoja y fruto ($P \leq 0.05$), así como en la concentración de cobre en hoja.

El fosfito de potasio provocó superioridad estadística ($P \leq 0.05$) en la concentración de fósforo en fruto con respecto al testigo, al silicato de potasio y al silicato de calcio, en un 3 %, 2 % y 3 % respectivamente, Thao et al. (2008), encontraron resultados consistentes en *Spinacia oleracea* L, donde las concentraciones de fósforo en la parte aérea, así como en raíz aumentaron con la aplicación foliar de fosfito, anudado a esto, las plantas de espinaca reducen su crecimiento, lo que evidencian que el fosfito no es oxidado ni metabolizado y por lo tanto no es proveedor de nutrición en las plantas (Bertsch et al., 2009).

Por otro lado, la concentración de calcio en hoja aumentó en un 0.18 % en las hojas que fueron aplicadas con fosfito de potasio ($P \leq 0.05$), en relación a las hojas que se les aplicó silicato de potasio, además, este mismo tratamiento (silicato de potasio) logró disminuir significativamente la concentración de cobre en hoja, lo que indica que el silicato de potasio más que favorecer la cantidad de

calcio y cobre en hoja, decreció en un 0.06 % y 28.9 % respectivamente la concentración de estos minerales.

Cuadro 6 Comparación de medias para la concentración mineral de hoja y fruto de *Citrus x latifolia* 'Persa' bajo la aplicación foliar de silicio y fosfitos.

Variable	Tratamientos										
	Testigo		K-Si		K-Phi		SiCa		PhiCa		DMSH
NH (%)	0.13	a	0.14	a	0.13	a	0.14	a	0.12	a	0.03
NF (%)	0.05	a	0.05	a	0.05	a	0.05	a	0.05	a	0.01
PH (%)	0.12	a	0.12	a	0.13	a	0.12	a	0.12	a	0.03
PF (%)	0.10	b	0.11	b	0.13	a	0.10	b	0.12	ab	0.02
KH (%)	1.94	a	2.11	a	2.05	a	2.03	a	1.95	a	0.31
KF (%)	1.57	a	1.74	a	1.84	a	1.81	a	1.68	a	0.27
CaH (%)	0.79	ab	0.73	b	0.90	a	0.80	ab	0.84	ab	0.15
CaF (%)	0.16	c	0.23	b	0.24	b	0.33	a	0.22	b	0.05
MgH (%)	1.85	a	1.87	a	1.85	a	1.84	a	1.85	a	0.14
MgF (%)	0.86	a	0.88	a	0.88	a	0.82	a	0.84	a	0.08
NaH (%)	0.23	a	0.22	a	0.21	a	0.22	a	0.22	a	0.04
NaF (%)	0.18	a	0.18	a	0.18	a	0.19	a	0.18	a	0.03
CuH (mg/kg)	5.47	ab	3.88	b	6.62	a	7.02	a	6.82	a	1.93
CuF (mg/kg)	3.19	a	2.79	a	2.94	a	3.23	a	3.24	a	0.82
MnH (mg/kg)	6.73	a	6.22	a	6.25	a	6.16	a	6.53	a	1.18
MnF (mg/kg)	1.66	a	1.75	a	1.96	a	1.81	a	1.65	a	0.44
FeH (mg/kg)	56.79	a	55.76	a	53.63	a	53.92	a	57.16	a	8.12
FeF (mg/kg)	9.31	a	8.75	a	8.89	a	8.35	a	8.54	a	1.77
ZnH (mg/kg)	10.38	a	10.57	a	11.01	a	10.01	a	10.01	a	1.87
ZnF (mg/kg)	2.99	a	3.05	a	3.05	a	3.18	a	2.94	a	0.91

Medias con la misma letra en sentido horizontal, son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$). NH: concentración de amonio en hoja; NF: concentración de amonio en fruto; PH: concentración de fosforo en hoja; PF: concentración de fosforo en fruto; KH: concentración de potasio en hoja; KF: concentración de potasio en fruto; CaH: concentración de calcio en hoja; CaF: concentración de calcio en fruto; MgH: concentración de magnesio en hoja; MgF: concentración de magnesio en fruto; NaH: concentración de sodio en hoja; NaF: concentración de sodio en fruto; CuH: concentración de cobre en hoja; CuF: concentración de cobre en hoja; MnH: concentración de manganeso en hoja; MnF: concentración de manganeso en fruto; FeH: concentración de hierro en hoja; FeF: concentración de hierro en fruto; ZnH: concentración de zinc en hoja; ZnF: concentración de zinc en fruto. DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Además, la concentración de calcio en fruto se vio favorecida por la aplicación de silicato de calcio en un 0.17 % con respecto al testigo ($P \leq 0.05$).

La relación de Mg/Ca indico que la planta tanto en hoja como en fruto tiene preferencia por el magnesio, presentando deficiencias de calcio en estos órganos. Además, la relación de Mg/K en los diferentes tratamientos al ser mayor que 0.6 mostró de igual manera favoritismo en hoja por el magnesio, pero un equilibrio en fruto, Guo et al. (2023) encontraron resultados similares en plántulas de cítricos, donde la planta al tener mayor concentración de magnesio, afecta directamente la relación Ca/Mg de manera negativa, la proporción de Ca/Mg en algunas plantas es de 2:1 aproximadamente, por lo que es necesario aplicar mayor cantidad de calcio que de magnesio a la planta (CANNA Gardening, 2013).

Cuadro 7. Relación de bases catiónicas en hoja y fruto de *Citrus x latifolia* 'Persa' bajo aplicación foliar de silicio y fosfito en suelos ácidos.

Relación	Órgano	Tratamientos				
		Testigo	K-Si	K-Phi	SiCa	PhiCa
Mg/Ca	Hoja	2.346	2.577	2.054	2.301	2.193
Mg/K	Hoja	0.442	0.888	0.905	0.909	0.946
Mg/Ca	Fruto	5.405	3.855	3.681	2.501	3.763
Mg/K	Fruto	0.546	0.505	0.480	0.455	0.502

3.2.5. Correlación lineal

Los resultados del análisis de correlación lineal de Pearson (Cuadro 1A) indicaron que a medida que aumentó el número de flores en el árbol se incrementó el amarre, cuajado ($P \leq 0.05$) de fruto y la acidez titulable en frutos ($P \leq 0.05$) pero disminuyó la luminosidad del color de este ($P \leq 0.05$). Además, el aumento del porcentaje de amarre de flor favoreció un mayor porcentaje de cuajado de fruto ($p \leq 0.05$), también la concentración de magnesio en hoja y fruto ($P \leq 0.05$).

Para el caso de la variable color de fruto, se registró una relación inversa con el croma del fruto, el cual disminuyó a medida que aumentó el amarre de flor ($P \leq 0.05$).

El índice de verdor tuvo fuerte asociación positiva con peso seco de fruto, el contenido de nitrógeno en hoja, contenido de magnesio en hoja y contenido de nitrógeno en fruto ($P \leq 0.01$).

Así mismo se observó una relación positiva del peso fresco de hoja con la concentración de magnesio ($P \leq 0.05$), manganeso y hierro en hoja ($P \leq 0.01$).

Por otra parte, el incremento del peso fresco del fruto se relaciona con un incremento del peso seco, firmeza ($P \leq 0.01$) e índice de redondez del fruto ($P \leq 0.05$), así como el aumento de la concentración de fósforo en hoja y fruto ($P \leq 0.01$), concentración de potasio y manganeso en hoja ($P \leq 0.01$) y la concentración de manganeso y zinc en fruto ($P \leq 0.01$), pero provocó una relación inversa con la concentración de hierro en frutos ($P \leq 0.01$). En cuanto al aumento del peso seco de fruto, existe una tendencia de incremento en la firmeza de fruto ($P \leq 0.01$) y la concentración de zinc en hoja ($P \leq 0.05$), pero disminuye la acidez titulable del fruto ($P \leq 0.01$).

Se observó una correlación positiva entre la acidez total titulable con la concentración de nitrógeno y magnesio en fruto, pero su asociación fue negativa con firmeza de fruto ($P \leq 0.05$).

A su vez, sólidos solubles totales, firmeza de fruto, concentración de nitrógeno, magnesio y fósforo en hoja mostraron un comportamiento ascendente simultáneo ($P \leq 0.01$).

La firmeza del fruto mostró una correlación positiva con el tono del fruto, la concentración de nitrógeno, calcio ($P \leq 0.01$), magnesio, fósforo ($P \leq 0.05$), potasio, manganeso, hierro y zinc en hoja ($P \leq 0.01$), así como con la concentración de fósforo, potasio y zinc en fruto, pero el exceso de sodio y manganeso en fruto se asociaron con una menor firmeza ($P \leq 0.05$).

El aumento de la luminosidad en fruto se vio influenciada por el incremento del croma en fruto ($P \leq 0.01$), la concentración de potasio y hierro en hoja, así como por la concentración de nitrógeno, calcio y magnesio en fruto ($P \leq 0.05$). A su vez el croma se vio favorecido con el incremento de hierro en fruto ($P \leq 0.05$). Y, el

tono del fruto se incrementó como resultado del aumento en la concentración de potasio en fruto y la concentración de manganeso y hierro en hoja ($P \leq 0.01$), pero se disminuyó cuando la concentración de nitrógeno y fósforo en hoja aumentó ($P \leq 0.05$).

El incremento de la concentración de nitrógeno en hoja se asoció con el aumento de la concentración de calcio, fósforo, potasio, manganeso, hierro y zinc en hoja ($P \leq 0.01$), así como con mayor concentración de nitrógeno, magnesio, fósforo, sodio y potasio en fruto ($P \leq 0.05$), pero un aumento de zinc en fruto provocó una reducción de la concentración de nitrógeno ($P \leq 0.01$).

La concentración de calcio en hoja se correlacionó positivamente con la concentración de fósforo ($P \leq 0.05$), potasio, manganeso, hierro y zinc en hoja ($P \leq 0.01$), así como con la concentración de calcio, magnesio, fósforo y potasio en fruto ($P \leq 0.01$), mostrando probablemente un efecto de sinergismo en estos elementos.

Por otro lado, la concentración de magnesio presentó un efecto antagónico con la concentración de fósforo y sodio en hoja, y un efecto sinérgico con la concentración de potasio y hierro en hoja, así como con la concentración de calcio y magnesio en fruto.

Además, la concentración de fósforo en hoja se comportó de manera sinérgica con la concentración de potasio, hierro y zinc en hoja ($P \leq 0.01$), así como con la concentración de nitrógeno, magnesio, fósforo y potasio en fruto, pero mostró antagonismo con la concentración de cobre, manganeso en hoja, y en la concentración de sodio, cobre y zinc en fruto. La concentración de sodio en hoja presentó antagonismo con la concentración de potasio en fruto ($P \leq 0.05$). Y la concentración de potasio en hoja presentó sinergismo con la concentración de hierro y zinc en hoja, y concentración de magnesio, fósforo, potasio, cobre y zinc en fruto.

La concentración de calcio en fruto, se correlacionó de manera positiva con la concentración de magnesio ($P \leq 0.01$) y potasio en fruto ($P \leq 0.05$). A su vez la

concentración de magnesio en fruto presentó sinergismo con la concentración de fosforo, potasio en fruto y hierro en hoja ($P \leq 0.05$).

Por su parte, la concentración de fosforo en fruto, presentó sinergismo con la concentración de hierro en hoja y manganeso y zinc en fruto, pero fue antagónico con la concentración de sodio en fruto y manganeso en hoja. La concentración de potasio presentó sinergismo con la concentración de hierro y antagonismo con la concentración de manganeso en hoja ($P \leq 0.05$).

4. ANATOMÍA DE LA CÁSCARA DEL FRUTO BAJO APLICACIONES FOLIARES DE SILICIO Y FOSFITO DE *Citrus x latifolia* 'Persa'.

4.1. MICROSCOPIA DE CORTES HISTOLÓGICOS

Las preparaciones de los tejidos vegetales se realizaron conforme a los protocolos establecidos por Lersten y Horner (2011), con modificaciones que son descritas en cada etapa del proceso.

4.1.1. Recolecta y fijación de material vegetal

Recolecta

De los tratamientos descritos en el capítulo anterior, se tomaron especímenes (hoja y fruto) de los cuales fueron aplicados los tratamientos de silicato de potasio y fosfito de calcio.

Posterior a la recolección, fueron colocados en bolsas plásticas herméticas, con una servilleta de papel previamente humedecida, con el propósito de mantener la turgencia tisular y evitar la deshidratación durante el transporte al laboratorio de genética, ubicado en el Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo, México.

Fijación del material en solución FAA

Se seccionaron muestras pequeñas de cortes transversales del fruto y hoja transversalmente, evitando la parte del ápice de la hoja. Posteriormente, los especímenes fueron inmersos en frascos de vidrio en solución fijadora FAA (formaldehído, ácido acético, alcohol y agua destilada) al 100 %, donde permanecieron durante 4 días a temperatura ambiente con cambio de solución cada 24 h.

4.1.2. Deshidratación y procesamiento de muestras

Proceso de deshidratación e inclusión en parafina (Ruzin, 1999)

Los especímenes fueron sometidos a un proceso de deshidratación gradual en una serie de soluciones alcohólicas de concentración ascendente: 10 %, 25 %, 50 %, 70 %, 96 %, 100 %, con un tiempo de exposición de 30 minutos en cada concentración.

Después de la deshidratación, los especímenes estuvieron sometidos a un proceso de aclaramiento mediante su inmersión en una solución de xilol:etanol (1:1), durante 30 minutos, seguida de una inmersión en xilol al 100 % por una hora, con el fin de eliminar por completo el etanol.

La infiltración de parafina líquida (punto de fusión: 56 °C) se realizó durante una semana, donde se estuvieron realizando cambios cada 24 horas en un horno de convección por gravedad Cole Parmer modelo 05015-50. Finalmente, los tejidos fueron incluidos en moldes metálicos, hasta obtener bloques de parafina y dispuestos para su solidificación.

Seccionado de muestras en parafina

Los bloques fueron dispuestos en un microtomo rotatorio Hyrax M25 marca Carl Zeiss para el seccionado, se obtuvieron cortes transversales de hoja de 12 µm y de fruto de 14 µm de espesor. Estos fueron colocados en un portaobjeto tratado previamente con un adhesivo EMS Tissue Capture Pen y una gota de formaldehído al 4 %, los cuales se secaron a una temperatura de 30 °C durante 24 horas aproximadamente.

Técnica de tinción

Cada uno de los cortes colocados en el portaobjeto fueron pasados por una serie de desprendimiento de la parafina, la cual consistió en someter cada muestra al siguiente procedimiento:

Xilon 100 % durante 2 min, etoh:xilol (1:1) 2 min, etanol 100 % 2 min, etanol 96 % 1 min, etanol 70 % 1 min, etanol 50 % 1 min. Posterior al retiro de parafina, la

muestra se sometió a una tinción con safranina al 1 % durante 24 hrs. a temperatura ambiente, después, las muestras se enjuagaron con etanol al 70 %, y se sumergieron en una solución de verde rápido al 1 % durante 21 segundos.

Finalmente, se procedió al montaje utilizando Permout® (Fisher Scientific International, Inc.), una resina sintética utilizada como medio de fijación permanente. Se colocó un cubreobjetos sobre la preparación y se dejó secar sobre una plancha térmica hasta que el medio de montaje se endureció por completo.

Técnica de aclaramiento

Técnica en fruto

Se realizaron cortes de 40 µm de espesor, en un vibratomo, los cuales fueron colocados en frascos de vidrio transparentes con hipoclorito de sodio al 2.5 % durante 24 horas (Lersten & Horner, 2004), para dejar transparentes a los especímenes.

Posteriormente, los especímenes fueron pasados por agua corriente durante tres ocasiones para después pasar a etanol al 25 % durante 24 horas, para comenzar la deshidratación gradual del tejido.

La deshidratación fue una serie de soluciones alcohólicas de concentración ascendente: 50 %, 70 %, 96 %, 100 % durante 30 minutos por cada concentración.

Posteriormente, fueron sometidos a clarificación mediante la inmersión en una solución de xilol:etanol (1:1), durante 30 minutos, seguida de una inmersión en xilol al 100 % por una hora.

El montaje se realizó en Permout® (Fisher Scientific International, Inc.) en un portaobjetos y se cubrió con un cubreobjetos.

Técnica en hoja

La técnica para la clarificación de hoja fue muy similar a la descrita con anterioridad para fruto, con algunas modificaciones en los tiempos y adición de un paso.

Después de la deshidratación gradual, llegando al etanol 96 %, los especímenes fueron sometidos a un baño maría durante 72 hrs a 65 °C, posteriormente fueron lavados con agua corriente y sometidos durante 12 días en hipoclorito de sodio al 2.5 % en una bandeja de múltiples compartimentos como lo descrito por Horner y Arnott, en 1961.

El montaje se realizó en Permount® (Fisher Scientific International, Inc.) en un portaobjetos y se cubrió con un cubreobjetos.

Finalmente, fueron examinados con un microscopio Axio Imager D1 marca Carl Zeiss con objetivo de 10X y se analizaron en Adobe PhotoShop 8.0.

4.1.3. Unidad y diseño experimental

La unidad experimental (UE) constó de cuatro especímenes de plantas de limón (hoja y fruto) recolectados en Huimanguillo, Tabasco. y el diseño experimental consistió en un completamente al azar con tres tratamientos y cuatro repeticiones.

Los tratamientos evaluados en este capítulo fueron seleccionados con forme a los datos recolectados en el capítulo anterior, en donde el tratamiento con el mayor número de variables positivas fue el que se seleccionó para su evaluación histológica.

4.1.4. Análisis estadístico

Se realizó comparaciones de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) de los caracteres evaluados. Todos los análisis estadísticos fueron realizados mediante el paquete estadístico SAS versión 9.1.

4.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) de espesor de epidermis y albedo en el fruto de *Citrus x latifolia* 'Persa', muestra que el tratamiento de silicato de potasio mostró que el espesor de la epidermis y albedo de fruto fueron estadísticamente inferiores respecto al testigo (Cuadro 8), como se aprecia en la Figura 2 (B).

En espesor de flavedo y endocarpio no hubo diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$), no obstante, se logra observar un incremento en el número de capas de colénquima que integran el endocarpio, se podría inferir que en el endocarpio el silicato de potasio posiblemente estimuló la formación de 1 a 4 capas más que el testigo de colénquima laminar intercalado con colénquima lagunar, en menor frecuencia (Figura 3, B2), dado que el colénquima es una especialización del parénquima con paredes engrosadas suele considerarse como una estructura de sostén (Evert, 2006). Esta estructura suele caracterizarse por presentar pared engrosada de forma irregular en los ángulos de las células donde es mayor o en las dos paredes opuestas, la interna y la tangencial externa; por otro lado, el colénquima lagunar, suele presentar paredes engrosadas cerca de los espacios intracelulares (Evert, 2006).

Con respecto al número de cristales presentes en hoja hubo diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) en ambas caras de la hoja (adaxial y abaxial), donde el testigo fue el que presentó el mayor número con respecto al tratamiento de silicato de potasio, lo cual también logra verse notoriamente en Figura 5, el silicio en las plantas no se deposita en forma cristalina y tiene incorporación a la pared celular (Currie & Perri, 2007).

Cuadro 8. Comparación de medias del grosor de las zonas que conforman la cáscara del fruto de *Citrus x latifolia* 'Persa' por el efecto de la aplicación foliar de silicio y fosfito. Huimanguillo, Tabasco 2025.

Tratamiento	μm							
Epidermis			Flavedo			Albedo		
Endocarpio								
Testigo	75.65	a	985	a	2766.2	a	117.9	a
Silicato de potasio	50.5	b	580.2	a	1690.7	b	85.7	a
Fosfito de calcio	65.9	ab	613.7	a	2599.6	a	131.7	a
DMSH	17.7		406.1		760.2		56.3	

Medias con la misma letra en sentido vertical, son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$). DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

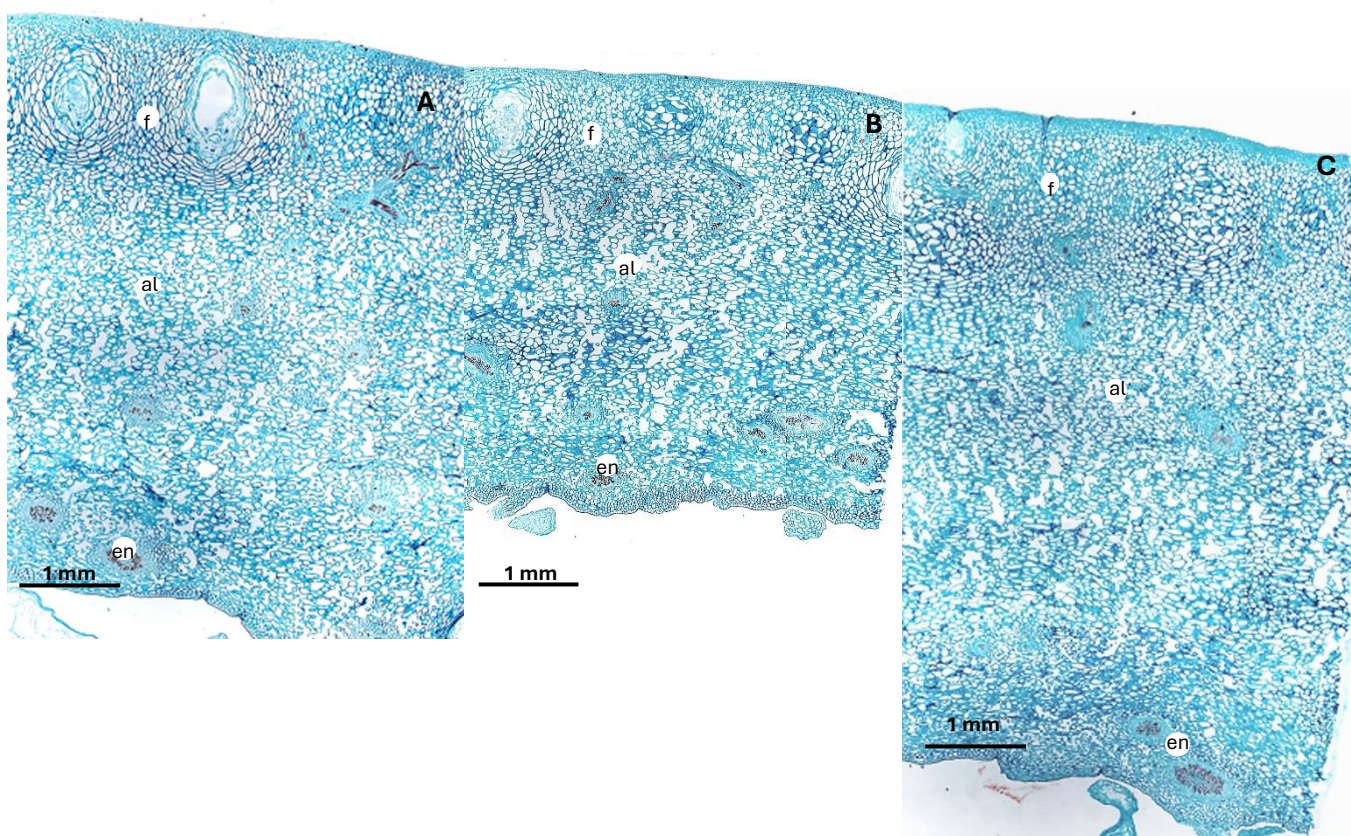


Figura 2. Imágenes fotográficas de cortes transversales del fruto de *Citrus x latifolia* 'Persa' fotografiados a bajo aumento, donde se aprecian diferencias en el grosor de la superficie ocupada por las zonas del flavedo(f), albedo (al) y endocarpio (en), bajo diferentes tratamientos A) testigo, B) silicato de potasio y C) fosfito de calcio.

En contraste, la concentración de cristales en la parte subepidérmica del fruto también tuvo diferencias estadísticamente significativas ($\alpha \leq 0.05$), teniendo al tratamiento con aplicación de silicato de potasio con mayor concentración de estos, tal como se evidencia en la Figura 4, B, sin embargo, su morfología podría corresponder a oxalato de calcio, según Piperno et al. (2002), en la cascara de los frutos de Cucurbita la lignificación y la formación de fitolitos podrían estar relacionada genéticamente y determinadas por un locus genético llamado cáscara dura (Hr, hard rind).

Cuadro 9. Comparación de medias de cuantificación de cristales en hoja y fruto de *Citrus x latifolia* 'Persa' bajo aplicaciones de fosfitos y silicio.

Tratamiento	Cara Adaxial		Cara Abaxial		Epidermis Fruto	
	μm					
Testigo	51.6	a	39.2	a	13.15	b
Silicato de potasio	17.6	c	11.4	c	41	a
Fosfito de calcio	39.6	b	26.4	b	18	b
DMSH	5.7386		9.8681		19.804	

Medias con la misma letra en sentido vertical, son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$). DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

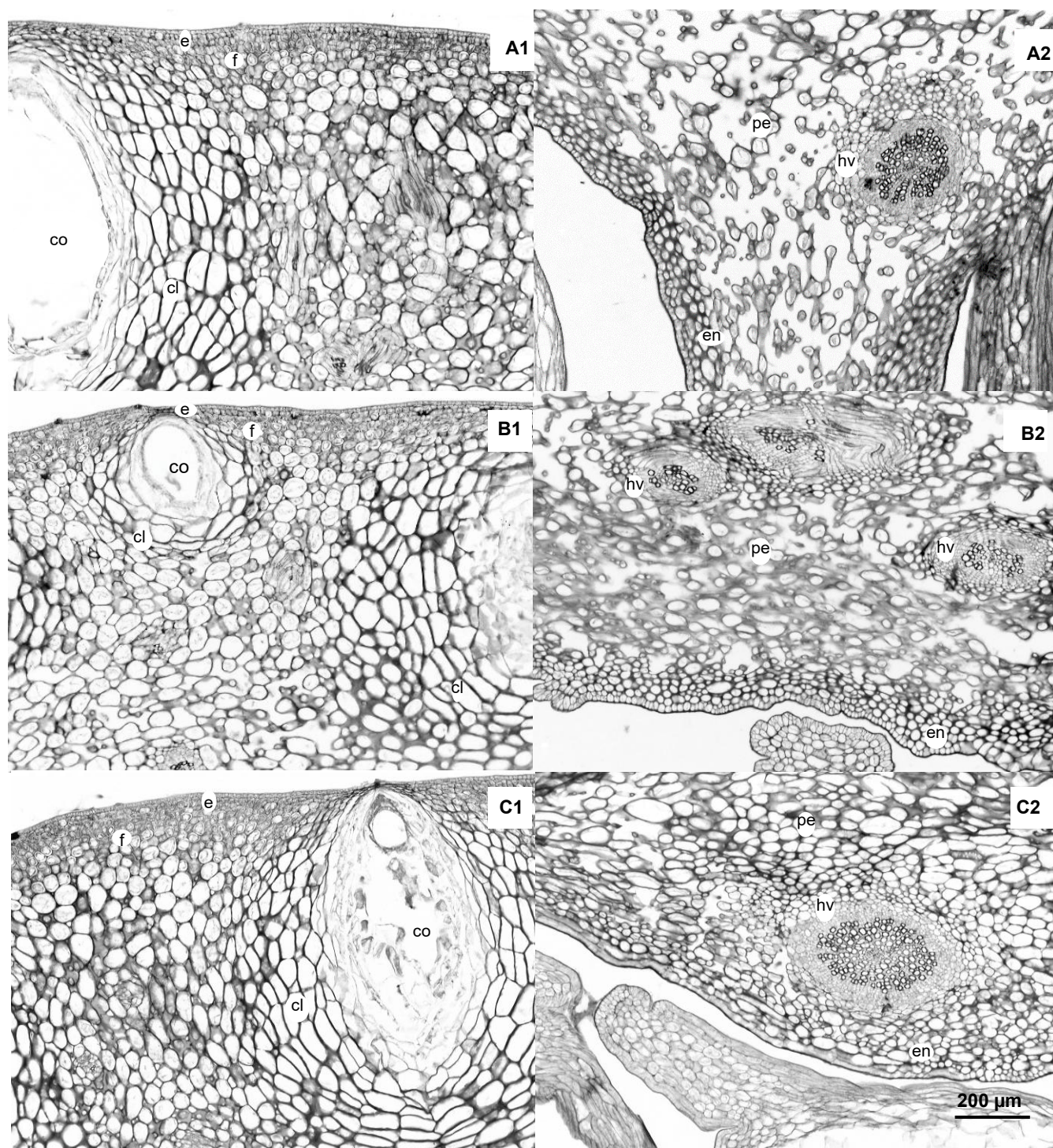


Figura 3. Corte transversal en fruto de *Citrus x latifolia* 'Persa' procesadas en parafina de acuerdo Lester y Horner (2000), bajo diferentes tratamientos A1: flavedo del testigo, A2: albedo del testigo, B1: flavedo con aplicación de silicato de potasio, B2: albedo con aplicación de silicato de potasio, C1: flavedo con aplicación de fosfito de calcio, C2: albedo con aplicación de fosfito de calcio, e: epidermis constituida de 2 a 3 capas, f: clorénquima; co: cavidad oleífera; cl: clorénquima laminar colindante con la zona del albedo, pe: parénquima esponjoso, solo presente en albedo, hv: haz vascular presentes tanto en zona de flavedo y albedo, en: endocarpio.

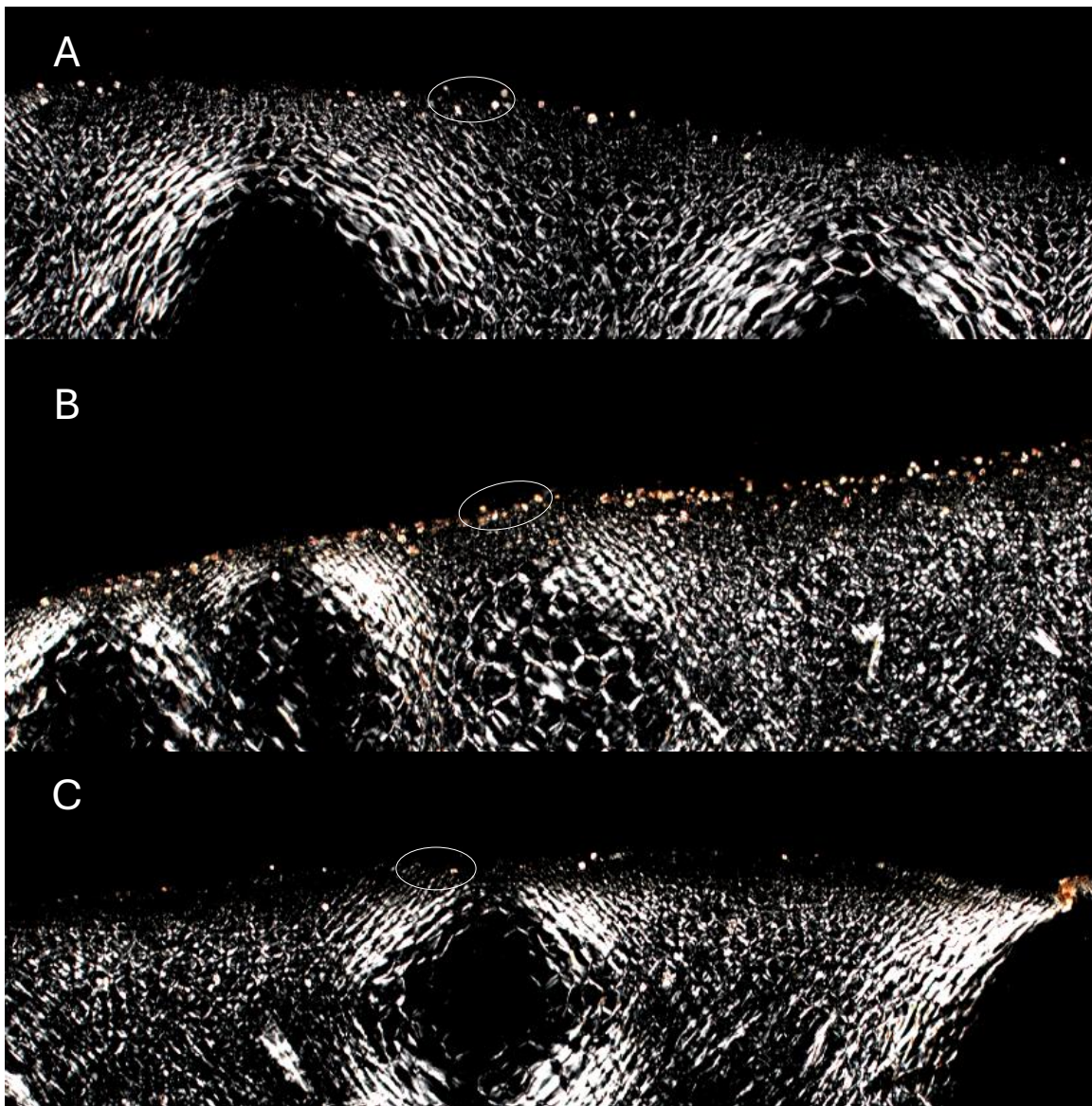


Figura 4. Cortes transversales de fruto de *Citrus x latifolia* 'Persa' procesadas en parafina de acuerdo Lester y Horner (2000), bajo la aplicación foliar de diferentes tratamientos. A) testigo, B) silicato de potasio, C) fosfito de calcio. Zona resaltada indica la presencia de cristales. Figura sin escala.

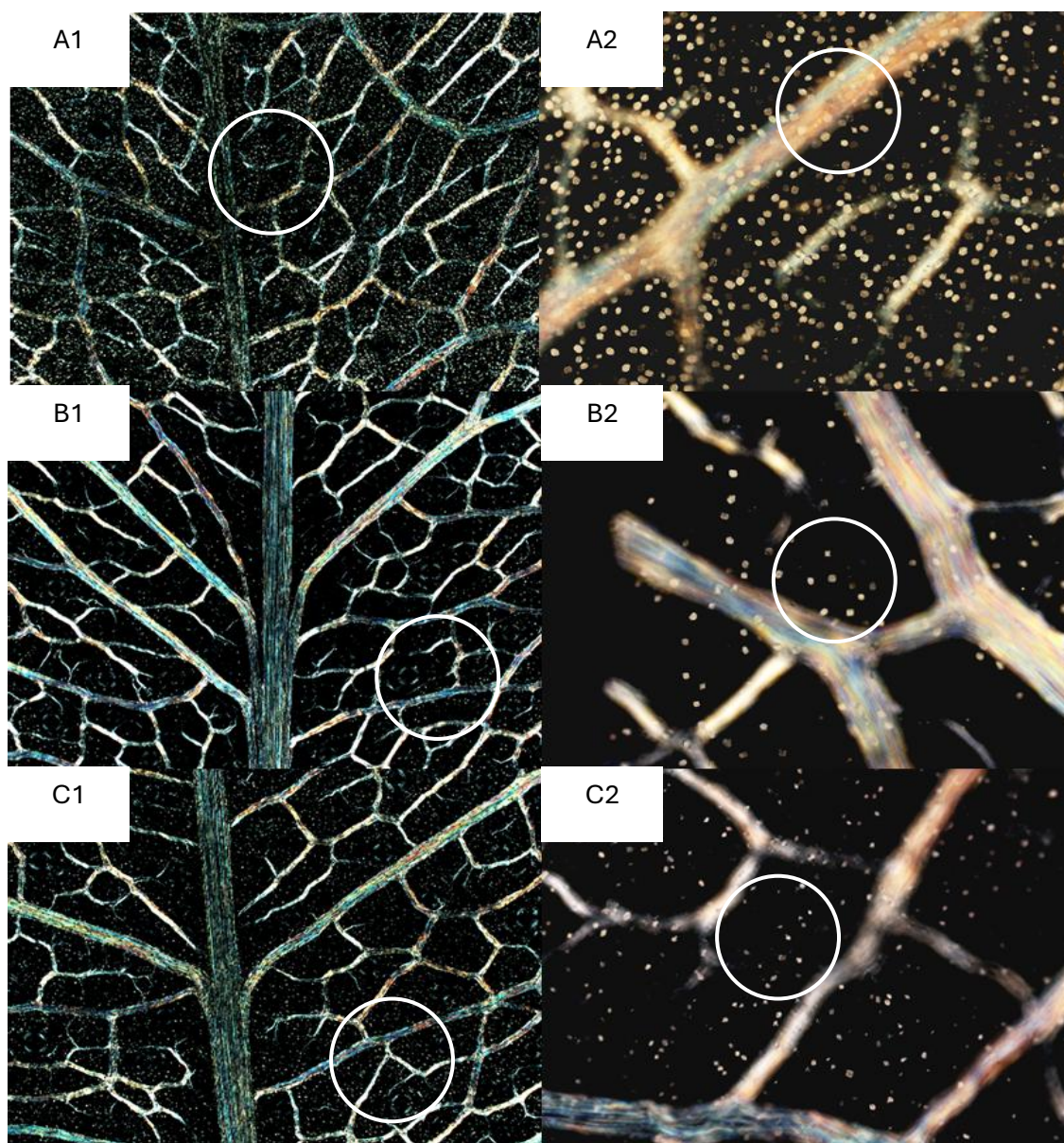


Figura 5 Vistas paradermales de hoja de *Citrus x latifolia* 'Persa' procesadas en parafina y aclaradas de acuerdo Lester y horner (2000). A1) corte transversal en hoja testigo, A2) hoja aclarada del testigo, B1) corte transversal con aplicación de silicato de potasio, B2) hoja aclarada con aplicación de silicato de potasio, C1) corte transversal con aplicación de fosfito de calcio, C2) hoja aclarada con aplicación de fosfito de calcio. Zona resaltada indica la presencia de cristales.

5. CONCLUSIONES

La aplicación foliar de silicio y fosfito en arboles de *Citrus x latifolia* 'Persa' cultivados en suelos ácidos mejoró parámetros morfológicos, anatómicos y nutricionales de la planta.

Los tratamientos con silicio promovieron el cuajado de frutos, el índice de verdor, así como la concentración de nitrógeno, potasio, magnesio y calcio en hojas, lo que indicó un efecto bioestimulante sobre la absorción y distribución de los nutrientes, pero una reducción en el espesor de la epidermis y albedo de la cascara del fruto, así como un aumento en número de cristales en la epidermis del fruto.

La aplicación foliar de fosfitos provocó un efecto positivo en amarre de fruto, peso fresco de fruto e índice de redondez del fruto, así como el aumento de la concentración de fósforo en fruto y calcio en hoja.

6. LITERATURA CITADA

Abidi, W., Akrimi, R., Hajlaoui, H., Rejeb, H., & Gogorcena, Y. (2023). Foliar Fertilization of Potassium Silicon Improved Postharvest Fruit Quality of Peach and Nectarine [*Prunus persica* (L.) Batsch] Cultivars. *Agriculture*, 13(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010195>

Albrigo, L. (1999, December). Effects of foliar applications of urea or nutriphite on flowering and yields of Valencia orange trees. In *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*. 112. Article 28.

Alcántar, G. G. & Sandoval, V. M. (1999). Manual de análisis químico de tejido vegetal. Publicación especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo AC., Chapingo, Estado de México.

Álvarez H.J.G., Camacho T.Y.M., Molano D.J.M., Álvarez H.J.G., Camacho T.Y.M., & Molano D.J.M. (2023). Effect of edaphic silicon on the quality and postharvest of 'Dorado' peach (*Prunus persica* (L.) Batsch) fruits. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 40(3). http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-01352023000300007&script=sci_arttext&tlng=en

Bertsch, F., Ramírez, F., & Henríquez, C. (2009). Evaluación del fosfito como fuente fertilizante de fósforo vía radical y foliar. *Agronomía Costarricense*, 33(2), 249-265.

Bhatla, S. C., & Lal, M. A. (2018). *Plant physiology, development and metabolism*. Springer Nature. [https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=u7TnEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=Bhatla,+S.+C.,+%26+Lal,+M.+A.+\(2018\).+Plant+physiology,+development+and+metabolism.+Springer+Nature&ots=IETDm280o8&sig=2WhE6ZY5O5JP_OLVh2jX1qkd1nc&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=u7TnEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=Bhatla,+S.+C.,+%26+Lal,+M.+A.+(2018).+Plant+physiology,+development+and+metabolism.+Springer+Nature&ots=IETDm280o8&sig=2WhE6ZY5O5JP_OLVh2jX1qkd1nc&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

Brunings, A. M., Liu, G., Simonne, E. H., Zhang, S., Li, Y., & Datnoff, L. E. (2012). Are phosphorous and phosphoric acids equal phosphorous sources for plant growth. *Ifas Extension University of Florida*. DOI:<https://doi.org/10.32473/edis-hs254-2005>

Castellanos, J. Z., Uvalle Bueno, J. X., & Aguilar Santelises, A. (2000). Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. (2.^a ed.). Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola.

Cázarez F.L.L., Angulo C.A., Vega G.T.A., Ayala T.F., Aguilar Q.J.A., & Román R.L. (2023). Producción de tomate en respuesta a dosis de silicio. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 10(3): e3851. <https://doi.org/10.19136/era.a10n3.3851>

CONAGUA. Normales Climatológicas por Estado. Recuperado el 1 de noviembre de 2025, de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado?estado=tab>

Conn, S. J., Hocking, B., Dayod, M., Xu, B., Athman, A., Henderson, S., & Gilliam, M. (2013). Protocol: optimising hydroponic growth systems for nutritional and physiological analysis of *Arabidopsis thaliana* and other plants. *Plant methods*, 9(1), 4.

Costa, M. G., Prado, R. D. M., Teixeira, G. C. M., Oliveira, K. S., Da Silva, G. P., & de Souza Júnior, J. P. (2025). Exploring the physiology of silicon and its impact on sugarcane growth, development, yield, and juice quality. Apple Academic Press.

Currie, H. A., & Perry, C. C. (2007). Silica in plants: biological, biochemical and chemical studies. *Annals of botany*, 100(7), 1383-1389.

de Souza Junior, J. P., Costa, M. G., Campos, C. N. S., & Flores, R. A. (2024). Silicon Stimulates Flowering and Improves Crop Quality. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-69876-7_15

de Souza Júnior, J. P., Costa, M. G., Oliveira, K. S., Kadyampakeni, D., de Mello Prado, R., & Tubana, B. S. (2025). Potential of Nanoparticulate Fertilizers in Mitigating Environmental Stresses. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-78096-7_19

de Souza Junior, J. P., de Mello Prado, R., Soares, M. B., da Silva, J. L. F., de Farias Guedes, V. H., dos Santos Sarah, M. M., & Cazetta, J. O. (2021). Effect of

different foliar silicon sources on cotton plants. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(1), 95-103.

Emadian, S. F., & Newton, R. J. (1989). Growth enhancement of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) seedlings by silicon. *Journal of Plant Physiology*, 134(1), 98-103.
[https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(89\)80209-3](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(89)80209-3)

Epstein, E. (1994). The anomaly of silicon in plant biology. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 91 (1), 11-17.
<https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.1>

Evert R.F. (2006). Esau Anatomía vegetal meristemas, células y tejidos de las plantas: su estructura, función y desarrollo. (3.^a ed.). *Ediciones omega*.

Food and Agriculture Organization (FAO). Crops and Livestock Products. Available online: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL> (consultado el 07 de agosto del 2025).

Ford, E.S. (1942). Anatomy and Histology of the Eureka Lemon. *Botanical Gazette*. 104 (2), 288–305. <https://doi.org/10.1086/335133>

Geneser, F. (2003). Histología. *Editorial Médica Panamericana*.

Gómez M.F. C., & Trejo T.L.I. (2015). Biostimulant activity of phosphite in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, 82-90.

Gong, H., Zhu, X., Chen, K., Wang, S., & Zhang, C. (2005). Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. *Plant science*, 169(2), 313-321.

Gravina, A., Arbiza, H., Juan, M., Almela, V., & Agustí, M. (1996). Flowering-fruitlet interrelationships in 'Ellendale'tangor under the growing conditions of Spain and Uruguay. In *Proceedings of the International Society of Citriculture*. 2, 1081-1085.

Guo, J., Jiao, Y., Wang, Y., Hu, W., Jia, Y., Huang, Z., Yang, L.-T., & Chen, L.-S. (2023). Regulation of magnesium and calcium homeostasis in citrus seedlings

under varying magnesium supply. *Plant Physiology and Biochemistry*, 204, 108146. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108146>

Guo, P., Qi, Y.-P., Cai, Y.-T., Yang, T.-Y., Yang, L.-T., Huang, Z.-R., & Chen, L.-S. (2018). Aluminum effects on photosynthesis, reactive oxygen species and methylglyoxal detoxification in two *Citrus* species differing in aluminum tolerance. *Tree Physiology*, 38(10), 1548–1565. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpy035>

Hartley, S. E., Fitt, R. N., McLarnon, E. L., & Wade, R. N. (2015). Defending the leaf surface: intra-and inter-specific differences in silicon deposition in grasses in response to damage and silicon supply. *Frontiers in Plant Science*, 6 (35). <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00035>

He, H., Li, Y., & He, L. F. (2019). Aluminum toxicity and tolerance in Solanaceae plants. *South African Journal of Botany*, 123, 23-29.

Hernández V.R.D., Juárez M.A., Pérez H.A., Lozano C.C. J., Zermeño G.A., & González F.J.A. (2022). Influencia de fertilizantes orgánicos y del silicio sobre la fisiología, el rendimiento y la calidad nutracéutica del cultivo de fresa. *Nova Scientia*, 14(28). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-07052022000100101&script=sci_arttext

Horner, H. T., & Arnott, H. J. (1961). The use of a multiple-compartment tray for processing many specimens at one time. *Stain Technology*, 36(3), 204-205.

Interactions between nutrients | CANNA Gardening USA. (2013). Recuperado el 8 de noviembre de 2025, de <https://www.cannagardening.com/articles/interactions-between-nutrients>

Jana, G. A., Al Kharusi, L., Sunkar, R., Al-Yahyai, R., & Yaish, M. W. (2019). Metabolomic analysis of date palm seedlings exposed to salinity and silicon treatments. *Plant Signaling & Behavior*, 14(11), Article 1663112.

Jentzsch M., Becker S., Thielen M. & Speck T. (2022). Functional Anatomy, Impact Behavior and Energy Dissipation of the Peel of *Citrus x limon*: A

Comparison of *Citrus x limon* and *Citrus maxima*, *Plants*. 11 (7), Article 991.
<https://doi.org/10.3390/plants11070991>

Jentzsch, M., Albiez, V., Kardamakis, T. C., & Speck, T. (2024). Analysis of the peel structure of different *Citrus* spp. via light microscopy, SEM and μ CT with manual and automatic segmentation. *Soft Matter*, 20(12), 2804-2811.

Jiang, H. X., Tang, N., Zheng, J. G., Li, Y., & Chen, L. S. (2009). Phosphorus alleviates aluminum-induced inhibition of growth and photosynthesis in *Citrus grandis* seedlings. *Physiologia Plantarum*, 137(3), 298-311.
<https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2009.01288.x>

Jones, L. H. P. (1978). Mineral components of plant cell walls. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 31(10), 94-98. <https://doi.org/10.1093/ajcn/31.10.S94>

Kalra, Y. P. (Ed.). (1998). Handbook of reference methods for plant analysis. CRC Press, Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9780367802233>

Khan, M.M.; Al-Yahyai, R. & Al-Said, F. (2017). *The lime: Botany, Production and Uses*. CAB International.

Kumar, S., Soukup, M., & Elbaum, R. (2017). Silicification in grasses: variation between different cell types. *Frontiers in Plant Science*, 8, Article 438.

Laane, H. M. (2018). The effects of foliar sprays with different silicon compounds. *Plants*, 7(2), 45. <https://doi.org/10.3390/plants7020045>

Lersten, N. R., & Horner, H. T. (2000). Calcium oxalate crystal types and trends in their distribution patterns in leaves of *Prunus* (*Rosaceae: Prunoideae*). *Plant Systematics and Evolution*, 224(1), 83-96.

Lersten, N. R., & Horner, H. T. (2004). Calcium oxalate crystal macropattern development during *Prunus virginiana* (*Rosaceae*) leaf growth. *Canadian Journal of Botany*, 82(12), 1800-1808.

Liang, Y., Chen, Q. I. N., Liu, Q., Zhang, W., & Ding, R. (2003). Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots

of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Plant Physiology*, 160(10), 1157-1164.

Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H., & Song, A. (2015). Silicon in agriculture. *Springer Science*.

Loera Q.M.M., Leyva G.M.A., López A.D., & Herrera E.L. (2015). Phosphite cannot be used as a phosphorus source but is non-toxic for microalgae. *Plant Science*, 231, 124-130. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.11.015>

Lovatt, C. J. (1990). A definitive test to determine whether phosphite fertilization can replace phosphate fertilization to supply P in the metabolism of 'Hass' on 'Duke 7'. *California Avocado Society Yearbook*, 74(1), 61-64.

Lovatt, C. J. (1999). Timing citrus and avocado foliar nutrient applications to increase fruit set and size. *HortTechnology*, 9(4), 607-612.

Lovatt, C. J. (2013). Properly timing foliar-applied fertilizers increases efficacy: A review and update on timing foliar nutrient applications to citrus and avocado. *HortTechnology*, 23(5), 536-541.

Lovatt, C. J., & Mikkelsen, R. L. (2006). Phosphite fertilizers: What are they? Can you use them? What can they do. *Better crops*, 90(4), 11-13.

Lovatt, C. J., & Mikkelsen, R. L. (2006). Phosphite fertilizers: What are they? Can you use them? What can they do. *Better crops*, 90(4), 11-13.

Ma, J. F. & Takahashi, E. (2002). Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. Elsevier.

Mahmoud, L. M., Dutt, M., Shalan, A. M., El-Kady, M. E., El-Boray, M. S., Shabana, Y. M., & Grosser, J. W. (2020). Silicon nanoparticles mitigate oxidative stress of in vitro-derived banana (*Musa acuminata* 'Grand Nain') under simulated water deficit or salinity stress. *South African Journal of Botany*, 132, 155-163.

Marschner, H. (Ed.). (2011). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Academic press.

Martínez A.B., & Quiñones, A. (2017). Principales bioestimulantes y efectos en el cultivo de los cítricos. *Vida Rural*, (436), 56-60.

Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2000). Principles of plant nutrition. (5.^a ed.). Springer.

Mostofa, M. G., Rahman, Md. M., Ansary, Md. M. U., Keya, S. S., Abdelrahman, M., Miah, Md. G., & Phan Tran, L.S. (2021). Silicon in mitigation of abiotic stress-induced oxidative damage in plants. *Critical Reviews in Biotechnology*, 41(6), 918–934. <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1892582>

Mvondo-She, M. A., Mashilo, J., Gatabazi, A., Ndhlala, A. R., & Laing, M. D. (2024). Exogenous silicon application improves chilling injury tolerance and photosynthetic performance of *Citrus*. *Agronomy*, 14(1), 139. <https://doi.org/10.3390/agronomy14010139>

Piperno, D, R., I. Holst, L. Wessel-Beaver & T.C. Andres. (2002). Evidence for the control of phytolith formation in *Cucurbita* fruits by the hard rind (Hr) genetic locus: Archaeological and ecological implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(16), 10923-10928 . <https://doi.org/10.1073/pnas.152275499>

Rachappanavar, V., Kumar, M., Negi, N., Chowdhury, S., Kapoor, M., Singh, S., & Yadav, A. N. (2024). Silicon derived benefits to combat biotic and abiotic stresses in fruit crops: Current research and future challenges. *Plant Physiology and Biochemistry*, 211, Article 108680.

Rastogi, A., Yadav, S., Hussain, S., Kataria, S., Hajhashemi, S., Kumari, P., & Brestic, M. (2021). Does silicon really matter for the photosynthetic machinery in plants?. *Plant Physiology and Biochemistry*, 169, 40-48.

Riaz, M., Yan, L., Wu, X., Hussain, S., Aziz, O., & Jiang, C. (2018). Mechanisms of organic acids and boron induced tolerance of aluminum toxicity: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 165, 25-35.

- Rickard, D. A. (2000). Review of phosphorus acid and its salts as fertilizer materials. *Journal of Plant Nutrition*, 23(2), 161-180. <https://doi.org/10.1080/01904160009382006>
- Ruzin, S. E. (1999). Plant microtechnique and microscopy. *New Phytologist*. 148, 57–58
- Salgado G.S., Palma L.D.J., Zavala C.J., Lagunés E.L.C., Castelán E.M., Ortiz G.C.F., Ventura U.F., Marín A.Á., Moreno C.E. & Rincón R.J.A. (2007). Sistema integrado para recomendar dosis de fertilizantes en las plantaciones de cítricos de Tabasco, México. Colegio de Postgraduados.
- Salgado G.S., Palma L.D.J., Zavala C.J., Ortiz G.C.F., Lagunes E.L.C., Ortiz C.A.I., & Salgado V.S. (2017). Acid soils of the Sabana de Huimanguillo, Tabasco, México. *Agroproductividad*, 10 (12), 16-21. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20193017766>
- SAS Institute (2002) SAS/STAT® 9.1 User's Guide. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA. 5121 p.
- Scott, F.M. & Baker, K.C. (1947). Anatomy of Washington Navel Orange rind in relation to water spot. *Botanical Gazette*. 108, 459–475.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2025). Anuario estadístico de la producción agrícola. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/ (consultado el 07 de agosto del 2025).
- Shi, R., Liu, Z., Li, Y., Jiang, T., Xu, M., Li, J., & Xu, R. (2019). Mechanisms for increasing soil resistance to acidification by long-term manure application. *Soil and Tillage Research*, 185, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.09.004>
- Thao, HTB, Yamakawa, T., Myint, A. K. & Sarr, P. S. (2008). Efectos del fosfito, una forma reducida de fosfato, sobre el crecimiento y la nutrición de fósforo de la espinaca (*Spinacia oleracea* L.). *Soil Science and Plant Nutrition*, 54 (5), 761–768. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2008.00290.x>

- Thielen, M., Speck, T., & Seidel, R. (2015). Impact behaviour of freeze-dried and fresh pomelo (*Citrus maxima*) peel: influence of the hydration state. *Royal Society open science*, 2(6), Article 140322. <https://doi.org/10.1098/rsos.140322>
- Valla, J. J. (2005). *Botánica. Morfología de las plantas superiores*. Editorial Hemisferio Sur.
- Varadarajan, D. K., Karthikeyan, A. S., Matilda, P. D., & Raghothama, K. G. (2002). Phosphite, an analog of phosphate, suppresses the coordinated expression of genes under phosphate starvation. *Plant Physiology*, 129(3), 1232-1240.
- Vázquez, M. E., Millán, G. J., & Vázquez, M. E. (2017). *Acidez del suelo*. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/154576>
- Walker, C. D., & Lance, R. C. M. (1991). Silicon accumulation and ¹³C composition as indices of water-use efficiency in barley cultivars. *Functional Plant Biology*, 18(4), 427-434. <https://doi.org/10.1071/PP9910427>
- Wang, M., Wang, R., Mur, L. A. J., Ruan, J., Shen, Q., & Guo, S. (2021). Functions of silicon in plant drought stress responses. *Horticulture Research*, 8, Article 254. <https://doi.org/10.1038/s41438-021-00681-1>
- Wang, Y., Yu, W., Cao, Y., Cai, Y., Lyi, S. M., Wu, W., & Liu, J. (2020). An exclusion mechanism is epistatic to an internal detoxification mechanism in aluminum resistance in Arabidopsis. *BMC Plant Biology*, 20(1), Article 122.
- Wu, L.; Gao, X.; Xia, F.; Joshi, J.; Borza, T. & Wang P.G. (2018). Biostimulant and fungicidal effects of phosphite assessed by GC-TOF-MS analysis of potato leaf metabolome. *Elsevier*, 106(1), 49-56. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2018.12.001>
- Yan, G., Fan, X., Peng, M., Yin, C., Xiao, Z., & Liang, Y. (2020). Silicon improves rice salinity resistance by alleviating ionic toxicity and osmotic constraint in an organ-specific pattern. *Frontiers in Plant Science*, 11, Article 260.

Zhang, G.; Cui, Y.; Ding, X. & Dai, Q. (2013). Stimulation of phenolic metabolism by silicon contributes to rice resistance to sheath blight. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 176, 118–124. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200008>

7. ANEXO

Cuadro 1A. Resultados del análisis de correlación lineal entre pares de variables evaluadas en *Citrus x latifolia* 'Persa' bajo la aplicación foliar de silicio y fosfitos.

	SD	F	A	CUA	SPAD	
SD	1					
F	-0.174	1				
A	-0.22	0.488	*	1		
CUA	-0.041	0.083	*	0.73	**	1
SPAD	-0.094	-0.15		0	-0.05	1
PFH	-0.244	0.183		0.12	0.17	0.18
PSH	-0.21	0.236		0.31	0.18	0.02
PFF	0.368	0.075		0.04	0.12	0.15
PSF	0.18	-0.2		-0.17	0.15	0.29 **
IR	0.175	-0.06		0.26	0.53 **	0.09
ATT	-0.379	0.407	*	0.16	-0.11	-0.15
SST	-0.199	-0.08		0.02	0.01	-0.17
FZA	0.233	1E-04		0.04	0.12	0.1
L	0.337	-0.41	*	-0.29	0.02	-0.15
C	0.226	-0.17		-0.41 *	-0.34	-0.19
H	-0.121	0.343		0.11	0.09	-0.16
NH	-0.035	0.116		0.06	0.01	0.05 **
CaH	-0.035	0.103		0.23	0.28	-0.04
MgH	0.196	0.173		0.47 *	0.5 *	0.02 **
PH	-0.346	0.287		0.18	-0.09	-0.05
NaH	-0.167	0.18		0.14	-0.03	-0.14
KH	-0.118	-0.08		-0.17	-0.18	0.03
NF	-0.174	0.123		0.49 *	0.08	0.15 **
CaF	0.006	0.193		0.57 **	0.49 **	0
MgF	-0.128	0.172		0.49 *	0.53 **	0.06
PF	-0.526 **	0.261		0.06 **	0.15 *	0.01
NaF	-0.399 *	-0.2		-0.26	-0.1	0.23 *
KF	-0.029	-0.01		0.19	0.23	0.06
CuH	0.008	0.026		0.12	0.15	0.01
MnH	0.272	-0.2		0.25	-0.04	0.03
FeH	-0.299	0.08		0.08	-0.21	0.09
ZnH	0.052	-0.27		0.07 *	0.06	0.12
CuF	0.124	0.129		0.17	0.13	-0.11
MnF	-0.066	-0.03		0.15	0.07	-0.02
FeF	-0.064	-0.13		0.25 **	0.13 *	-0.17
ZnF	0.164	-0.38		0.07 **	0.15 **	0

SD: densidad estomática .F: número de flores por árbol, A: porcentaje de amarre de flor, CUA: porcentaje de cuajado de fruto, SPAD: índice de verdor, PFH: peso fresco de hoja, PSH: peso seco de hoja, PFF: peso fresco de fruto, PSF: peso seco de fruto, IR: índice de redondez del fruto, ATT: porcentaje de acidez titulable, SST: sólidos solubles totales, FZA: firmeza del fruto, L: luminosidad del fruto, C: croma del fruto, H: tono del fruto, NH: concentración de amonio en hoja, NF: concentración de amonio en fruto; PH: concentración de fósforo en hoja; PF: concentración de fósforo en fruto; KH: concentración de potasio en hoja; PF: concentración de potasio en fruto; CaH: concentración de calcio en hoja; CaF: concentración de calcio en fruto; MgH: concentración de magnesio en hoja; MgF: concentración de magnesio en fruto; NaH: concentración de sodio en hoja; NaF: concentración de sodio en fruto; CuH: concentración de cobre en hoja; CuF: concentración de cobre en fruto; MnH: concentración de manganeso en hoja; MnF: concentración de manganeso en fruto; FeH: concentración de hierro en hoja; FeF: concentración de hierro en fruto; ZnH: concentración de zinc en hoja; ZnF: concentración de zinc en fruto.

Cuadro 1A. Continuación

	PFH	PSH	PFF	PSF	IR	ATT	SST	FZA	L	C	H
PSH	0.17	1									
PFF	0.25 *	-0	1								
PSF	0.14	-0	0.4 **	1							
IR	0.48	-0.19	0.35 *	0.06	1						
ATT	-0	-0	-0	-0 *	-0.05	1					
SST	-0.3 **	0.1	-0	-0	-0.02	0.1	1				
FZA	0.43 **	-0	0.4 **	0 **	-0.1	-0 *	0 **	1			
L	-0.1	-0	0.1	0	-0.29	-0	-0	0	1		
C	-0	-0	0.1	0	0.03	-0	-0	-0	0.4 **	1	
H	0.13	-0	0.2	0	-0.01	-0	-0	0.3 **	-0.1	0.2	1
NH	-0.2	0.1	0.4	-0	0.05	0.2	0 *	0.4 **	-0.2	-0.1	-0 *
CaH	-0.2 *	0	-0	0	0.12	0.1	0	0.2 **	-0.1	-0.2	-0
MgH	0.11	0.1	0.2	0	-0.17	0.1	0 *	0.2 *	0	-0.1	0.1
PH	-0.2	0.1	0.3 **	0	-0.23	0.2	0 *	0.4 *	-0.2	-0.1	-0 **
NaH	0.01	0.1	-0	-0	0.23	0.2	0	-0	-0.1	0.1	0
KH	0.2	0.2	0.4 **	-0	-0.17	0.1	0	0.5 **	0.2 *	-0.1	0.1
NF	0.18	0.2	0.1	-0	-0.03	0.4 *	-0	0	0.4 *	-0.2	0.3
CaF	0.08	-0	0.2	-0	0.15	0.1	0	0	0.1 *	0.1	0
MgF	0.05	0.1	0.2	-0	-0.05	0.2 *	0	0.1	0.1 *	-0.2	0
PF	0.14	0	0.2 **	-0	-0.18	0.1	-0	0.4 **	0.1	0	0
NaF	0.19	-0	0.2	0	0.04	-0	-0	-0 **	0.1	-0.1	0
KF	0.09	-0	0.2	0	-0.01	0.1	-0	0.2 *	0.1	-0.1	0.3 **
CuH	0.09	0.1	0.1	0	0.07	-0	-0	-0	0.1	0	0.1
MnH	0.34 **	0.1	0.3 **	0	0.05	-0	-0	0.4 *	0.2	0.1	0.2 *
FeH	0.21 **	0	-0 **	-0	0.008	0.1	0	0.4 *	0.2 *	-0.1	-0 **
ZnH	0.18	0.1	0.3 **	0 *	0.18 *	-0	-0	0.4 **	0.2	-0.1	0.1
CuF	0.13	-0	0.1	0	0.12	-0	0	0	0.2	-0.1	0
MnF	0.1	0	0.4 **	0	-0.16	0.1	-0	-0 *	0.1	-0	-0
FeF	0.18	-0	0.1	0	0.11	-0	-0	0.1	0.1	0.2 *	0.2
ZnF	0.16	-0	0.4 **	0	0.15	-0	-0	0.5 **	0.1	-0	0.1

PFH: peso fresco de hoja, PSH: peso seco de hoja, PFF: peso fresco de fruto, PSF: peso seco de fruto, IR: índice de redondez del fruto, ATT: porcentaje de acidez titulable, SST: sólidos solubles totales, FZA: firmeza del fruto, L: luminosidad del fruto, C: croma del fruto, H: tono del fruto, NH: concentración de amonio en hoja, NF: concentración de amonio en fruto; PH: concentración de fósforo en hoja; PF: concentración de fósforo en fruto; KH: concentración de potasio en hoja; PF: concentración de potasio en fruto; CaH: concentración de calcio en hoja; CaF: concentración de calcio en fruto; MgH: concentración de magnesio en hoja; MgF: concentración de magnesio en fruto; NaH: concentración de sodio en hoja; NaF: concentración de sodio en fruto; CuH: concentración de cobre en hoja; CuF: concentración de cobre en fruto; MnH: concentración de manganeso en hoja; MnF: concentración de manganeso en fruto; FeH: concentración de hierro en hoja; FeF: concentración de hierro en fruto; ZnH: concentración de zinc en hoja; ZnF: concentración de zinc en fruto.

Cuadro 1A. Continuación

	NH	CaH	MgH	PH	NaH	KH	NF	CaF	MgF	PF	NaF	KF
CaH	0.4 **	1										
MgH	0	0	1									
PH	0.6 **	0 *	-0.2 *	1								
NaH	0.1	-0 *	-0.2 *	0.2	1							
KH	0.7 **	0 **	0.2 *	0.7 **	0.2	1						
NF	0.1 *	0	0.2	0.3 *	0.2	-0	1					
CaF	0	0 **	0.2 *	0.1	0.2	0.1	0.2	1				
MgF	0.3 **	0 **	0.3 **	0.4 **	0	0.4 **	0.2	0 **	1			
PF	0.5 **	0 **	0	0.5 **	0	0.5 **	0.3	0	0.3 **	1		
NaF	0.3 *	0	0.1	-0.3 **	-0	-0 **	-0	0	-0.1	-0.3 *	1	
KF	0.2 *	0 **	0	0.2 **	-0.1 *	0.3 **	-0	0 *	0.3 *	0.2	-0	1
CuH	0.1	0	0.1	-0.2 *	-0.2	-0	0	0	-0	0.1	-0.1	-0
MnH	0.6 **	0 **	0.1	-0.7 **	-0.1	-1 **	-0	-0	-0.3	-0.4 **	0.3 **	-0 *
FeH	0.4 **	0 *	0.4 **	0.6 **	0.2	0.6 **	0.1	0	0.2 *	0.3 *	-0.2	0.2 *
ZnH	0.6 **	0 **	0.1	0.4 **	-0.2	0.4 **	-0	0	-0.2	-0.3	0.3 **	0
CuF	-0	-0	-0.1	-0.1 *	-0.1	0.2 **	0.1	0	-0.2	-0.1	-0	-0
MnF	0.2	0	-0	0.1	-0	0.2	-0	0	0.2	0.2 *	-0.1	0.1
FeF	-0	-0	-0.2	-0.1	0.1	0	-0	-0	-0.2	-0	0.1	0.1
ZnF	-1 **	0 *	0.2	-0.6 **	0	0.7 **	-0	0	-0.2	0.5 **	0.5 **	-0

NH: concentración de amonio en hoja; NF: concentración de amonio en fruto; PH: concentración de fosforo en hoja; PF: concentración de fosforo en fruto; KH: concentración de potasio en hoja; PF: concentración de potasio en fruto; CaH: concentración de calcio en hoja; CaF: concentración de calcio en fruto; MgH: concentración de magnesio en hoja; MgF: concentración de magnesio en fruto; NaH: concentración de sodio en hoja; NaF: concentración de sodio en fruto; CuH: concentración de cobre en hoja; CuF: concentración de cobre en fruto; MnH: concentración de manganeso en hoja; MnF: concentración de manganeso en fruto; FeH: concentración de hierro en hoja; FeF: concentración de hierro en fruto; ZnH: concentración de zinc en hoja; ZnF: concentración de zinc en fruto.

Cuadro 1A. Continuación

	CuH	MnH		FeH		ZnH		CuF		MnF		FeF		ZnF
CuH	1													
MnH	0.1	1												
FeH	-0	-0	**	1										
ZnH	0.1	1	**	0.4	**	1								
CuF	0.2	0		-0		0.2		1						
MnF	0	0		0.1		-0.2		-0.1		1				
FeF	0	0		0.1		0.2		0		-0		1		
ZnF	0	1	**	0.4	**	0.6	**	0.2		-0	*	0.2	*	1

CuH: concentración de cobre en hoja; CuF: concentración de cobre en hoja; MnH: concentración de manganeso en hoja; MnF: concentración de manganeso en fruto; FeH: concentración de hierro en hoja; FeF: concentración de hierro en fruto; ZnH: concentración de zinc en hoja; ZnF: concentración de zinc en fruto.

