



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
CAMPUS LOMA BONITA

IMPACTO DE LA FERTILIZACIÓN CON CALCIO Y MAGNESIO EN EL
CONTENIDO DE NUTRIENTES, PIGMENTOS FOTOSINTÉTICOS Y
RENDIMIENTO DE CHILE SOLEDAD

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
Maestra en Producción y Procesamiento Agrícola

PRESENTA:

KEYLA NINIVE LÓPEZ LUÉVANO

Director:

Dr. Hipólito Hernández Hernández

Codirector:

Dr. Rogelio Enrique Palacios Torres

Loma Bonita, Oaxaca del 2024



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

OFICIO	DEP-MPPA/2024/006
ASUNTO	Autorización de impresión de tesis

San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca, a 26 de febrero de 2024

M.C. HÉCTOR LÓPEZ ARJONA
VICERRECTOR ACADÉMICO
UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN
PRESENTE

Sirva la presente para informarle que, el jurado evaluador del examen para obtener el grado de **Maestra en Producción y Procesamiento Agrícola** de la IB. Keyla Nínive López Luevano, con número de Matrícula 21180010, ha autorizado la impresión del manuscrito que lleva por título "Impacto de la fertilización con calcio y magnesio en el contenido de nutrientes, pigmentos fotosintéticos y rendimiento de chile soledad", para su posterior presentación y defensa por el sustentante.

Agradezco su atención y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración.



Atentamente
terra uberrima, mens aperta
Bou Lo-tama, chí jí jú

Dr. José Abad Zavaleta
Jefe de la División de Estudios de Posgrado



C.c.p. Dr. Hipólito Hernández Hernández – Director de tesis.
C.c.p. Dra. Ana Rosa Ramírez Seañez – Coordinadora de la Maestría en Producción y Procesamiento Agrícola
C.c.p. M. E. Yesenia Barrientos Arenal – Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
C.c.p. Archivo

CAMPUS TUXTEPEC
C. Circuito central No. 200, Col. Parque Industrial,
C.P. 38301, Tuxtepec, Oax.
Tel. 01(287)8759240

www.unpa.edu.mx

CAMPUS LOMA BONITA
Av. Ferrocarril S/N, Ciudad universitaria.
C.P. 68400, Loma Bonita, Oax.
Tel. 01(281)8729230



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

OFICIO	DEP-MPPA/2024/005
ASUNTO	Jurado para examen de grado

San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca, a 26 de febrero de 2024

IB. KEYLA NÍNIVE LÓPEZ LUEVANO
MAESTRÍA EN PRODUCCIÓN Y PROCESAMIENTO AGRÍCOLA
UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN
PRESENTE

Por este medio le informo que el jurado evaluador de su examen para obtener el grado de **Maestra en Producción y Procesamiento Agrícola** estará integrado por los siguientes investigadores.

Profesor Investigador	Jurado de Examen
Dra. Ana Rosa Ramírez Seañez	Presidente
Dr. Hipólito Hernández Hernández	Vocal
Dr. José Antonio Yam Tzec	Secretario
Dra. Maribel Reyes Osornio	Primer Suplente
Dr. Rogelio Enrique Palacios Torres	Segundo Suplente

Sin más por el momento, le envío saludos cordiales.

Atentamente
terra uberrima, mens aperta
Bøu Lo-tama, chl jf jù


Dr. José Abad Zavaleta
Jefe de la División de Estudios de Posgrado


UNPA
terra uberrima, mens aperta
Bøu Lo-tama, chl jf jù
DAXACA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO


Héctor López Arjona
Vicerrector Académico
Vo. Bo. VICE-RECTORIA ACADEMICA


UNPA
terra uberrima, mens aperta
Bøu Lo-tama, chl jf jù
DAXACA
VICE-RECTORIA ACADEMICA

C.c.p. Dr. Hipólito Hernández Hernández – Director de tesis.
C.c.p. Dra. Ana Rosa Ramírez Seañez – Coordinadora de la Maestría en Producción y Procesamiento Agrícola
C.c.p. M. E. Yesenia Barrientos Arenal – Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
C.c.p. Archivo

CAMPUS TUXTEPEC
C. Circuito central No. 200, Col. Parque Industrial.
C.P. 38301, Tuxtepec, Oax.
Tel. 01(287)8759240

www.unpa.edu.mx

CAMPUS LOMA BONITA
Av. Ferrocarril S/N, Ciudad universitaria.
C.P. 68400, Loma Bonita, Oax.
Tel. 01(281)8729230

HOJA DE ORIGINALIDAD

El presente trabajo no ha sido aceptado o empleado para el otorgamiento de título o grado diferente o adicional al actual. La tesis es resultado de las investigaciones del autor, excepto donde se indican las fuentes de información consultadas. El autor otorga su consentimiento a la **Universidad del Papaloapan** para la reproducción del documento con el fin del intercambio bibliotecario siempre y cuando se indique la fuente.

AGRADECIMIENTOS

Todo mi esfuerzo es gracias a Dios, familia y amigos.

A mi madre María del Carmen Luévano Almodóvar, mi Tío Víctor Manuel Luevano Almodóvar, mis hermanas Isol Dennise López Luévano y Brenda García Carvajal por apoyarme incondicionalmente.

A mis amigos Mayeli, Irving, Max, Rosalba y Jhonas por acompañarme en momentos difíciles y a pesar de la distancia, estar presentes. A Luis Fernando por nunca dejarme sola a lo largo de este proceso.

El presente trabajo de investigación se logró gracias a la supervisión de mi director de tesis, el Dr. Hipolito Hernández Hernández; mi codirector, el doctor Rogelio Enrique Palacios Torres; y a la doctora Ana Rosa Ramírez Seañez; a quienes me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento por hacer posible la culminación de este proyecto y por toda la paciencia, el tiempo y la dedicación que tuvieron conmigo. Al M.C Moisés Ramírez Meraz del INIFAP por la donación de las semillas de chile soledad CHISER-522.

A mi Alma Mater, la Universidad del Papaloapan, por los conocimientos brindados a través de mis profesores.

Finalmente agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por el apoyo económico otorgado para la realización de mis estudios de Maestría.

DEDICATORIA

A las personas que me aman

ÍNDICE DE CONTENIDO

HOJA DE ORIGINALIDAD	I
AGRADECIMIENTOS	II
DEDICATORIA	III
ÍNDICE DE CONTENIDO	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
RESUMEN	X
ABSTRACT	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Diversidad de especies del género <i>Capsicum</i>	3
2.2 Producción agrícola nacional de Chile	3
2.3 Importancia del cultivo de Chile	5
2.3.1 Características físicas	6
2.4 Capsaicinoides	7
2.5 Producción de Chile Soledad	7
2.5.1 Descripción botánica de <i>Capsicum annuum</i>	8
2.5.1.1 Hoja	8
2.5.1.2 Tallo	8
2.5.1.3 Flor	8
2.5.1.4 Fruto	8
2.5.2 Condiciones climáticas del cultivo	9
2.5.3 Condiciones de suelo	9
2.5.4 Plagas y enfermedades	9
2.6 Nutrición de cultivos	10
2.6.1 Macronutrientes y micronutrientes	10
2.6.1.1 Importancia del calcio en las plantas	10
2.6.1.1.1 Deficiencia de calcio en plantas	11
2.6.1.2 Importancia del magnesio en las plantas	11
2.6.1.2.1 Deficiencia de magnesio en plantas	12
2.7 Fotosíntesis	12
2.7.1 Pigmentos fotosintéticos: Clorofila a y b	12

3. ANTECEDENTES	14
4. HIPÓTESIS	15
5. OBJETIVOS	16
5.1 Objetivo general.....	16
5.2 Objetivos específicos.....	16
6. MATERIALES Y MÉTODOS	17
6.1 Localización y características del área de cultivo.....	17
6.1.1 Ubicación.....	17
6.1.2 Condiciones climáticas.....	17
6.1.3 Descripción del suelo.....	18
6.2 Material vegetal y siembra.....	19
6.3 Diseño experimental, preparación de suelo y descripción de los tratamientos.....	19
6.4 Manejo agronómico del experimento.....	20
6.5 Variables de respuesta.....	21
6.5.1 Crecimiento.....	22
6.5.1.1 Diámetro del tallo y altura de la planta.....	22
6.5.1.2 Número de frutos.....	22
6.5.1.3 Área foliar.....	22
6.5.2 Savia.....	23
6.5.2.1 Grados brix y contenido de nutrientes en extracto celular de peciolo.....	23
6.5.2.2 Contenido de calcio.....	23
6.5.3 Solución del suelo.....	24
6.5.3.1 Extracción de pasta saturada del suelo.....	24
6.5.4 Pigmentos fotosintéticos.....	24
6.5.4.1 Clorofila a, b y a+b.....	24
6.5.5 Biomasa.....	25
6.5.5.1 Peso fresco y seco de la planta.....	25
6.5.6 Rendimiento.....	26
6.5.7 Calidad de frutos.....	26
6.5.7.1 Grados brix, pH y acidez titulable total.....	26
6.5.7.2 Contenido de capsaicina.....	27
6.5.7.3 Longitud, diámetro, grosor de pericarpio y peso de frutos.....	28
6.6 Análisis estadístico.....	28

7. RESULTADOS	29
7.1 Experimento de calcio	29
7.1.1 Crecimiento	29
7.1.2 Determinación de grados brix y nutrientes en savia	30
7.1.3 Suelo	34
7.1.4 Pigmentos fotosintéticos	37
7.1.5 Biomasa fresca y seca	39
7.1.6 Rendimiento del cultivo	41
7.1.7 Evaluación de la calidad de frutos	42
7.1.7.1 Grados brix, pH, porcentaje de ácido cítrico y contenido de capsaicina	42
7.1.7.2 Tamaño	45
7.2 Experimento de magnesio	47
7.2.1 Crecimiento	47
7.2.2 Savia	49
7.2.3 Suelo	52
7.2.4 Pigmentos fotosintéticos	56
7.2.5 Biomasa fresca y seca	58
7.2.6 Rendimiento del cultivo	60
7.2.7 Calidad de frutos	62
7.2.7.1 Grados brix, pH, porcentaje de ácido cítrico y contenido de capsaicina	62
7.2.7.2 Tamaño	65
8. DISCUSIÓN	67
8.1 Experimento de calcio	67
8.2 Experimento de magnesio	72
9. CONCLUSIONES	79
10. LITERATURA CITADA	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Producción de chile verde en México en el 2022 (SIAP, 2022).	4
Tabla 2. Principales chiles cultivados en México, variedades de <i>Capsicum</i> y la principal zona productora (Hernández y Ocotero, 2016).	6
Tabla 3. Valores obtenidos del análisis de suelo y recomendación de fertilización sugerida por el laboratorio Fetrtilab.	18
Tabla 4. Productos aplicados para el control de plagas y enfermedades en el ciclo del cultivo de chile soledad variedad CHISER-522 a campo abierto.	21

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura molecular de capsaicina (Vázquez-Flota <i>et al.</i> , 2007).	7
Figura 2. Condiciones climáticas durante el ciclo de cultivo de los experimentos de calcio y magnesio.....	17
Figura 3. Curva de calibración de capsaicina (mg L^{-1})	28
Figura 4. Efecto de los tratamientos de calcio sobre el diámetro del tallo (A) y altura de la planta (B).....	29
Figura 5. Efecto de los tratamientos de calcio sobre el número de frutos (A) y área foliar (B)..	30
Figura 6. Efecto de los tratamientos de calcio sobre los grados brix de la savia del peciolo.....	31
Figura 7. Efecto de los tratamientos de calcio sobre el contenido de nitratos (A), fosfatos (B), potasio (C) y calcio (D) de la planta.....	33
Figura 8. Efecto de los tratamientos de calcio sobre la conductividad eléctrica (A) y el pH (B) en la solución del suelo.....	34
Figura 9. Efecto de los tratamientos de calcio sobre nitratos (A), fosfatos (B) potasio (C) y calcio (D) en la solución del suelo.....	36
Figura 10. Efecto de los tratamientos de calcio sobre los pigmentos fotosintéticos: clorofila a ($\mu\text{g mL}^{-1}$) (A), clorofila b ($\mu\text{g mL}^{-1}$) (B) y clorofila ab ($\mu\text{g mL}^{-1}$) (C) en las hojas de chile soledad.....	38
Figura 11. Efecto de los tratamientos de calcio sobre el peso fresco (A y C) y seco (B y D) en frutos y raíz de chile soledad.	39
Figura 12. Efecto de los tratamientos de calcio sobre el peso fresco (A) y peso seco (B) en tallo y hojas de chile soledad.....	40
Figura 13. Efecto de los tratamientos de calcio sobre el rendimiento en (t ha^{-1}) (A) y por planta (g) (B) en chile soledad.	41
Figura 14. Gráfica de regresión experimento de calcio.	42
Figura 15. Efecto de los tratamientos de calcio sobre los grados brix (A), pH (B), % de ácido cítrico (C) y contenido de capsaicina ($\text{mg de capsaicina/g de peso seco}$) (D) en frutos de chile soledad de tamaño (chico, mediano, grande).....	44
Figura 16. Efecto de los tratamientos de calcio sobre la longitud de fruto (A), diámetro de fruto (B), peso de fruto (C) y grosor de pericarpio (D) en frutos de chile soledad de tamaño (chico, mediano, grande).....	46
Figura 17. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre el diámetro del tallo (A) y altura de la planta (B).....	47
Figura 18. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre el número de frutos (A) y área foliar (B).	48
Figura 19. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre los grados brix de savia en la planta.....	49
Figura 20. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre el contenido de nitratos (A), fosfatos (B), potasio (C) y magnesio (D) de la planta.....	51
Figura 21. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre la conductividad eléctrica (A) y el pH (B) en la solución del suelo.	53
Figura 22. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre nitratos (A), fosfatos (B) potasio (C) y magnesio (D) en la solución del suelo.	55

Figura 23. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre los pigmentos fotosintéticos: clorofila a ($\mu\text{g mL}^{-1}$) (A), clorofila b ($\mu\text{g mL}^{-1}$) (B) y clorofila ab ($\mu\text{g mL}^{-1}$) (C) en las hojas de chile soledad.....	57
Figura 24. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre el peso fresco (A) y seco (B) en frutos de chile soledad.....	58
Figura 25. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre el peso fresco (A) y seco (B) en raíz de chile soledad.....	59
Figura 26. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre el peso fresco (A) y peso seco (B) en tallo y hojas de chile soledad.	60
Figura 27. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre el rendimiento en (t ha^{-1}) (A) y por planta (g) (B) en chile soledad.....	61
Figura 28. Gráfica de regresión cuadrática de meseta en el experimento de magnesio.	62
Figura 29. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre los grados brix (A), pH (B), % de ácido cítrico (C) y contenido de capsaicina (mg de capsaicina/g de peso seco) (D) en frutos de chile soledad de tamaño (chico, mediano, grande).	64
Figura 30. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre la longitud de fruto (A), diámetro de fruto (B), peso de fruto (C) y grosor de pericarpio (D) en frutos de chile soledad de tamaño (chico, mediano, grande).	66

RESUMEN

El cultivo de chile soledad (*Capsicum annuum* L. cv. CHISER-522) requiere macronutrientes como calcio y magnesio que aumenten el contenido de capsaicinoides y el rendimiento del cultivo. El objetivo del presente estudio fue determinar el mejor nivel de fertilización con calcio y magnesio en el crecimiento, nutrientes en savia y solución del suelo, pigmentos fotosintéticos, biomasa, rendimiento y calidad de fruto de chile soledad. El trabajo de investigación consistió en dos experimentos: (1) aplicación edáfica de calcio (nitrato de calcio) y (2) aplicación edáfica de magnesio (sulfato de magnesio), los cuales se llevaron a cabo bajo condiciones de temporal (2022-2023) en un diseño en bloques al azar con cuatro repeticiones. Los resultados mostraron que el nitrato de calcio aumentó el diámetro del tallo, altura, número de frutos y área foliar en la planta con respecto al testigo. Así como en savia aumentó el contenido de nitratos y calcio, en la solución del suelo mejoró la conductividad eléctrica, nitratos, fosfatos, potasio y calcio. Los pigmentos fotosintéticos como clorofila a y total se vieron favorecidas. En cuanto a biomasa, el peso fresco y seco de tallo y hojas aumentó. Se alcanzó un rendimiento de 11 t ha⁻¹ y de 450 g por planta, donde la concentración crítica de nitrato de calcio fue de 11 kg ha⁻¹. Respecto a la calidad de fruto el calcio mejoró la longitud en tamaño chico, mediano y grande. Además, aumentó grados brix y contenido de capsaicina. El sulfato de magnesio aumentó el diámetro del tallo, altura, número de frutos y área foliar en la planta con respecto al testigo. En savia mejoró el contenido de nitratos, fosfatos, potasio y magnesio, así como en la solución del suelo aumentó los nitratos, fosfatos y magnesio. Los pigmentos como clorofila a y total mejoraron su contenido. La biomasa seca y fresca de frutos, tallo, hojas y raíz aumentó. Se alcanzó un rendimiento de 14 t ha⁻¹ y 450 g por planta, donde la concentración crítica de sulfato de magnesio fue de 6 kg ha⁻¹. En frutos, aumentó el contenido de capsaicina y mejoró la longitud, diámetro, peso y grosor de pericarpio con respecto al testigo. Se puede concluir que la fertilización adecuada con calcio y magnesio en el cultivo de chile soledad variedad CHISER-522 es necesario para mejorar el rendimiento y la calidad del fruto.

ABSTRACT

The cultivation of Soledad chili (*Capsicum annuum* L. cv. CHISER-522) requires macronutrients such as calcium and magnesium to increase capsaicinoid content and crop yield. The aim of this study was to determine the optimal level of fertilization with calcium and magnesium on the growth, sap and soil solution nutrients, photosynthetic pigments, biomass, yield, and fruit quality of Soledad chili. The research consisted of two experiments: (1) soil application of calcium (calcium nitrate) and (2) soil application of magnesium (magnesium sulfate), which were conducted under rainfed conditions (2022-2023) in a randomized complete block design with four replications. The results showed that calcium nitrate increased stem diameter, height, number of fruits, and leaf area compared to the control. Additionally, it increased nitrate and calcium content in sap, and improved electrical conductivity, nitrate, phosphate, potassium, and calcium in soil solution. Photosynthetic pigments such as chlorophyll a and total chlorophyll were favored. Biomass, both fresh and dry weight of stem and leaves, increased. A yield of 11 t ha⁻¹ and 450 g per plant was achieved, with a critical calcium nitrate concentration of 11 kg ha⁻¹. Regarding fruit quality, calcium improved length in small, medium, and large sizes, increased brix degrees, and capsaicin content. Magnesium sulfate increased stem diameter, height, number of fruits, and leaf area compared to the control. It improved nitrate, phosphate, potassium, and magnesium content in sap, as well as increased nitrate, phosphate, and magnesium in soil solution. Chlorophyll a and total pigments content improved. Dry and fresh biomass of fruits, stem, leaves, and roots increased. A yield of 14 t ha⁻¹ and 450 g per plant was achieved, with a critical magnesium sulfate concentration of 6 kg ha⁻¹. In fruits, capsaicin content increased, and length, diameter, weight, and pericarp thickness improved compared to the control. In conclusion, appropriate fertilization with calcium and magnesium in the cultivation of Soledad chili variety CHISER-522 is necessary to improve yield and fruit quality.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la agricultura depende del uso de fertilizantes químicos, ya que mejoran la productividad de los cultivos, sin embargo, su uso excesivo contamina el agua, el aire y el suelo, lo que genera daños para el medio ambiente (Pahalvi *et al.*, 2021). Durante el año 2019 se usaron aproximadamente 6,017,599 toneladas de fertilizantes en México (FAOSTAT, 2021). La eficiencia de dichos productos y el impacto en el suelo puede ser estudiado con la aplicación controlada, que permita determinar el óptimo nivel de fertilización de la planta y asegure un manejo eficaz del suelo (FAO, 2002). México es un país con diversidad de variedades y especies de chile incluyendo: jalapeño, habanero, serrano y tipo soledad (Ramírez *et al.*, 2019). El chile soledad es un cultivo hortícola de gran importancia económica en la región del Papaloapan de México. En el año Agrícola 2022 (OI + PV), el estado de Oaxaca ocupó el segundo lugar a nivel nacional con una producción estimada de 2,305 ton y un rendimiento de 6.44 t ha⁻¹ (SIAP, 2022). La adecuada nutrición de las plantas es uno de los elementos clave para incidir en el crecimiento y desarrollo. Particularmente el calcio es uno de los macronutrientes esenciales de las plantas, decisivo para que se lleven a cabo el transporte de otros nutrientes y procesos celulares (Rubio *et al.*, 2003; Thor, 2019). Buczkowska *et al.* (2016) establecieron que, en la planta, el calcio no se reutiliza como se espera por lo que la deficiencia se manifiesta a través de cambios morfológicos en hojas jóvenes, ápices de tallos, raíces y en frutos, concluyendo que el calcio tiene un efecto positivo sobre el rendimiento y la acumulación de vitamina C en comparación con otros fertilizantes en frutos de pimiento. Otro macronutriente de suma importancia es el magnesio. Su deficiencia afecta la fotosíntesis, ya que participa en el transporte de carbohidratos desde los órganos de la fuente al sumidero. Por lo que, el almacenamiento de azúcares en la hoja se considera una respuesta temprana a la deficiencia del mismo, ya que es un macronutriente que se transporta con mayor afinidad en hojas (Farhat *et al.*, 2016). En ese sentido, cuando se aumenta la cantidad de magnesio en sitios deficientes implica el incremento de la calidad de los cultivos agrícolas, específicamente cuando estas características del cultivo dependen de procesos

fotosintéticos inducidos por dicho macronutriente (Gerendás y Führs, 2013). Azofeifa y Moreira (2008) analizaron la absorción y distribución de los nutrimentos en el cultivo de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L. cv. Hot), obtuvieron que durante el ciclo de crecimiento las cantidades de nutrimentos variaron en distintas partes de la planta, siendo al final del ciclo donde la planta suministra K, Ca y Mg principalmente en la parte aérea, P y S en fruto, N entre la parte aérea y los frutos. En cultivo de chile de agua (*Capsicum annuum* L.) Valentín-Miguel *et al.* (2013) determinaron el contenido y extracción nutrimental de N, P, K, Ca y Mg, donde obtuvieron los mayores contenidos de P, K y Mg en etapa de floración y fructificación, identificaron que al final del ciclo la extracción nutrimental (g planta⁻¹) fue de 6.93, 1.12, 16.62, 3.54 y 1.27 de N, P, K, Ca y Mg, respectivamente. Investigaciones recientes que se tienen sobre la aplicación de fertilizantes con calcio y magnesio, sobre todo el papel de las dosis indica necesario el uso racional y controlado de estos elementos. Por lo que, para los productores de Loma Bonita Oaxaca, sería de gran ayuda que se evalúen los niveles de la aportación de calcio y magnesio para una mayor producción del cultivo de chile soledad, específicos para cada región. Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo determinar el mejor nivel de fertilización tanto de calcio como de magnesio en el contenido de nutrientes, pigmentos fotosintéticos y rendimiento de chile soledad (*Capsicum annuum* L.) bajo condiciones de temporal en Loma Bonita, Oaxaca.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Diversidad de especies del género *Capsicum*

En México se reportan 64 tipos de chiles criollos, siendo Oaxaca el estado donde se encuentran 25 de ellos, Guerrero con 12, Puebla con 10 y Veracruz con 9. Los chiles se clasifican por su taxonomía en especies, origen geográfico y procesamiento después de la cosecha (Vera-Sánchez *et al.*, 2016). De las 33 especies de *Capsicum*, cinco han sido domesticadas: *C. annuum* L., *C. baccatum* L., *C. chinense* Jacq., *C. frutescens* L. y *C. pubescens* (Kraft *et al.*, 2014; Pickersgill, 1971). Cabe mencionar que la especie *Capsicum annuum* es la más importante en México, debido a su abundancia genética (Bobadilla-Larios *et al.*, 2017; Pérez-Castañeda *et al.*, 2015).

2.2 Producción agrícola nacional de chile

El cultivo de chile verde es de gran importancia ya que a nivel nacional aporta el 20.2 % de la producción de hortalizas (SADER, 2020). En 2020, la SADER informó que la producción de chile verde creció un 2.7 % con un total de 3,324,260 toneladas, colocándose México como el segundo país productor a nivel mundial (SADER, 2021).

Actualmente, a nivel nacional la producción de chile verde es de 3,112,480.69 t y un rendimiento de 19.83 t ha⁻¹ (SIAP, 2022). En la producción de esta hortaliza en México, destacan los estados de Zacatecas, San Luis Potosí, Chihuahua, Baja California Sur y Sinaloa como altamente especializados. Los estados con ventajas competitivas incluyen Baja California Sur, Sonora, Sinaloa, Chihuahua, Coahuila, Michoacán, Estado de México, Querétaro, Chiapas, Campeche y Quintana Roo. Cabe mencionar que los estados con perspectivas en un futuro de ser especializados y competitivos son Sonora, Campeche y Quintana Roo (Patiño-Ordoñez *et al.*, 2021). Como se muestra en la tabla 1, los estados y la producción que tuvieron del cultivo de chile verde en México bajo ambas modalidades (riego + temporal), posicionándose Chihuahua (640,814.21 t), Sinaloa (598,399.29 t) y

Zacatecas (409,189.70 t) como los estados que obtuvieron mayor producción en 2022 (SIAP, 2022).

Tabla 1. Producción de chile verde en México en el 2022 (SIAP, 2022).

Entidad	Superficie (ha)			Producción	Rendimiento (t ha ⁻¹)
	Sembrada	Cosechada	Siniestrada		
Aguascalientes	816.5	816.5	0	14,759.71	18.08
Baja California	1,021.50	999.5	22	42,068.40	42.09
Baja California Sur	1,596.90	1,596.90	0	79,530.57	49.8
Campeche	1,547.50	1,547.50	0	14,316.37	9.25
Coahuila	457.5	457.5	0	25,525.24	55.79
Colima	451.5	451.5	0	16,434.03	36.4
Chiapas	2,955.64	2,955.64	0	18,865.22	6.38
Chihuahua	30,235.00	30,160.00	75	640,814.21	21.25
Ciudad de México	4	4	0	24	6
Durango	3,474.85	3,434.10	40.75	42,850.21	12.48
Guanajuato	4,941.86	4,941.86	0	142,213.39	28.78
Guerrero	1,429.56	1,429.56	0	9,765.19	6.83
Hidalgo	1,608.52	1,608.52	0	17,410.36	10.82
Jalisco	5,831.51	5,831.51	0	201,258.91	34.51
México	198.13	198.13	0	5,832.46	29.44
Michoacán	4,502.23	4,502.23	0	142,936.35	31.75
Morelos	117	117	0	1,306.55	11.17
Nayarit	607.1	604.6	2.5	9,595.84	15.87
Nuevo León	260	218	42	4,197.00	19.25
Oaxaca	2,398.40	2,398.40	0	9,651.03	4.02
Puebla	3,119.98	3,119.98	0	22,761.59	7.3
Querétaro	516.91	516.91	0	30,402.82	58.82
Quintana Roo	395.85	392.85	3	4,601.87	11.71
San Luis Potosí	24,835.00	24,835.00	0	333,737.82	13.44
Sinaloa	15,172.39	14,219.39	953	598,399.29	42.08
Sonora	4,506.33	4,498.33	8	187,413.20	41.66
Tabasco	1,005.00	1,005.00	0	5,724.59	5.7
Tamaulipas	930.7	915.7	15	30,041.78	32.81
Tlaxcala	11	11	0	100.1	9.1
Veracruz	5,966.56	5,966.56	0	44,542.98	7.47
Yucatán	553.05	553.05	0	6,209.91	11.23
Zacatecas	36,769.57	36,625.07	144.5	409,189.70	11.17
Total	158,237.54	156,931.79	1,305.75	3,112,480.69	19.83

2.3 Importancia del cultivo de chile

El chile es uno de los cultivos originarios de México y de los más importantes a nivel mundial. Tienen la capacidad de producir pigmentos y otros compuestos con potencial en la industria agroalimentaria (Baenas *et al.*, 2019). La domesticación de dichos cultivos (*Capsicum annuum* L.) tuvo origen en el centro-este de México (Kraft *et al.*, 2014). Así mismo, es concebido y empleado como alimento-medicina en diferentes culturas (Aguilar-Meléndez *et al.*, 2021). La gran diversidad de chiles es debido a las cruces y selección de frutos mejorados, realizada por agricultores mexicanos que les toman una serie de ciclos de siembra para lograr dichas características deseables para el comercio como: color, olor, sabor, textura, brillo, tamaño, propiedades nutritivas y pungencia, por lo que en el país existen aproximadamente 200 variedades criollas y 64 domésticas (SEMARNAT, 2018). El estado de Veracruz ocupa el primer lugar a nivel nacional con una producción en campo abierto bajo condiciones de temporal de 13,024 t con un rendimiento de 9.45 t ha⁻¹, seguido de Oaxaca con 2,305 t producidas y un rendimiento de 6.44 t ha⁻¹ (SIAP, 2022). En la tabla 2, se muestran los principales chiles cultivados en México (Hernández y Ocotero, 2016).

Tabla 2. Principales chiles cultivados en México, variedades de *Capsicum* y la principal zona productora (Hernández y Ocotero, 2016).

Nombre	Principal zona productora
Chile soledad	Oaxaca y Veracruz.
Jalapeño	Chihuahua, Veracruz y Oaxaca.
Serrano	San Luis Potosí, Nayarit, Hidalgo, Tamaulipas, Veracruz, Puebla, Nuevo León, Coahuila, Jalisco y Sinaloa.
Poblano	Guanajuato, San Luis Potosí, Durango, Aguascalientes, Zacatecas, Sinaloa, Nayarit, Jalisco y Puebla.
Chile de árbol	Jalisco, Nayarit, Aguascalientes, Zacatecas, Chihuahua y Guanajuato.
Chilaca	Aguascalientes, Jalisco, Guanajuato, Querétaro, Zacatecas, San Luis Potosí, Michoacán, Nayarit y Oaxaca.
Habanero	Yucatán, Baja California Sur, San Luis Potosí, Chiapas, Sonora, Tabasco y Veracruz.
Güero	Veracruz, Campeche, Tabasco, Yucatán, Quintana Roo, Puebla, Coahuila y Durango.
Pimiento morrón	Sinaloa y Sonora.
Piquín	Sonora.

2.3.1 Características físicas

La especie *Capsicum annum* es la más importante, pues agrupa la mayor diversidad de chiles, cultivados o silvestres. Consta de frutos de distintos colores desde blanco-amarillo y verde claro-amarillento, o verde (oscuro-amarillento, verde-azulado y verde-marrón) en estado inmaduro, a tonos rojo o café en etapas de maduración. Tiene la característica principal de forma (plana, circular, acorazonados, cuadrados, rectangulares, trapezoidales y triangulares), es una baya hueca carnosa o semicartilaginosa. Logra alcanzar distintos tamaños, entre 1 cm hasta 30 cm de largo y su forma va de lo redondo a lo alargado, su interior contiene semillas las cuales son de textura lisa (Aguirre y Muñoz, 2015; INTAGRI 2020).

2.4 Capsaicinoides

Una de las principales características del género *Capsicum* es el picor que se da debido a compuestos capsaicinoides que son sintetizados en el tejido placentario. Son amidas formadas por la unión de la vainillilamina con un ácido graso. Se conocen aproximadamente 20 de estos compuestos. La capsaicina [(E)-N-(4-hidroxi-3-metoxibencil)-8-metil-6-nonenamida] (Figura 1) y su análogo 6,7-dihidro, la dihidrocapsaicina, en conjunto llegan a representar más del 90 % del total de los capsaicinoides presentes en los frutos (Cázares-Sánchez *et al.*, 2005; Vázquez-Flota *et al.*, 2007).

Morales *et al.*, (2020) obtuvieron niveles de capsaicina, dihidrocapsaicina y capsaicinoides totales en estado de madurez comercial de los frutos con valores de 2.65, 0.49 y 2.99 mg g⁻¹, respectivamente. Específicamente, el chile Mirasol mostró mayor estabilidad en el contenido de capsaicina, dihidrocapsaicina y capsaicinoides totales al cambiar del estado de madurez fisiológica a comercial.

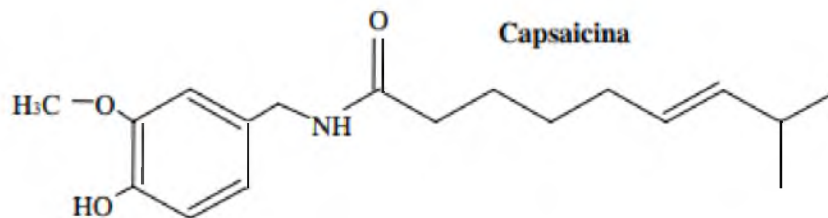


Figura 1. Estructura molecular de capsaicina (Vázquez-Flota *et al.*, 2007).

2.4 Producción de chile soledad

El cultivo de chile soledad se siembra en la región del Papaloapan. En el año 2021, en el estado de Oaxaca se sembró una superficie de 481.70 ha, con una producción de 2,944.18 t y rendimiento de 6.11 ton ha⁻¹. En Veracruz se reporta una superficie sembrada de 1,371.01 ha con una producción de 12,999.60 t y un rendimiento de 9.48 t ha⁻¹ (SIAP, 2022). En Oaxaca, el cultivo se produce en condiciones de temporal durante los meses de agosto a marzo. Los municipios que son mayores productores de chile soledad en el estado de Oaxaca se encuentra en primer lugar

San Juan Bautista Tuxtepec Oaxaca con una superficie sembrada de 121.40 ha y una producción de 876.98 t con un rendimiento de 7.22 t ha⁻¹. Loma Bonita se coloca en segundo lugar con una superficie sembrada de 66.15 ha, una producción de 508.14 t, y un rendimiento de 7.68 t ha⁻¹. En tercer lugar, se encuentra San Lucas Ojtlán con una superficie sembrada de 58.90 ha, producción de 277.96 ton y un rendimiento de 4.72 t ha⁻¹ (SIAP, 2022).

2.5.1 Descripción botánica de *Capsicum annuum*

2.5.1.1 Hoja

Las hojas son de tamaños variados de forma lanceolada, oval o deltoide de aproximadamente 2.5 a 9 cm de largo y 4 cm de ancho, son de color verde oscuro en la parte superior y más claro en la parte inferior de la hoja (Govindarajan y Salzer, 1985; Pérez-Castañeda *et al.*, 2008).

2.5.1.2 Tallo

Pueden ser de forma cilíndrica, angular o achatada de color verde y antocianinas en los nudos de color morado, de aproximadamente 0.71 a 1.9 cm de diámetro con escasa pubescencia (Aguilar-Rincón *et al.*, 2010; Pérez-Castañeda *et al.*, 2008).

2.5.1.3 Flor

Generalmente sus flores son de color blanco cremoso, pueden contener muchas flores por racimo, con una flor por axila. La corola es de color blanco, con margen purpura y amarillo verdoso. Anteras verdes, moradas o azules y filamento color verde, blanco o amarillo. Algunas flores presentan el margen del cáliz dentado o intermedio (Aguilar-Rincón *et al.*, 2010; Chiquini-Medina *et al.*, 2019; Pérez-Castañeda *et al.*, 2008).

2.5.1.4 Fruto

Consta de frutos de color verde-azulado y verde-marrón en estado inmaduro, a tonos rojo o café en etapas de maduración. El fruto es una baya de forma elongada, posición pendiente, textura lisa en la superficie, ápice agudo, color verde intenso

antes de la madurez y de color rojo brillante en su madurez. Los frutos exhiben dos lóculos con una depresión interlocular poco profunda, placenta compacta y con alto nivel de picor. El pericarpio mide de 1.0 a 2.0 mm de espesor, tiene un pedúnculo delgado (4 a 6 mm), glabro y de aproximadamente 3 cm de largo (Aguilar-Rincón *et al.*, 2010).

2.5.2 Condiciones climáticas del cultivo

La especie *Capsicum annuum* requiere condiciones de clima cálido para su desarrollo ya que son sensibles a bajas temperaturas. Para poder germinar a partir de los 9 a 12 días los chiles serranos requieren entre 20 y 30°C, la etapa de fructificación necesita de 16 a 32°C. A diferencia de los chiles anchos son de clima templado, la germinación se favorece a temperaturas de 8 a 10°C, en etapa de desarrollo de 12 a 32°C. Por lo que hay cultivos que se desarrollan desde los 1,500 hasta los 2,500 m de altitud (SIAP, 2016). Cabe mencionar que la temperatura va a tener un efecto importante sobre las etapas fenológicas del cultivo de chile, así como por la variedad (Thuy y Kenji, 2015).

2.5.3 Condiciones de suelo

El chile tiene la capacidad de adaptarse a distintos tipos de suelo: franco arenosos, franco limosos o franco arcillosos, con alto contenido de materia orgánica, sin embargo, su crecimiento se favorece a profundidades de 30 a 60 centímetros. Se aconsejan valores de pH superiores a 5.5 (SIAP, 2019).

2.5.4 Plagas y enfermedades

La especie *Capsicum* es susceptible a plagas y enfermedades que generan pérdidas económicas a los cultivos que incluyen al picudo del chile (*Anthonomus eugenii*) (Chaires-Grijalva *et al.*, 2021), mosquita blanca (*Bemisia tabaci*) que causa daño directo sobre las plantas de chile ya que son las ninfas y adultos los que consumen la savia, sin embargo, el efecto más perjudicial es mediante la transmisión de enfermedades de tipo viral (geminivirus), minador de la hoja (*Liriomyza spp.*) que forma minas y galerías al desarrollarse y desplazarse dentro de las hojas, también los adultos ocasionan daño al ovipositar y alimentarse de las

plantas ya que estos ocasionan que ingresen otros microorganismos dañinos (Alfonso-García *et al.*, 2019; Valenzuela-Escoboza *et al.*, 2010), pulgón verde (*Myzus persicae*), las ninfas y larvas ocasionan daño en el envés de las hojas y el ácaro blanco (*Polyphagotarsonemus latus*) también conocido como ácaro tropical genera grandes daños al cultivo (Garza, 2002).

Los hongos también causan enfermedades en plantas como son: *Fusarium* a través de síntomas como marchitez, defoliación, clorosis y necrosis (Reyes-Tena *et al.*, 2019), *Phytophthora* que causa pudrición de raíz y marchitez (Silva-Rojas *et al.*, 2009) y *Rhizoctonia* (Montero-Tavera *et al.*, 2013) son los más comunes en especies de *Capsicum*.

2.6 Nutrición de cultivos

2.6.1 Macronutrientes y micronutrientes

Las plantas están constituidas por macronutrientes y micronutrientes. Dentro de los macronutrientes se encuentran: Carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre. Estos se requieren en cantidades más altas en comparación con los micronutrientes que incluyen: hierro, manganeso, cobre, zinc, molibdeno, boro, cloro y níquel. En forma de iones en la solución del suelo se encuentran: potasio, sodio, magnesio, calcio, manganeso y cloro. Estos tienen la función de generar actividad enzimática, equilibrar cationes y permitir un control de la permeabilidad de membrana y potenciales eléctricos (Mengel y Kirkby, 1987; Kirkby, 2023).

2.6.1.1 Importancia del calcio en las plantas

Los altos niveles de calcio en las plantas son el resultado de un contenido elevado del mismo macronutriente en la solución del suelo. Generalmente las concentraciones de calcio en la solución del suelo son aproximadamente 10 veces más altas que la concentración de potasio (Mengel y Kirkby, 1987). El calcio es un nutriente de suma importancia ya que interviene en procesos que mantienen la integridad estructural y funcional de las membranas de las células vegetales, tiene la capacidad de estabilizar la estructura de la pared celular, regula el transporte

iónico y controla el compartimento del intercambio iónico y la actividad enzimática (Hadi y Karimi, 2013; Mengel y Kirkby 1987). Este elemento es requerido para realizar diversas funciones bioquímicas como dar estructura a la pared celular y las membranas, tiene propiedades contracatiónicas y también interviene en procesos de señalización de desarrollo (White y Broadley 2003).

2.6.1.1.1 Deficiencia de calcio en plantas

Uno de los síntomas iniciales por la deficiencia de calcio se puede apreciar en frutos, ésta es conocida como pudrición apical o *Blossom-end rot*. Es la aparición de una mancha en la superficie del fruto con apariencia de tejido húmedo que va cambiando el color, ocasionando que se detenga el crecimiento del fruto y la maduración se acelere (Silva *et al.*, 2017).

2.6.1.2 Importancia del magnesio en las plantas

Los suelos contienen elementos nutritivos que son necesarios para el correcto desarrollo y crecimiento de las plantas incluyendo el Mg, ya que su absorción va a depender mayormente de la misma actividad del Mg constituido en la solución del suelo y su respuesta. La disponibilidad de este elemento depende de la cantidad de Mg relativa a las cantidades solubles e intercambiables de K, Ca, Na, Al y Mn (Mayland y Wilkinson 1989). Existe un efecto antagónico del potasio sobre el magnesio más fuerte que el contrario de magnesio sobre el potasio en la absorción por raíces y el transporte dentro de las plantas, lo que establece que el uso equilibrado de fertilizantes con K y Mg es necesario para mantener una disponibilidad eficiente de magnesio y reducir la deficiencia de magnesio inducida por potasio en las plantas (Ding *et al.*, 2006). Así como para Ca también existe antagonismo por parte de K (Jakobsen, 1993; Novoa *et al.*, 2018; Xie *et al.*, 2021). La fertilización no va a modificar únicamente la disponibilidad de los nutrientes suministrados. Con respecto a la nutrición de magnesio, potasio y calcio modulan la disponibilidad de magnesio en plantas debido a dos razones. La primera es el aumento de la concentración de magnesio en la solución del suelo pudiendo generar pérdidas por lixiviación. La segunda razón es cambios en la composición cualitativa y cuantitativa de cationes que darán como resultado una competencia catiónica en

la raíz de la planta por absorción (Gransee y Führs, 2013). El rendimiento óptimo de la fertilización con magnesio puede ocurrir con suministro bajo de nitrógeno y alto de magnesio (absorción de nitrógeno inducida por magnesio). Estableciéndose un efecto positivo del magnesio en la eficiencia de absorción de nitrógeno (Grzebisz, 2013).

2.6.1.2.1 Deficiencia de magnesio en plantas

El magnesio se asocia con la producción de clorofila, por lo que la deficiencia de este macronutriente se ve reflejada en los tejidos de las hojas en forma de clorosis. La clorosis intervenal en las hojas más viejas es un cambio de color amarillento, es uno de los síntomas más comunes de estrés por deficiencia de magnesio. El 35 % del magnesio total en las plantas está ligado a los cloroplastos, sin embargo, también la deficiencia de este elemento puede estar relacionada con la intensidad de la luz (Cakmak y Yazici, 2010). En cambio, cuando se aplica exceso de magnesio puede provocar antagonismo con cationes como calcio, potasio y sodio (Azcón-Bieto y Talón, 2013).

2.7 Fotosíntesis

2.7.1 Pigmentos fotosintéticos: Clorofila a y b

Los cloroplastos están conformados por pigmentos fotosintéticos, principalmente clorofilas que inducen procesos fotosintéticos. Las moléculas de clorofila y el mecanismo que atrapa la energía luminosa se encuentran en los tilacoides, principalmente en la grana. Por lo que existen enzimas que catalizan dichas reacciones del carbono de la fotosíntesis y están presentes principalmente en el estroma (Bidwell, 1979). El pigmento fotosintético más importante es la clorofila, ya que es la biomolécula cromófora que interviene principalmente en el proceso de absorción y transformación de la energía luminosa.

La clorofila se degrada en las plantas como consecuencia de la senescencia natural o inducida, cuando comienzan los procesos de maduración en frutos o por infección mediante patógenos (Barry, 2009).

Existen distintos tipos de clorofilas, siendo las más comunes A y B (Azcón-Bieto y Talón, 2013). Las clorofilas pueden perder fácilmente su energía de excitación, emitiendo luz fluorescente roja de longitud de onda normalmente superior a 660 nm aproximadamente.

3. ANTECEDENTES

Cabe mencionar que en cultivo de chile soledad (*Capsicum annuum* L) variedad CHISER-522 no existen estudios previos del requerimiento nutricional de macronutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio. Algunos estudios como los realizados por Salazar-Jara y Juárez-López (2013) establecen que el requerimiento macronutricional del cultivo de chile como base para el cálculo de dosis de fertilización es: Nitrógeno ($2.4-4.0 \text{ Kg t}^{-1}$), fósforo ($0.4-1.0 \text{ Kg t}^{-1}$), potasio ($3.4-5.9 \text{ Kg t}^{-1}$), calcio ($0.55-1.80 \text{ Kg t}^{-1}$) y magnesio ($0.28-0.49 \text{ Kg t}^{-1}$). También Valentín-Miguel *et al.*, (2013) determinaron el contenido y extracción nutrimental de N, P, K, Ca y Mg, en chile de agua (*Capsicum annuum* L.) y obtuvieron los mayores contenidos de P, K y Mg en etapa de floración y fructificación, identificaron que al final del ciclo la extracción nutrimental (g planta^{-1}) fue de 6.93, 1.12, 16.62, 3.54 y 1.27 de N, P, K, Ca y Mg respectivamente. Investigaciones realizadas por Azofeifa y Moreira (2005) indicaron que extrajeron (Kg ha^{-1}) K: 180, N: 139, P: 26, Ca: 38, S y Mg: 13. Así mismo mencionan que las cantidades de nutrimentos en las distintas partes de la planta variaron durante el ciclo de crecimiento. Obteniendo que al final del ciclo, la planta acumula el N, P, Mg, K, y S, en mayor cantidad en los frutos y el Ca especialmente en la parte aérea.

4. HIPÓTESIS

La aplicación de un nivel óptimo de fertilización con calcio y magnesio aumentará el crecimiento, rendimiento, contenido de macronutrientes y pigmentos fotosintéticos del cultivo de chile soledad bajo condiciones de temporal en Loma Bonita, Oaxaca.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Determinar el mejor nivel de fertilización con calcio y magnesio en el contenido de nutrientes, pigmentos fotosintéticos, capsaicina y rendimiento de chile soledad (*Capsicum annuum* L.) bajo condiciones de temporal en Loma Bonita, Oaxaca.

5.2 Objetivos específicos

- Evaluar cinco niveles de fertilización con calcio y magnesio en el crecimiento, biomasa, rendimiento y calidad de fruto de chile soledad.
- Determinar la concentración de macronutrientes (N, P, K, Ca y Mg) en la solución del suelo y la planta de chile soledad fertilizada con cinco niveles de calcio y magnesio.
- Medir el contenido de pigmentos fotosintéticos (clorofila A y clorofila B) en hojas de chile soledad fertilizadas con cinco niveles de calcio y magnesio.
- Determinar la concentración crítica de calcio y magnesio en relación con el rendimiento de chile soledad.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Localización y características del área de cultivo

6.1.1 Ubicación

La investigación se realizó en condiciones de campo abierto en el Municipio de Loma Bonita Oaxaca su ubicación se encuentra a 95°53' longitud oeste y 18°06' latitud norte, a una altura de 30 msnm región que se limita al norte con Veracruz (INAFED, 2010). Se llevó a cabo en el campo experimental agrícola y el análisis de las muestras en el laboratorio químico biológico de la Universidad del Papaloapan, Campus Loma Bonita.

6.1.2 Condiciones climáticas

En la región predomina el clima cálido húmedo y cálido subhúmedo con lluvias en verano (18.68%). Caracterizados por la presencia de altas tasas de precipitación de 1,500 a 2,500 mm y elevadas temperaturas que superan los 28 °C (DIGEPO, 2015). Los datos climatológicos durante los experimentos fueron registrados en la estación meteorológica (EMA) de la Universidad del Papaloapan, la temperatura máxima fue de 36.2 °C y la mínima de 14.8 °C, la precipitación máxima se obtuvo en el mes de septiembre con 216.77 mm y la mínima de 0.5 mm en el mes de diciembre (Figura 2).

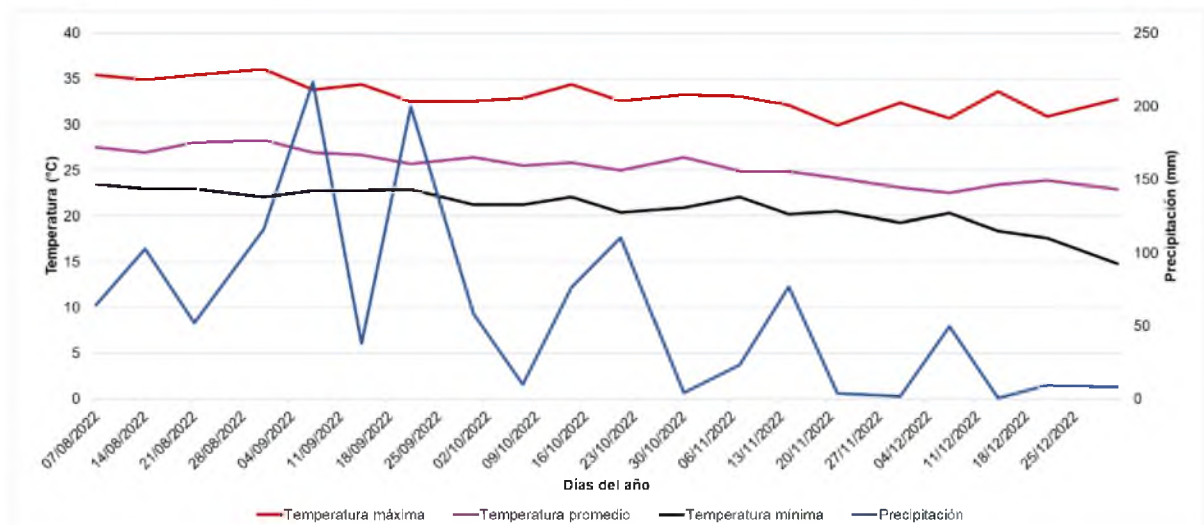


Figura 2. Condiciones climáticas durante el ciclo de cultivo de los experimentos de calcio y magnesio.

6.1.3 Descripción del suelo

El terreno donde se establecieron las unidades experimentales presenta un suelo tipo cambisol (jóvenes con poco desarrollo-agrícolas con métodos de riego) o suelo franco (INEGI, 2022). Previo al trasplante en campo abierto se realizaron tomas de submuestra de suelo para conformar una sola muestra compuesta de 1.5 Kg y se envió al laboratorio (Fertilab) para el análisis de fertilidad donde se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la tabla 3.

Tabla 3. Valores obtenidos del análisis de suelo y recomendación de fertilización sugerida por el laboratorio Fertilab.

Variable	Valores obtenidos	Nivel
pH Buffer	6.08	
Densidad aparente	1.26 g cm ³	
Clase Textural	Franco	
Materia orgánica	2.87	Mod. Alto
Nitrógeno (N-NO ₃)	19.2 ppm	Mediano
Fósforo (P)	58.3 ppm	Alto
Potasio (K)	69.9 ppm	Muy bajo
Calcio (Ca)	338 ppm	Muy bajo
Magnesio (Mg)	454 ppm	Mod. Alto
Azufre (S)	2.82 ppm	Muy bajo
Sodio (Na)	33 ppm	Mod. Alto
Hierro (Fe)	112 ppm	Muy alto
Zinc (Zn)	2.05 ppm	Mediano
Manganeso (Mn)	6.69 ppm	Mod. bajo
Cobre (Cu)	0.66 ppm	Mod. bajo
Boro (B)	0.32 ppm	Muy bajo
Aluminio (Al)	43.8 ppm	Mod. bajo

6.2 Material vegetal y siembra

El material vegetal utilizado fue la variedad CHISER-522 de chile soledad (*Capsicum annuum* L.) donada por el campo experimental Las Huastecas del INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agrícolas y Pecuarias, México).

La siembra se realizó el 17 de junio de 2022 en charolas de poliestireno con 200 cavidades con sustrato peat moss. Se sembró una semilla por cavidad a una profundidad de 0.5 cm. Posteriormente a la emergencia, las plántulas fueron regadas con solución nutritiva Steiner al 25 % en la mañana aproximadamente a las 9 am y en la tarde a las 6 pm (Steiner, 1961).

6.3 Diseño experimental, preparación de suelo y descripción de los tratamientos

La presente investigación se estableció en experimentos separados para cada nutriente (calcio y magnesio). El experimento de calcio recibió en cada tratamiento: T1: 0.26 g de Ca por planta (7.8 kg ha⁻¹ de Ca), T2: 0.52 g de Ca por planta (15.6 kg ha⁻¹ de Ca), T3: 0.78 g de Ca por planta (23.4 kg ha⁻¹ de Ca) y T4: 1.04 g de Ca por planta (31.2 kg ha⁻¹ de Ca). Para el experimento de magnesio se aplicó: T1: 0.16 g de Mg por planta (4.8 kg ha⁻¹ de Mg), T2: 0.32 g de Mg por planta (9.6 kg ha⁻¹ de Mg), T3: 0.48 g de Mg por planta (14.4 kg ha⁻¹ de Mg) y T4: 0.64 g de Mg por planta (19.2 kg ha⁻¹ de Mg). Estos niveles de fertilización son suficientes para las plantas de *Capsicum annuum* (Salazar-Jara y Juárez-López 2013). Los niveles de fertilización se estudiaron empleando un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones. El suelo fue previamente preparado con labores de labranza primaria que consistió en la limpia de terreno con chapeadora, barbecho con arado y paso de rastra. El área de la parcela individual (unidad experimental) fue de 5.5 m² con una longitud de 5 m y ancho de 1.1 m. Tanto para el experimento de magnesio como de calcio se aplicó 2.56, 0.92 y 3.5 g de NPK por planta (76:28:105 kg ha⁻¹ de NPK), además en el experimento de magnesio se aplicó 0.52 g de Ca por planta y en el

experimento de calcio 0.48 g de Mg por planta a todos los tratamientos evaluados excepto el testigo.

El nitrógeno (N) y el fósforo (P) se aplicaron en forma de urea y fosfato diamónico (DAP). El potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) se aplicaron en forma de sulfato de potasio, nitrato de calcio y sulfato de magnesio, respectivamente.

El trasplante de las plántulas de chile soledad a campo abierto se realizó a los 43 días después de la siembra (DDS) a una distancia de 30 cm entre plantas, en hilera simple. El experimento comenzó en la primera semana de agosto de 2022 bajo condiciones de temporal. Se realizaron cuatro aplicaciones de fertilizantes a una profundidad de 7-10 cm a una distancia de 20 cm de la base del tallo. A los 15 días después del trasplante (DDT) se aplicó una dosis de fertilización de 2 g de DAP, 1 g de urea y 3 g de sulfato de potasio por planta en ambos experimentos. La siguiente aplicación fue a los 30 DDT, para el experimento con magnesio se aplicaron cada uno de los tratamientos y en el experimento de calcio se aplicó 1 g urea y 3 g de sulfato de magnesio. Posteriormente, a los 45 DDT, se aplicó 2 g de urea y 2 g de sulfato de potasio en el experimento de magnesio, mientras que en el experimento de calcio se aplicaron cada uno de los tratamientos. A los 60 DDT, en el experimento de magnesio se aplicó 2 g de nitrato de calcio excepto al testigo y en el experimento de calcio se aplicó 2 g de sulfato de potasio. Por último, a los 80 DDT, en el experimento de magnesio se aplicó 1 g de urea y 2 g de sulfato de potasio, mientras que a los 85 DDT en el experimento de calcio se aplicó 2, 1.5, 1 y 2 g de urea en los tratamientos dos, tres, cuatro, respectivamente. Además de 2 g de sulfato de potasio a todos los tratamientos excepto al testigo.

6.4 Manejo agronómico del experimento

Durante el ciclo de cultivo de chile de soledad se presentaron plagas como mosquita blanca, pulgones, larvas de lepidópteros, ácaros y enfermedades como hongos en la base de los tallos y hojas, por lo que se realizaron aplicaciones de insecticidas y fungicidas para contrarrestarlas, tal y como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Productos aplicados para el control de plagas y enfermedades en el ciclo del cultivo de chile soledad variedad CHISER-522 a campo abierto.

Nombre comercial	Ingrediente activo	Dosis
Muralla	Imidacloprid + Betacyfluthrin	1 mL L ⁻¹
Evisect-s	Tiocyclam-hidrogenoxalat N,N-dimetil-1,2,3-tritiano-5-aminohidrogenoxalato	0.5 g L ⁻¹
Cipermetrina	Cipermetrina	1 mL L ⁻¹
Abamectina	Abamectina (Avermectina)	0.5 mL L ⁻¹ a 1.5 mL L ⁻¹
	<i>Bacillus thuringiensis</i> var. <i>Kurstaki</i>	1 g L ⁻¹
	<i>Paecilomyces lilacinus</i> (1.0X10 ¹⁵)	5 mL L ⁻¹
Captan	N-(triclorometiltio)ciclohex-4-en1,2-dicarboximida	1 g L ⁻¹
Ridomil	Metalaxil + clorotalonil	1 mL L ⁻¹
TrichoPower Max	<i>Trichoderma harzianun</i> (1.0X10 ¹⁵)	5 m L ⁻¹
Prontius	Tiofanato metílico	0.5 g L ⁻¹
Cupravit	Oxicloruro de cobre	0.5 g L ⁻¹

A los 7 DDT se realizó el repique de aproximadamente 30 plantas ya que estaban muy etioladas y era difícil que se mantuvieran de pie. Cada 15 días se realizaban labores culturales como limpieza de arvenses con azadón y aporque en el cultivo para mantener la humedad del suelo y evitar el ataque de plagas y enfermedades. A los 85 DDT se eliminaron 4 plantas del experimento de calcio (2 del tratamiento 3 y 2 del testigo) que presentaban síntomas de virosis.

6.5 Variables de respuesta

Después de la aplicación de los tratamientos en ambos experimentos (magnesio y calcio) se midieron las variables de crecimiento, pigmentos fotosintéticos, savia y suelo. Las mediciones se realizaron a los 40 (excepto calcio), 55, 70, 85 y 100 días después del trasplante (DDT) en cada uno de los experimentos.

6.5.1 Crecimiento

6.5.1.1 Diámetro del tallo y altura de la planta

El diámetro del tallo se midió utilizando un vernier calibrador digital (Truper®) que consistió en colocar el vernier a 5 cm de altura del tallo de la planta (Tucuch-Haas *et al.*, 2012). Para medir la altura se empleó una cinta métrica a partir del nivel del suelo hasta el meristemo apical del tallo primario de la planta.

6.5.1.2 Número de frutos

Se realizó el conteo de frutos totales por planta de cada tratamiento (20 plantas en total).

6.5.1.3 Área foliar

El área foliar se determinó a partir del método descrito por Swart *et al.* (2004). La medición se realizó en hojas verdaderas completamente extendidas. Se determinó la longitud en cm (L), ancho en cm (W) y área en cm² (A) en hojas individuales. Con tres repeticiones por tratamiento en cada medida.

Se determinó empleando el modelo de regresión descrito por Swart *et al.* (2004) para lograr un ajuste adecuado como se muestra en la ecuación 1.

$$\text{ÁREA} = 0.61906 * LW + 0.2060 * W^2 + 0.5142 * W \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

L: Distancia desde la punta de la hoja hasta el punto de ramificación de la nervadura principal y la primera nervadura lateral.

W: Región más ancha a través de la lámina perpendicular a la longitud.

6.5.2 Savia

6.5.2.1 Grados brix y contenido de nutrientes en extracto celular de peciolo

Se seleccionaron dos hojas jóvenes completamente expandidas por planta de cada tratamiento (20 hojas por tratamiento), las muestras se colectaron a las 9 a.m. en bolsas de plástico y se almacenaron en hielera a 5 °C para su posterior procesamiento. Se extrajo la savia con una prensa, obteniendo aproximadamente 2 mL. Posteriormente, se hizo una dilución con agua desionizada (1:99) para ser analizada en los sensores para nitrato marca HORIBA (LAQUAtwin NO311), fosfato HANNA Checker® (HI706), potasio HORIBA (LAQUAtwin K11) y la determinación de grados brix en un refractómetro digital HANNA® (HI96801) (Álvarez-Herrera y Jaime-Guerrero, 2022). Para la determinación de magnesio se agregó 1 mL de H193752A-Mg (reactivo A) a la cubeta y se aforó hasta 10 mL con H193752B-Mg (reactivo B), se mezcló y posteriormente se introdujo en espectro como blanco, se retiró la cubeta y finalmente se agregó 0.5 mL de la muestra para su lectura en fotómetro multiparamétrico marca HANNA® (HI83399) (Roacho-Cortés *et al.*, 2021; Rodríguez *et al.*, 2021).

6.5.2.2 Contenido de calcio

El contenido de calcio se determinó a partir de ceniza seca, de acuerdo con los métodos descritos por Miller *et al.* (2013). Primero, la muestra de aproximadamente 70 gramos de hojas fresca fue previamente lavada con agua desionizada y secada en un horno (marca TERLAB^{MR}, modelo TE-H45D) a 80°C durante 24 horas, posteriormente la muestra fue molida en un mortero de porcelana y se colocaron 5 gramos de muestra seca en crisol de porcelana, todos los tratamientos se realizaron por triplicado.

Se colocaron los crisoles en una mufla marca Vulcan® (A-1750) durante 4 horas a 500°C. Se dejó enfriar la mufla durante 14 horas a temperatura ambiente, después se retiraron los crisoles para agregar 10 mL de una solución de ácido clorhídrico 1 N. Las muestras disueltas fueron transferidas a un matraz aforado de 50 mL y se

aforó con agua desionizada, se agitaron tres veces para homogeneizar la muestra y se colocaron en frascos de plástico de 100 mL para su posterior análisis. Finalmente, el análisis elemental de las digestiones se realizó utilizando un fotómetro multiparamétrico marca HANNA® (HI83399-01) (Miller *et al.*, 2013).

6.5.3 Solución del suelo

6.5.3.1 Extracción de pasta saturada del suelo

La obtención de las muestras del suelo se colectó a una profundidad de 15 cm empleando una barrena (para cada parcela), se dejó secar por 24 horas a 30°C, posteriormente se utilizó una malla de 0.5 mm para su tamizado. Se pesaron 200 g de muestra y se colocaron en vasos de plástico de 500 mL para obtener una pasta homogénea con agua desionizada (Miller *et al.*, 2013).

Se dejó reposar por 4 horas, después con un lisímetro (30 cm) se extrajo la solución del suelo durante 40 min. Para finalmente analizar las muestras, se almacenaron en recipientes de plástico etiquetados. La medición de CE, pH y macronutrientes de la solución del suelo (N, P, K, Ca y Mg) se realizó con equipos HORIBA (LAQUAtwin NO311) para nitratos, HANNA Checker® (HI706) fosfatos, HORIBA (LAQUAtwin K11) potasio y fotómetro multiparamétrico marca HANNA® (HI83399-01) para magnesio.

6.5.4 Pigmentos fotosintéticos

6.5.4.1 Clorofila a, b y a+b

Se colectaron muestras de hojas jóvenes completamente expandidas de chile soledad (2 hojas por planta) de cada tratamiento. Las muestras fueron almacenadas en una hielera para transportarse del campo hasta su procesamiento en el laboratorio. Se lavaron con agua desionizada y se cortaron trozos de aproximadamente de 2 cm², para la extracción de pigmentos fotosintéticos se pesaron 3 g de hojas, posteriormente se depositaron en un mortero con 6 mL de acetona al 80 % y se trituraron durante 3 minutos o hasta que la muestra quedará homogénea. Se tomaron 4 mL del sobrenadante de la muestra pigmentada, se colocaron en tubos cónicos de 15 mL y se centrifugaron a 4,500 rpm durante 20

minutos. Se tuvo el cuidado de que a los tubos con los extractos no estuvieran en contacto con la luz. Finalmente, en otro tubo cónico de 15 mL se transfirió 1 mL del sobrenadante de cada extracto y se aforó hasta 10 mL con acetona al 80 %. Las mediciones se realizaron por triplicado utilizando un espectrofotómetro UV-Visible (VELAB™ modelo VE-5100UV), en el cual se depositó 1 mL de cada muestra en celdillas de cuarzo de 10 mm introduciendo al equipo y se leyeron a dos absorbancias (647 y 664 nm) establecidas.

El contenido de clorofila se determinó de acuerdo con las ecuaciones 2, 3 y 4 publicada por Porra (2002).

$$\text{Chl a} = 12.25 * \text{Abs664} - 2.55 * \text{Abs647} \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{Chl b} = 20.30 * \text{Abs647} - 4.91 * \text{Abs664} \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{Chl a+b} = 17.76 * \text{Abs647} + 7.34 * \text{Abs664} \dots\dots\dots (4)$$

6.5.5 Biomasa

Se realizaron dos muestreos durante todo el estudio en ambos experimentos (calcio y magnesio), a los 82 y 156 DDT colectando 20 plantas de cada tratamiento.

6.5.5.1 Peso fresco y seco de la planta

La planta fue lavada con agua destilada, posteriormente se separaron en partes; a) frutos, b) raíz y d) tallo y hojas. Se determinó el peso seco, de cada material clasificado en las diferentes partes de la planta, las cuales se colocaron en bolsas de papel y se introdujeron en un horno de secado (marca TERLAB^{MR}, modelo TE-H45D) a 70 °C por un tiempo de entre 24 y 48 horas hasta alcanzar su peso constante (Azofeifa y Moreira, 2008). El peso se determinó con una báscula electrónica (Rhino[®]).

6.5.6 Rendimiento

En la cosecha, se realizaron cinco cortes a los 62, 82, 104, 133 y 156 DDT. Se cortaron frutos que alcanzaron su tamaño comercial con coloración verde brillante y se pesaron con una báscula electrónica (Rhino®) para obtener el rendimiento total de fruto por planta desde el primero hasta el quinto corte (ecuación 5), para determinar el rendimiento de frutos por hectárea se calculó con la ecuación 6 (Cruz-Crespo *et al.*, 2014).

$$\text{Rendimiento por planta} = \frac{\text{Peso de frutos de la parcela individual (g)}}{\text{Número de plantas en la parcela individual}} \dots\dots\dots(5)$$

$$\text{Rendimiento (t ha}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Peso de frutos de la parcela individual (t)}}{\text{Área de la parcela individual (m}^2\text{)}} * 10000 \text{ (m}^2\text{)} \dots\dots\dots(6)$$

6.5.7 Calidad de frutos

Se seleccionaron 10 frutos de tamaño chico, mediano y grande, recolectados a los 82 DDT (segundo corte) de cinco tratamientos en cuatro bloques de cada experimento, con base en la Norma Mexicana de productos alimenticios no industrializados para consumo humano—chile fresco (*Capsicum spp.*) NMX-FF-025-SCFI-2015 (NOM, 2015).

6.5.7.1 Grados brix, pH y acidez titulable total

Los grados brix, pH y la acidez titulable total (TTA) se determinó a partir de la metodología reportada por Álvarez-Herrera y Jaime-Guerrero (2022), se tomaron 10 gramos de frutos de chile soledad y se homogeneizaron en una licuadora con 20 mL de agua desionizada durante 2 minutos, posteriormente se realizó la lectura para grados brix y pH en un refractómetro digital HANNA® (HI96801) y potenciómetro HORIBA (LAQUAtwin PH11), respectivamente. Para determinar la acidez titulable total la muestra fue colocada en un matraz de Erlenmeyer de 125 mL y se agregaron 3 gotas de fenolftaleína al 1 %. La muestra se tituló con NaOH 0.1 N estandarizado

hasta el punto final del color (incolore-rosa muy pálido) en parrilla de agitación. La solución de referencia de color se preparó mezclando 1 g de fenolftaleína y se aforó hasta 100 mL con etanol. El porcentaje del ácido cítrico presente en la muestra se calculó con la ecuación 7.

$$\text{TTA (\%)} = (A * B * C) * 100 / D \dots\dots\dots(7)$$

Donde, TTA es la acidez titulable total; A es el volumen de NaOH utilizado; B es la normalidad de NaOH (0.097 meq mL⁻¹); C es la masa equivalente expresada en g de ácido cítrico (0.064 g meq⁻¹); y D es la masa en gramos de la muestra utilizada (10 g).

6.5.7.2 Contenido de capsaicina

La extracción de Capsaicina se realizó de acuerdo con la metodología propuesta por Maurya *et al.* (2018). Los frutos frescos se cortaron en rodajas y se colocaron en una charola de acero inoxidable e inmediatamente se secaron a peso constante en un horno a 65 °C durante 24 horas. Posteriormente, la muestra seca se molió y se pesó 0.2 g en un vaso precipitado de 25 mL, se agregó en tubo de ensaye 10 mL de etanol y se colocó en baño maría a 80 °C durante 4 horas, agitándose cada 30 min. Enseguida se dejó enfriar y sedimentar, después el sobrenadante se separó con papel filtro Whatman (poro medio de 3 micras). La determinación de Capsaicina se realizó mediante el método espectrofotométrico (González-Zamora *et al.*, 2015), se tomó lectura de la absorbancia a 280 nm con un espectrómetro UV-Vis (VELAB™ modelo VE-5100UV). La curva de calibración se realizó con capsaicina pura (Sigma-Aldrich®) disuelta en etanol en un rango de concentración de 10 a 200 mg L⁻¹ como se muestra en la figura 3.

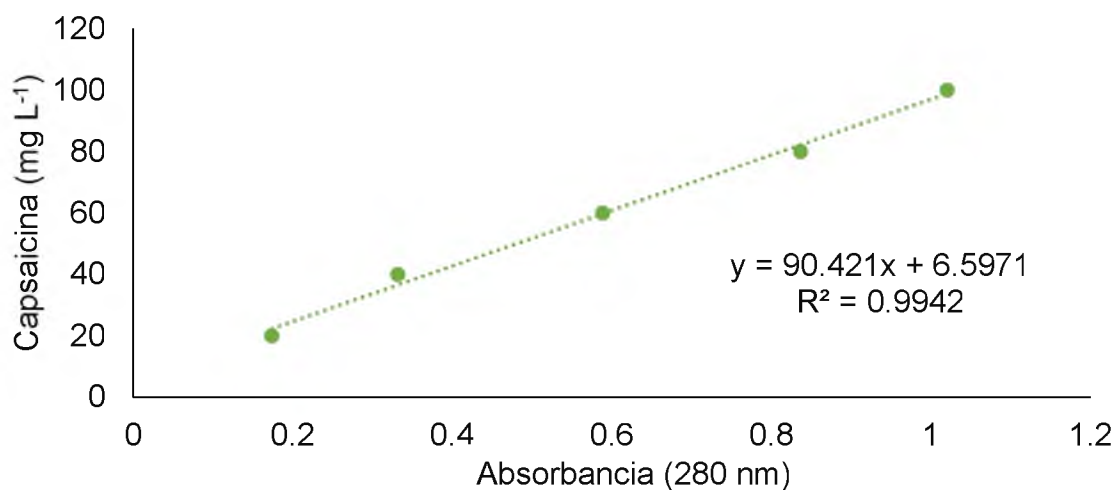


Figura 3. Curva de calibración de capsaicina (mg L⁻¹)

6.5.7.3 Longitud, diámetro, grosor de pericarpio y peso de frutos

Para medir la longitud (cm) se utilizó una cinta métrica, en el diámetro y grosor de pericarpio (mm) se empleó un vernier digital (Truper®) y para peso del fruto se utilizó una báscula granataria (Rhino®).

6.6 Análisis estadístico

Se realizó un ANOVA de una vía, donde las variables de crecimiento, biomasa, rendimiento y calidad de fruto fueron determinadas con 4 repeticiones; y para la savia, pigmentos fotosintéticos y solución del suelo fue con 3 repeticiones, seguido de una prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$) para ambos experimentos (magnesio y calcio) con el programa estadístico InfoStat versión 2020 (Di-Rienzo, *et al.*, 2020) En el lenguaje R-Studio se hizo un análisis de regresión cuadrática de meseta, utilizando el paquete Soiltestcorr (Correndo *et al.*, 2023). Esto con la finalidad de relacionar el rendimiento y las dosis de fertilización (calcio y magnesio) y determinar la concentración crítica.

7. RESULTADOS

7.1 Experimento de calcio

7.1.1 Crecimiento

Los resultados muestran diferencias significativas en el diámetro del tallo (Figura 4A) y la altura de planta (Figura 4B) a los 55, 70, 85 y 100 DDT, los tratamientos de calcio aplicados (T1, T2, T3 y T4) fueron superiores al testigo, con medias de 5 a 9 mm y 60 a 80 cm, respectivamente. Sin embargo, a los 55 DDT, el tratamiento 1 presentó mayor diámetro del tallo que el tratamiento 4.

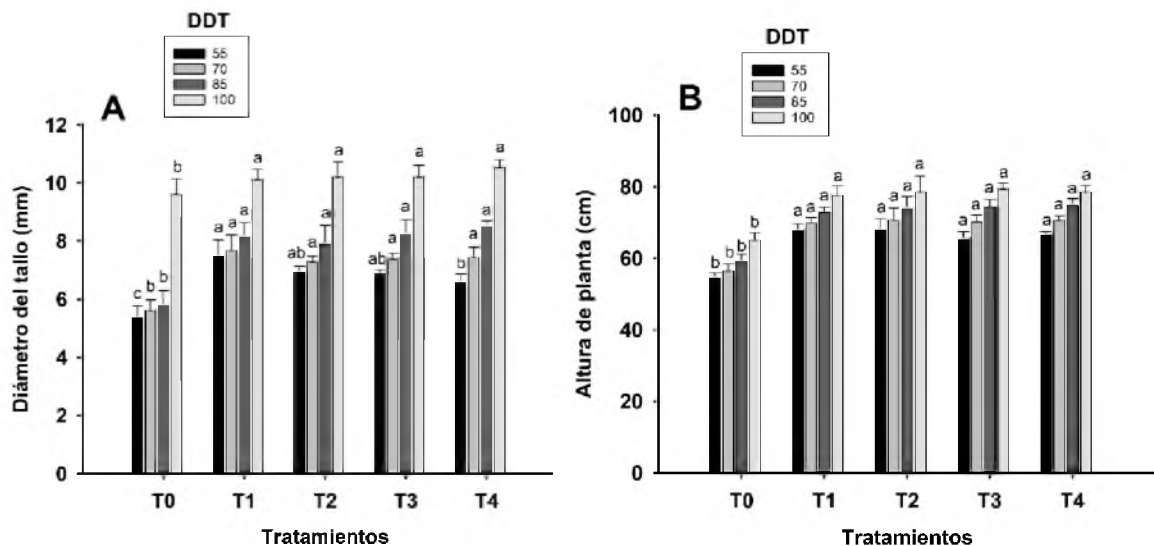


Figura 4. Efecto de los tratamientos de calcio sobre el diámetro del tallo (A) y altura de la planta (B). DDT= Días después del trasplante; T0= Testigo absoluto; T1= 7.8 kg ha⁻¹; T2= 15.6 kg ha⁻¹; T3= 23.4 kg ha⁻¹; T4= 31.2 2 kg ha⁻¹. Letras minúsculas diferente indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$).

En cuanto al número de frutos (Figura 5A), de los 55 hasta los 100 DDT, los tratamientos de calcio aplicados aumentaron el número de frutos en comparación con el testigo. Respecto al área foliar (Figura 5B), a los 70 DDT no existió diferencia significativa entre los tratamientos de calcio aplicados y testigo. Sin embargo, a los

55 DDT los tratamientos 2 y 3 fueron superiores al tratamiento 1. Finalmente, a los 85 y 100 DDT los tratamientos de calcio aplicados indicaron aumento significativo con respecto al testigo.

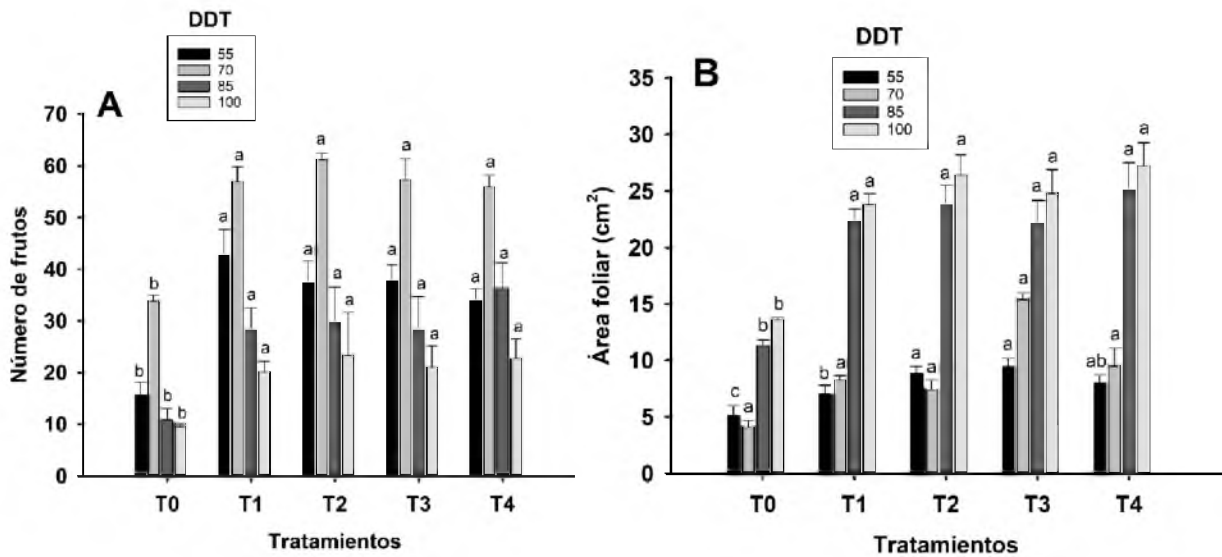


Figura 5. Efecto de los tratamientos de calcio sobre el número de frutos (A) y área foliar (B). DDT= Días después del trasplante; T0= Testigo absoluto; T1= 7.8 kg ha⁻¹; T2= 15.6 kg ha⁻¹; T3= 23.4 kg ha⁻¹; T4= 31.2 2 kg ha⁻¹. Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de medias Tukey (p ≤ 0.05).

7.1.2 Determinación de grados brix y nutrientes en savia

Otro parámetro evaluado fueron los grados brix (Figura 6), donde a los 55 DDT, los tratamientos 1, 3, 4 y testigo mostraron medias entre 5 y 5.8 con diferencias significativas únicamente con el tratamiento 2. Sin embargo, a los 70 DDT, el tratamiento 4 y testigo alcanzaron una media cercana a 7 con diferencias significativa entre los demás tratamientos. En cambio, a los 85 DDT, el testigo obtuvo una media de 6.5 indicando diferencias significativas con todos los tratamientos. Por último, a los 100 DDT, los tratamientos 1 y 4 alcanzaron una media aproximada de 7 mostrando diferencias significativas entre todos los tratamientos incluyendo al testigo.

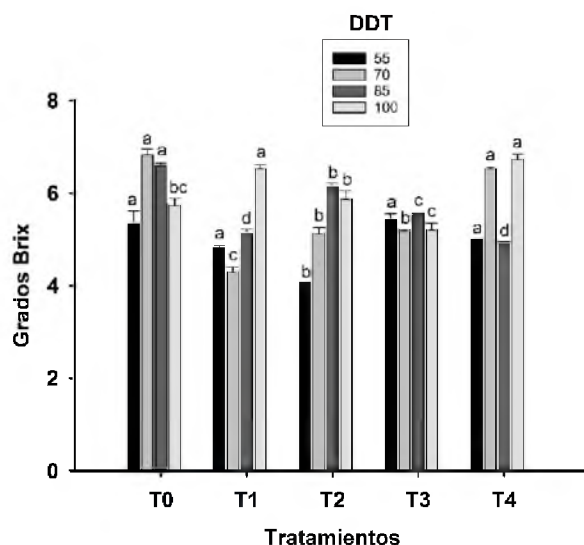


Figura 6. Efecto de los tratamientos de calcio sobre los grados brix de la savia del peciolo. DDT= Días después del trasplante; T0= Testigo absoluto; T1= 7.8 kg ha⁻¹; T2= 15.6 kg ha⁻¹; T3= 23.4 kg ha⁻¹; T4= 31.2 2 kg ha⁻¹. Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de medias Tukey (p ≤ 0.05).

En lo que respecta a los niveles de nitratos contenidos en la savia (Figura 7A), a los 55 y 85 DDT, el tratamiento 4 mostró diferencias significativas en comparación con los demás tratamientos con una media de 3000 y 700 mg L⁻¹, respectivamente. Sin embargo, a los 70 DDT el tratamiento 2 presentó una media de 1000 mg L⁻¹ con diferencia significativa entre todos los tratamientos. Finalmente, a los 100 DDT, el tratamiento 1 mostró una media cercana a 1000 mg L⁻¹ con diferencia significativa en comparación con todos los tratamientos.

En cuanto al fosfato (Figura 7B), el testigo mostró un aumento desde 500 hasta 3000 mg L⁻¹ de los 55 a los 85 DDT con diferencias significativas en comparación con los demás tratamientos. En contraste, a los 100 DDT el tratamiento 1 indicó una media cercana a 1000 mg L⁻¹ con diferencia significativa comparado con los demás tratamientos incluyendo al testigo.

En lo que respecta al contenido de potasio (Figura 7C), a los 55 y 85 DDT el testigo indicó una media cercana a 2000 y 4300 mg L⁻¹ respectivamente, mostrando diferencia significativa con todos los tratamientos. Ahora bien, a los 70 DDT los

tratamientos 1, 3 y 4 alcanzaron una media de 800 mg L^{-1} con diferencia significativa entre los tratamientos restantes, por último, a los 100 DDT el tratamiento 3 mostró una media de casi 5000 mg L^{-1} con diferencia significativa entre los tratamientos 1, 2 y testigo.

Con respecto al contenido de calcio en materia seca (Figura 7D), los tratamientos de calcio aplicados indicaron aumento significativo con respecto al testigo. Los tratamientos 3 y 4 mostraron una media superior (300 mg g^{-1} de peso seco) en comparación con los tratamientos 1 y 2 (280 mg g^{-1} peso seco).

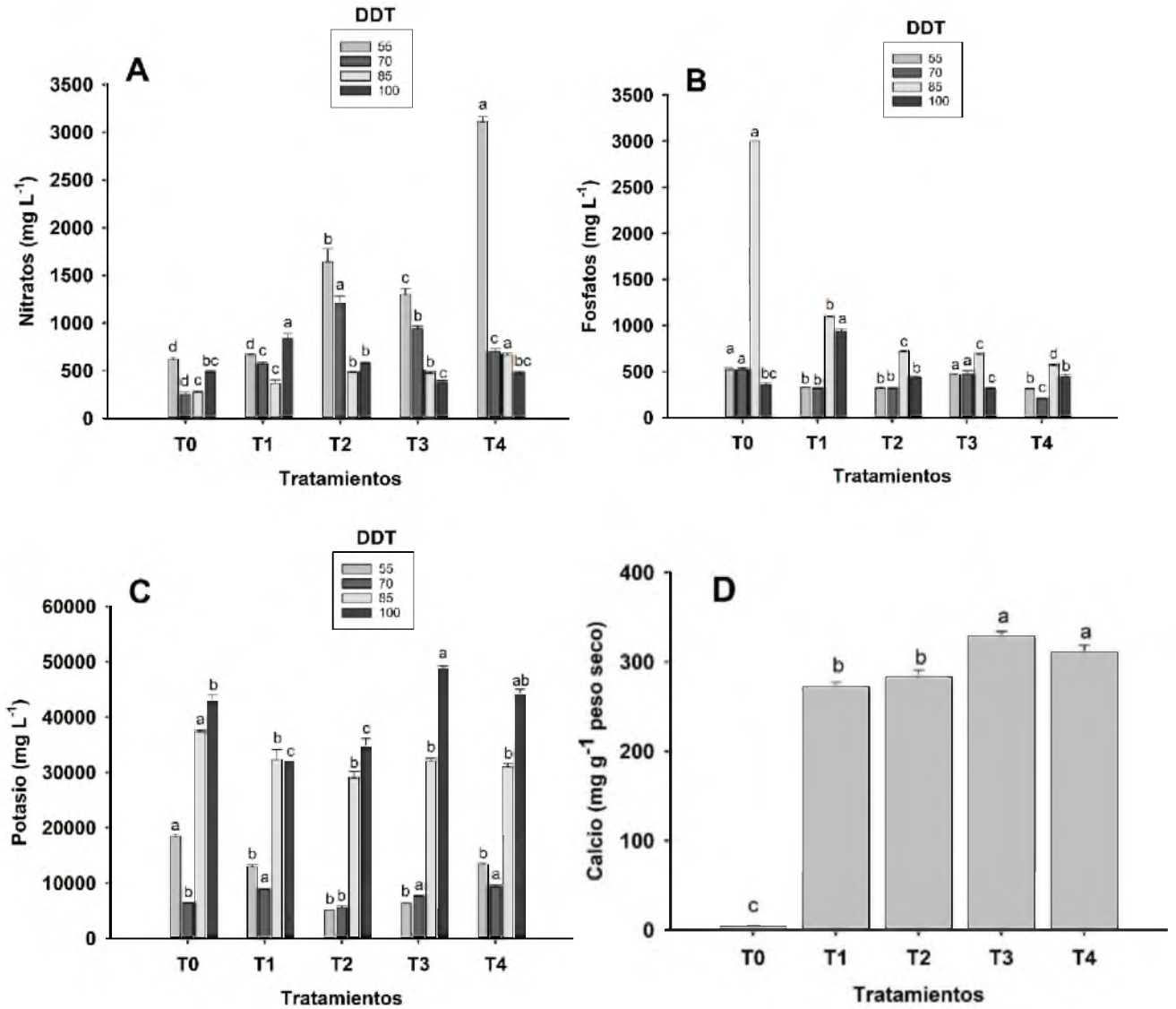


Figura 7. Efecto de los tratamientos de calcio sobre el contenido de nitratos (A), fosfatos (B), potasio (C) y calcio (D) de la planta. DDT= Días después del trasplante; T0= Testigo absoluto; T1= 7.8 kg ha⁻¹; T2= 15.6 kg ha⁻¹; T3= 23.4 kg ha⁻¹; T4= 31.2 kg ha⁻¹. Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$).

7.1.3 Suelo

Con respecto a los resultados obtenidos en la solución del suelo, tenemos que en conductividad eléctrica (Figura 8A), a los 55 y 85 DDT, los tratamientos 2 y 4 alcanzaron una media de $700 \mu\text{S cm}^{-1}$ con diferencia significativa comparado con los demás tratamientos. Seguido de los 70 DDT, los tratamientos 2 y 3 indicaron una media cercana a $600 \mu\text{S cm}^{-1}$ con diferencia significativa entre todos los tratamientos. Posteriormente, a los 100 DDT, el tratamiento 4 mostró una media de casi $600 \mu\text{S cm}^{-1}$ respectivamente indicando diferencia significativa con los demás tratamientos incluyendo al testigo. En cuanto al pH (Figura 8B), a los 55 DDT todos los tratamientos mostraron diferencia significativa con respecto al testigo. Sin embargo, a los 70 y 100 DDT el testigo indicó medias de 6.07 y 6.03 con diferencia significativa en comparación con los demás tratamientos. En contraste, a los 85 DDT el tratamiento 4 presentó una media de 6.03 y mostró diferencia significativa con todos los tratamientos.

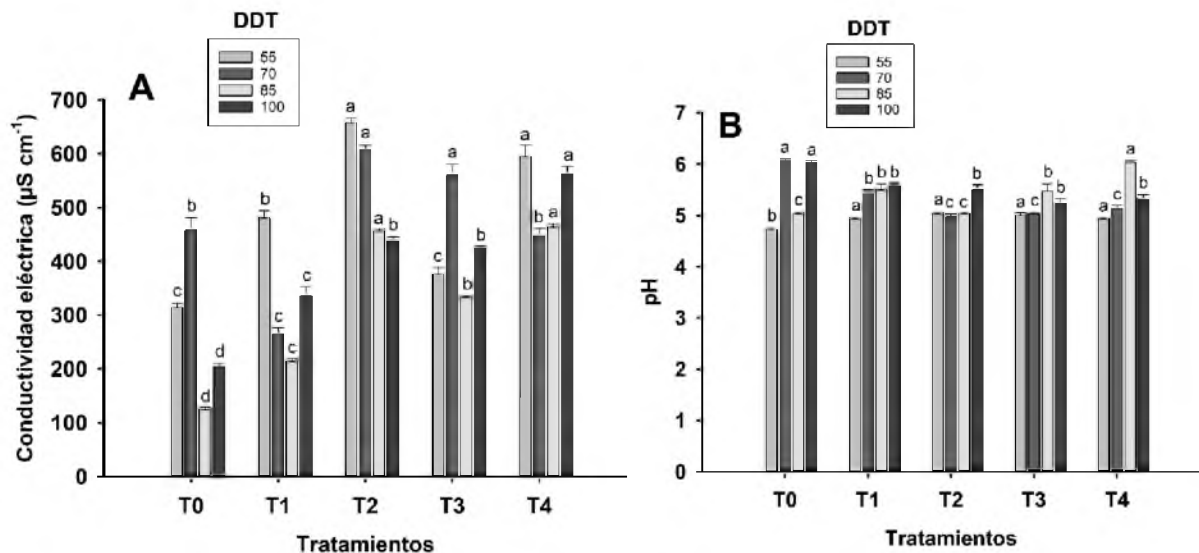


Figura 8. Efecto de los tratamientos de calcio sobre la conductividad eléctrica (A) y el pH (B) en la solución del suelo. DDT= Días después del trasplante; T0= Testigo absoluto; T1= 7.8 kg ha^{-1} ; T2= 15.6 kg ha^{-1} ; T3= 23.4 kg ha^{-1} ; T4= 31.2 kg ha^{-1} . Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$).

En lo que respecta al contenido de nitratos (Figura 9A), a los 55 DDT, el tratamiento 4 alcanzó una media de 350 mg L⁻¹ con diferencias significativas entre todos los tratamientos incluido el testigo. A los 70 DDT el testigo mostró una media de 380 mg L⁻¹ con diferencia significativa respecto a los tratamientos 1, 2 y 3. Sin embargo, a los 85 DDT, el tratamiento 4 alcanzó una media de 480 mg L⁻¹ evidenciando diferencia significativa con todos los tratamientos. Finalmente, a los 100 DDT, el tratamiento 3 y testigo alcanzaron una media de 220 mg L⁻¹ con diferencias significativas con respecto a los tratamientos 2 y 4.

En cuanto al contenido de fosfatos (Figura 9B) a los 55 y 100 DDT, el tratamiento 4 indicó una media de 6, 5 y 6.2 mg L⁻¹ respectivamente con diferencia significativa en comparación con los demás tratamientos. Sin embargo, a los 70 DDT, el tratamiento 2 presentó una media de 7 mg L⁻¹ evidenciando diferencia significativa con todos los otros tratamientos y el testigo. A los 85 DDT no hubo diferencia significativa entre los tratamientos.

En relación con el contenido de potasio (Figura 9C), a los 55 y 70 DDT, los tratamientos 2 y 4 mostraron una media de 80 y 60 mg L⁻¹ respectivamente, con diferencia significativa comparado con los demás tratamientos. Seguido de los 85 DDT, el tratamiento 4 alcanzó una media de 120 mg L⁻¹ con diferencias significativas en comparación con los otros tratamientos incluido el testigo. Finalmente, a los 100 DDT, el tratamiento 1 indicó una media de 100 mg L⁻¹ mostrando diferencias significativas con respecto a los demás tratamientos.

En lo que se refiere a calcio (Figura 9D), el tratamiento 4 a los 55 DTT, alcanzó una media de 98 mg L⁻¹ mostrando diferencia significativa con los tratamientos 1, 2 y testigo. Seguido de los 70 DDT, el tratamiento 1 alcanzó una media de 175 mg L⁻¹ presentando diferencia significativa con los demás tratamientos incluido el testigo. Enseguida, a los 85 DDT, el tratamiento 4 indicó una media de 160 mg L⁻¹ evidenciando diferencia significativa con el tratamiento 3 y testigo. Finalmente, a 100 DTT, el tratamiento 4 mostró una media de 170 mg L⁻¹ con diferencia significativa comparado con el tratamiento 2 y testigo.

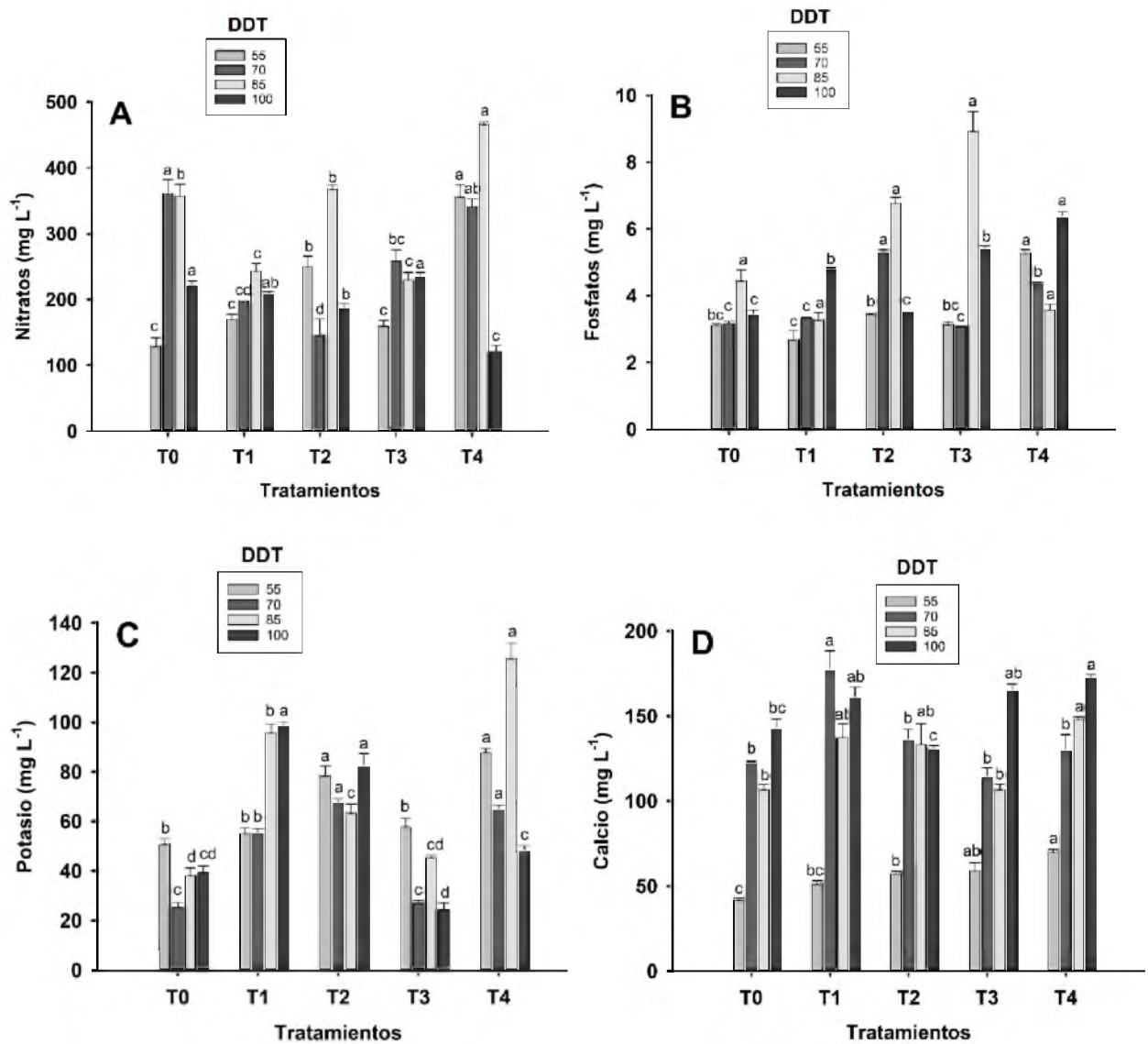


Figura 9. Efecto de los tratamientos de calcio sobre nitratos (A), fosfatos (B) potasio (C) y calcio (D) en la solución del suelo. DDT= Días después del trasplante; T0= Testigo absoluto; T1= 7.8 kg ha⁻¹; T2= 15.6 kg ha⁻¹; T3= 23.4 kg ha⁻¹; T4= 31.2 2 kg ha⁻¹. Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$).

7.1.4 Pigmentos fotosintéticos

En lo que respecta al contenido de clorofila a se muestran en la figura 10A, a los 55 DDT, el tratamiento 4 alcanzó una media de $7.8 \mu\text{g mL}^{-1}$ con diferencia significativa con respecto a los demás tratamientos. Continuando a los 70 DDT, los tratamientos 1 y 3 obtuvieron una media aproximada de $7 \mu\text{g mL}^{-1}$ con diferencia significativa en comparación con los otros tratamientos, incluido el testigo. Después a los 85 DDT, el tratamiento 4 alcanzó una media de $5 \mu\text{g mL}^{-1}$ con diferencia significativa entre todos los tratamientos. La última determinación a los 100 DDT, el tratamiento 3 fue el que indicó una media de $4 \mu\text{g mL}^{-1}$ con diferencia significativa entre los tratamientos.

En cuando a la clorofila b (Figura 10B), a los 55 y 70 DDT, el testigo alcanzó las medias más altas de aproximadamente $7 \mu\text{g mL}^{-1}$ con diferencia significativa al resto de los tratamientos. Posteriormente, a los 85 DDT, el tratamiento 4 indicó una media de $3.8 \mu\text{g mL}^{-1}$ con diferencias significativas comparado con los otros tratamientos. Para finalizar, a los 100 DDT, el tratamiento 1 mostró una media superior a $5 \mu\text{g mL}^{-1}$ con diferencias significativas en comparación con los otros tratamientos incluido el testigo.

Con respecto a la clorofila a+b (Figura 10C), a los 55 DDT, el tratamiento 2 alcanzó una media de $12 \mu\text{g mL}^{-1}$ con diferencia significativa comparado con los demás tratamientos. Seguido de los 70 DDT, los tratamientos 1, 3 y testigo mostraron una media de $12 \mu\text{g mL}^{-1}$ evidenciando diferencia significativa con los tratamientos 2 y 4. Contrario a los 85 DDT, donde el tratamiento 4 indicó una media de $8 \mu\text{g mL}^{-1}$ con diferencia significativa en comparación con los demás tratamientos. Por último, a los 100 DDT, los tratamientos 1 y 2 alcanzaron una media aproximada a $8 \mu\text{S mL}^{-1}$ con diferencia significativa comparado con los tratamientos 4 y testigo.

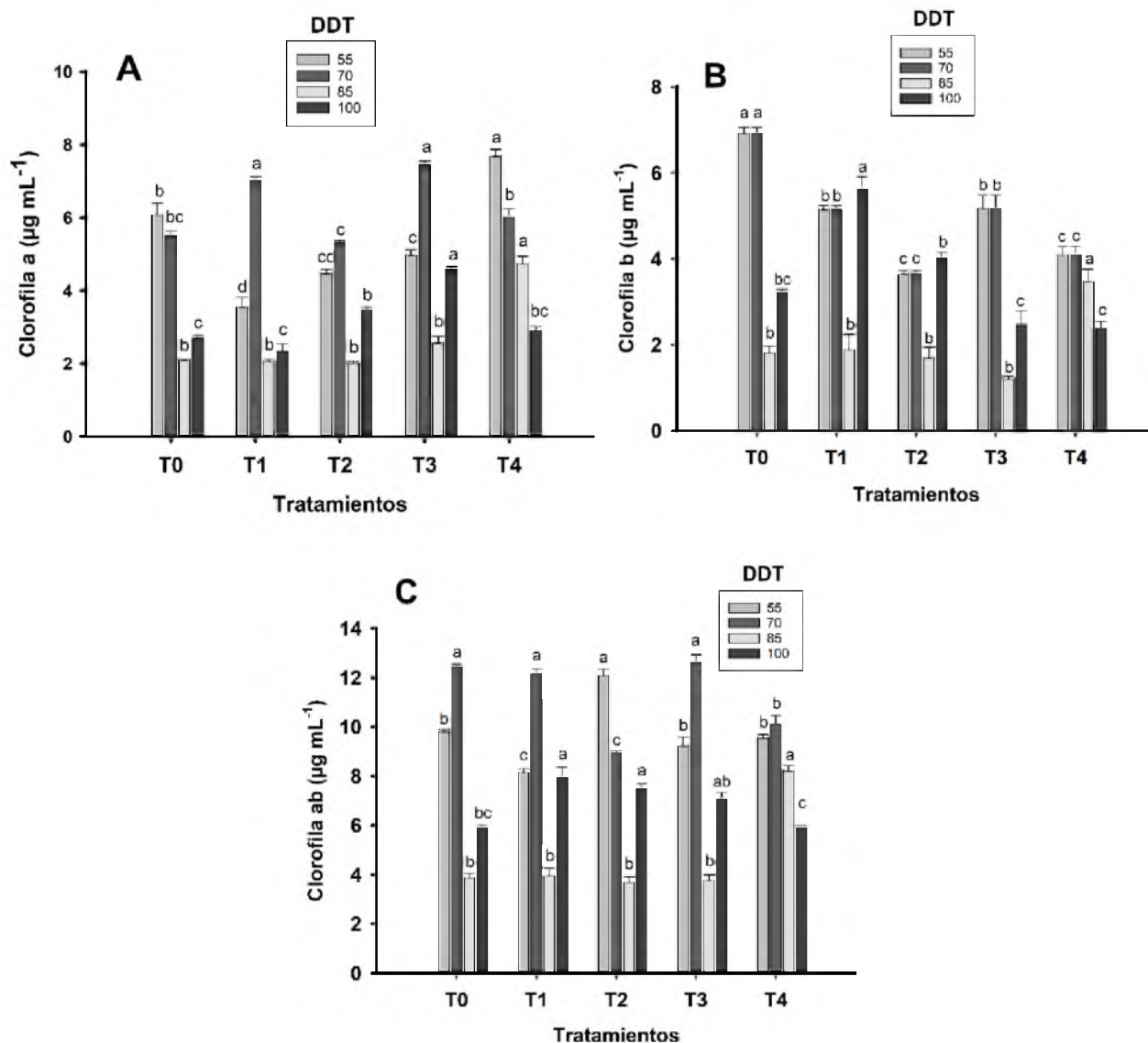


Figura 10. Efecto de los tratamientos de calcio sobre los pigmentos fotosintéticos: clorofila a ($\mu\text{g mL}^{-1}$) (A), clorofila b ($\mu\text{g mL}^{-1}$) (B) y clorofila ab ($\mu\text{g mL}^{-1}$) (C) en las hojas de chile soledad. DDT= Días después del trasplante; T0= Testigo absoluto; T1= 7.8 kg ha⁻¹; T2= 15.6 kg ha⁻¹; T3= 23.4 kg ha⁻¹; T4= 31.2 kg ha⁻¹. Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$).

7.1.5 Biomasa fresca y seca

Los resultados obtenidos para la biomasa fresca y seca de fruto y de raíz no mostró diferencias significativas entre tratamientos en los dos muestreos (85 y 150 DDT) (Figura 11).

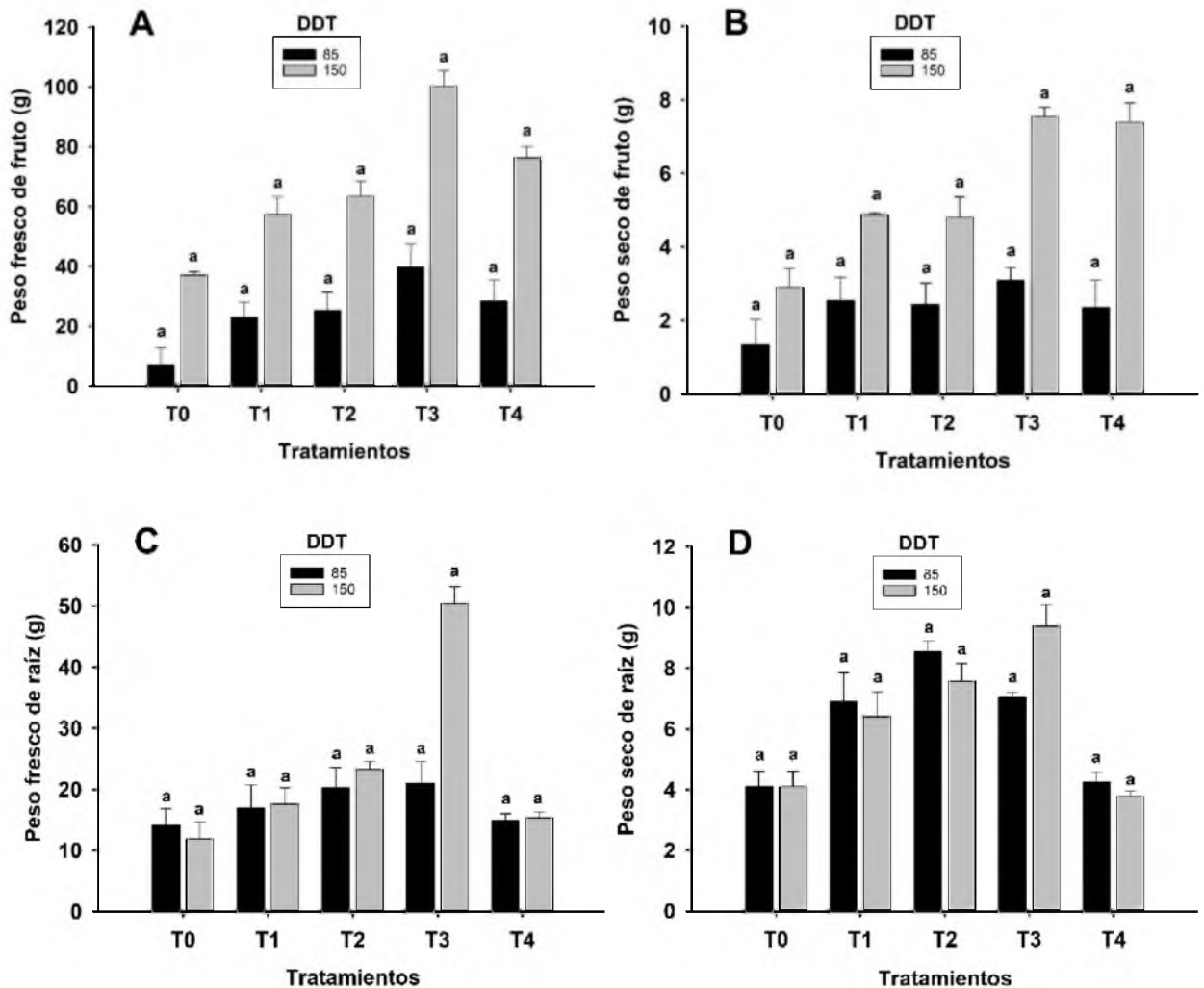


Figura 11. Efecto de los tratamientos de calcio sobre el peso fresco (A y C) y seco (B y D) en frutos y raíz de chile soledad. DDT= Días después del trasplante; T0= Testigo absoluto; T1= 7.8 kg ha⁻¹; T2= 15.6 kg ha⁻¹; T3= 23.4 kg ha⁻¹; T4= 31.2 2 kg ha⁻¹. Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$).

En lo que respecta a peso fresco del tallo y hojas (Figura 12A), a los 85 DDT, el tratamiento 3 mostró una media de 160 g indicando diferencias significativas con el testigo. A los 150 DDT, el tratamiento 4 alcanzó una media de 200 g con diferencia significativa en comparación con el testigo. En cambio, el peso seco de tallo y hojas (Figura 12B) a los 85 DDT, el tratamiento 4 indicó una media cercana a 40 g con diferencia significativa comparado con el testigo. Sin embargo, a los 150 DDT todos los tratamientos evaluados aumentaron el peso seco con una media promedio de 50 g evidenciando diferencia significativa con el testigo.

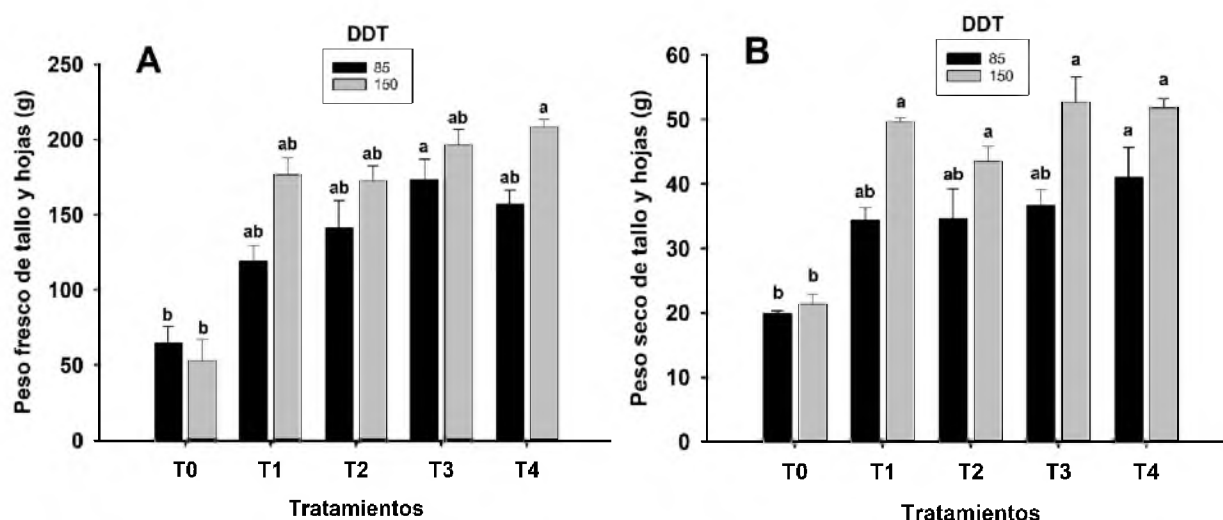


Figura 12. Efecto de los tratamientos de calcio sobre el peso fresco (A) y peso seco (B) en tallo y hojas de chile soledad. DDT= Días después del trasplante; T0= Testigo absoluto; T1= 7.8 kg ha⁻¹; T2= 15.6 kg ha⁻¹; T3= 23.4 kg ha⁻¹; T4= 31.2 2 kg ha⁻¹. Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de medias Tukey (p ≤ 0.05).

7.1.6 Rendimiento del cultivo

En relación con el rendimiento del experimento de calcio en $t\ ha^{-1}$ (Figura 13A) y rendimiento por planta (Figura 13B), los resultados revelaron que todos los tratamientos de calcio aplicados presentaron diferencias significativas con respecto al testigo, con medias entre 9 y 11 $t\ ha^{-1}$ y de 400 a 450 g por planta.

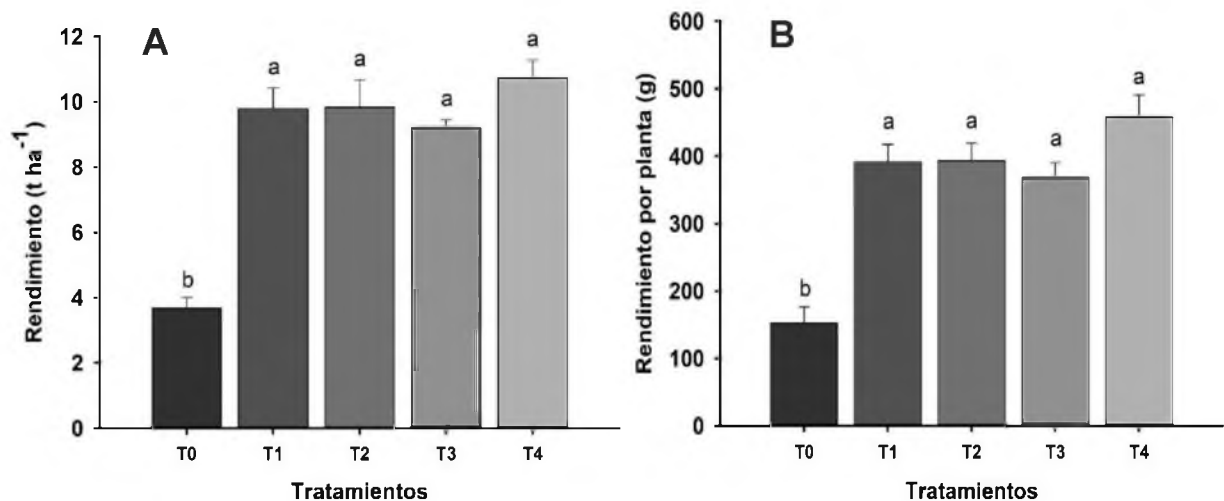


Figura 13. Efecto de los tratamientos de calcio sobre el rendimiento en ($t\ ha^{-1}$) (A) y por planta (g) (B) en chile soledad. DDT= Días después del trasplante; T0= Testigo absoluto; T1= 7.8 $kg\ ha^{-1}$; T2= 15.6 $kg\ ha^{-1}$; T3= 23.4 $kg\ ha^{-1}$; T4= 31.2 $kg\ ha^{-1}$. Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$).

El rendimiento obtenido en cada tratamiento se ajustó al modelo de regresión cuadrática de meseta (Figura 14), oscilando entre 4 a 10 $t\ ha^{-1}$, el modelo se describió significativamente con un valor de $p=0.001$ y una R^2 de 0.76, donde la concentración crítica de nitrato de calcio fue de 11 $kg\ ha^{-1}$ durante el ciclo agrícola 2022-2023.

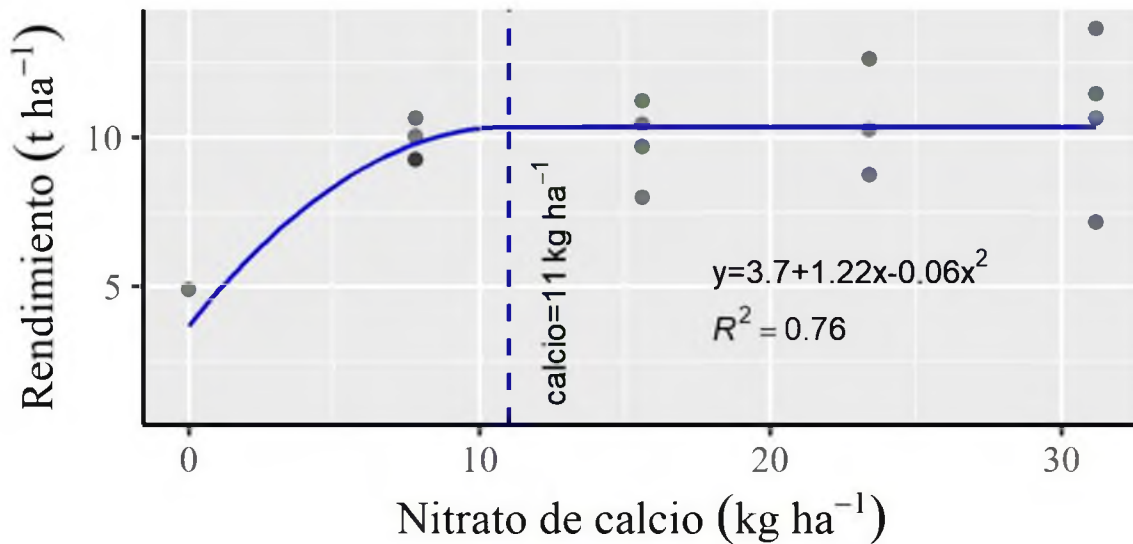


Figura 14. Gráfica de regresión experimento de calcio.

7.1.7 Evaluación de la calidad de frutos

7.1.7.1 Grados brix, pH, porcentaje de ácido cítrico y contenido de capsaicina

Respecto a los grados brix del fruto (Figura 15A) de tamaño chico, el testigo alcanzó una media de 1.6 mostrando diferencia significativa en comparación con los tratamientos 1, 3 y 4. En tamaño mediano, los tratamientos 2 y 3 alcanzaron una media de 1.4 con diferencia significativa en comparación con los tratamientos 1, 4 y el testigo. En contraste, en tamaño grande, el tratamiento 2 indicó una media cercana a 1.4 con diferencia significativa en comparación con los otros tratamientos incluido el testigo.

El pH (Figura 15B) en tamaño chico, el tratamiento 4 mostró una media superior a 6.40 con diferencia significativa con respecto a los tratamientos 1, 3 y testigo. En cambio, en tamaño mediano, los tratamientos 2, 4 y testigo alcanzaron medias de 6.20, 6.30 y 6.27 con diferencias significativas con los tratamientos 1 y 3. En tamaño grande, el tratamiento 2 y testigo mostraron una media de 6.07 con diferencia significativa comparado con el tratamiento 4.

Ahora, respecto al porcentaje de ácido cítrico (Figura 15C), los tratamientos 1 y 3 indicaron una media de 0.04 % evidenciando diferencia significativa con respecto a todos los tratamientos incluido el testigo. Sin embargo, en tamaño mediano fue el testigo el que mostró una media de 0.04 % con diferencia significativa con respecto al tratamiento 1. Finalmente, en tamaño grande, los tratamientos 1, 2 y 3 alcanzaron una media de 0.03 % con diferencia significativa comparados con el tratamiento 4. En el contenido de capsaicina (Figura 15D), el tratamiento 1 indicó una media de 98 mg de capsaicina/g de peso seco en tamaño chico, con diferencia significativa entre todos los tratamientos incluyendo al testigo. Sin embargo, en tamaño de fruto mediano el tratamiento 2 alcanzó una media de 95 con diferencia significativa con respecto a los tratamientos 3, 4 y testigo, finalmente en tamaño grande los tratamientos 2, 3 y 4 con medias de 93, 88 y 94 (mg de capsaicina/g de peso seco) fueron significativamente diferentes con el tratamiento 1 y testigo.

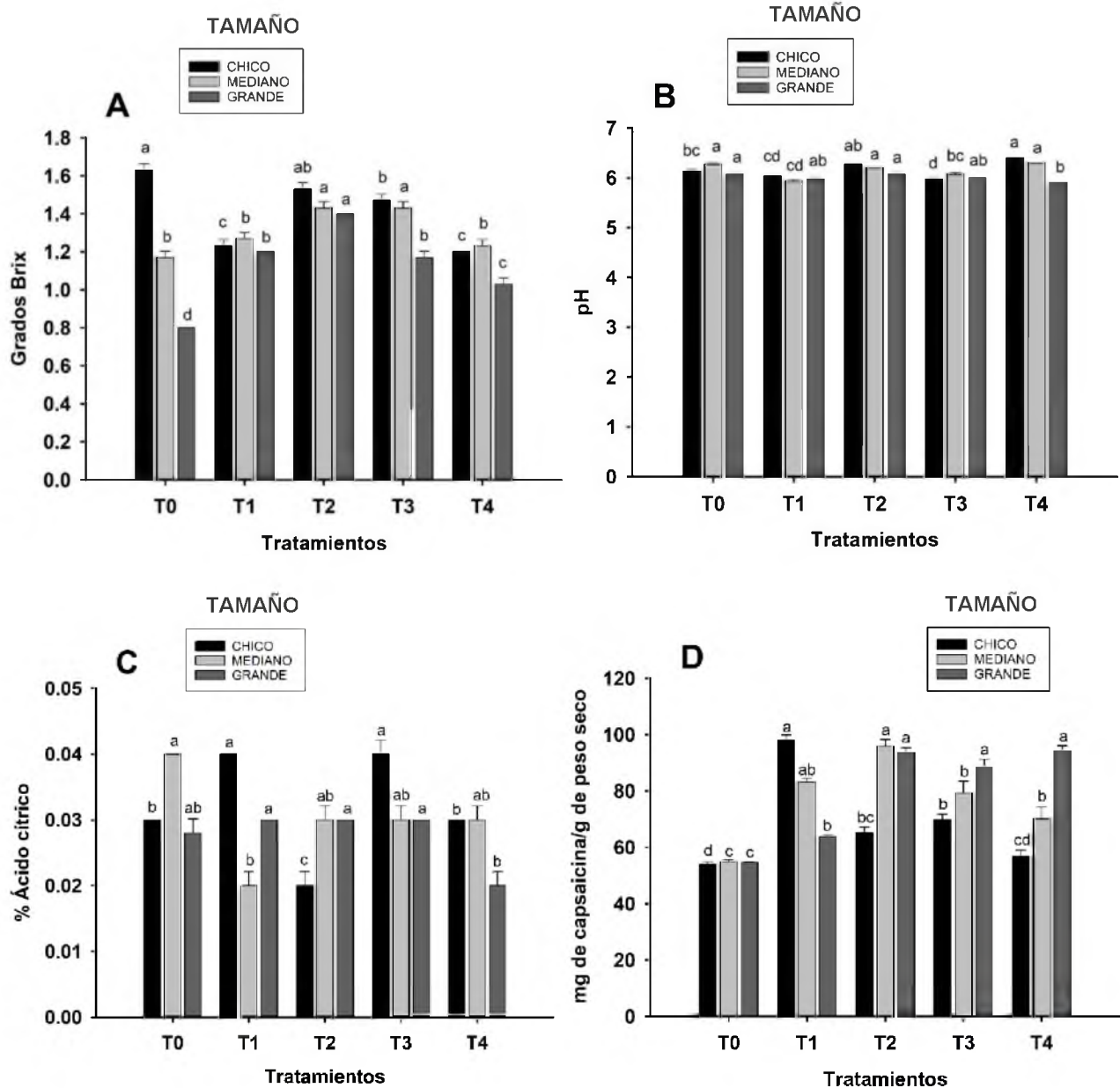


Figura 15. Efecto de los tratamientos de calcio sobre los grados brix (A), pH (B), % de ácido cítrico (C) y contenido de capsaicina (mg de capsaicina/g de peso seco) (D) en frutos de chile soledad de tamaño (chico, mediano, grande). T0= Testigo absoluto; T1= 7.8 kg ha⁻¹; T2= 15.6 kg ha⁻¹; T3= 23.4 kg ha⁻¹; T4= 31.2 2 kg ha⁻¹. Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de medias Tukey (p ≤ 0.05).

7.1.7.2 Tamaño

En lo que respecta a las características físicas de frutos, en tamaño chico, el tratamiento 1 alcanzó una media de 5 cm de longitud (Figura 16A) con diferencia significativa en comparación con el testigo. De manera similar, en tamaño mediano el tratamiento 1 indicó una media de aproximadamente 7 cm de longitud con diferencia significativa con respecto al tratamiento 3 y testigo. En tamaño grande, los tratamientos 1, 3 y 4 mostraron una longitud promedio de 9 cm con diferencias significativas en comparación con el testigo.

En cuanto al diámetro de fruto (Figura 16B), tanto en tamaño chico como grande no existieron diferencia significativa en todos los tratamientos incluido el testigo. Sin embargo, en tamaño mediano el tratamiento 1 mostró una media de 11 mm con diferencia significativa con respecto al tratamiento 3. En relación con el peso de fruto (Figura 16C), no existió diferencia significativa entre todos los tratamientos y el testigo, en el tamaño chico y mediano. En cambio, en fruto de tamaño grande, los tratamientos 1 y 2 alcanzaron una media aproximada de 8 g con diferencia significativa con respecto al tratamiento 3 y testigo. Por último, el grosor del pericarpio (Figura 16D) fue la única variable en la que los tratamientos evaluados no presentaron diferencia significativa en ninguno de los tamaños de frutos evaluados.

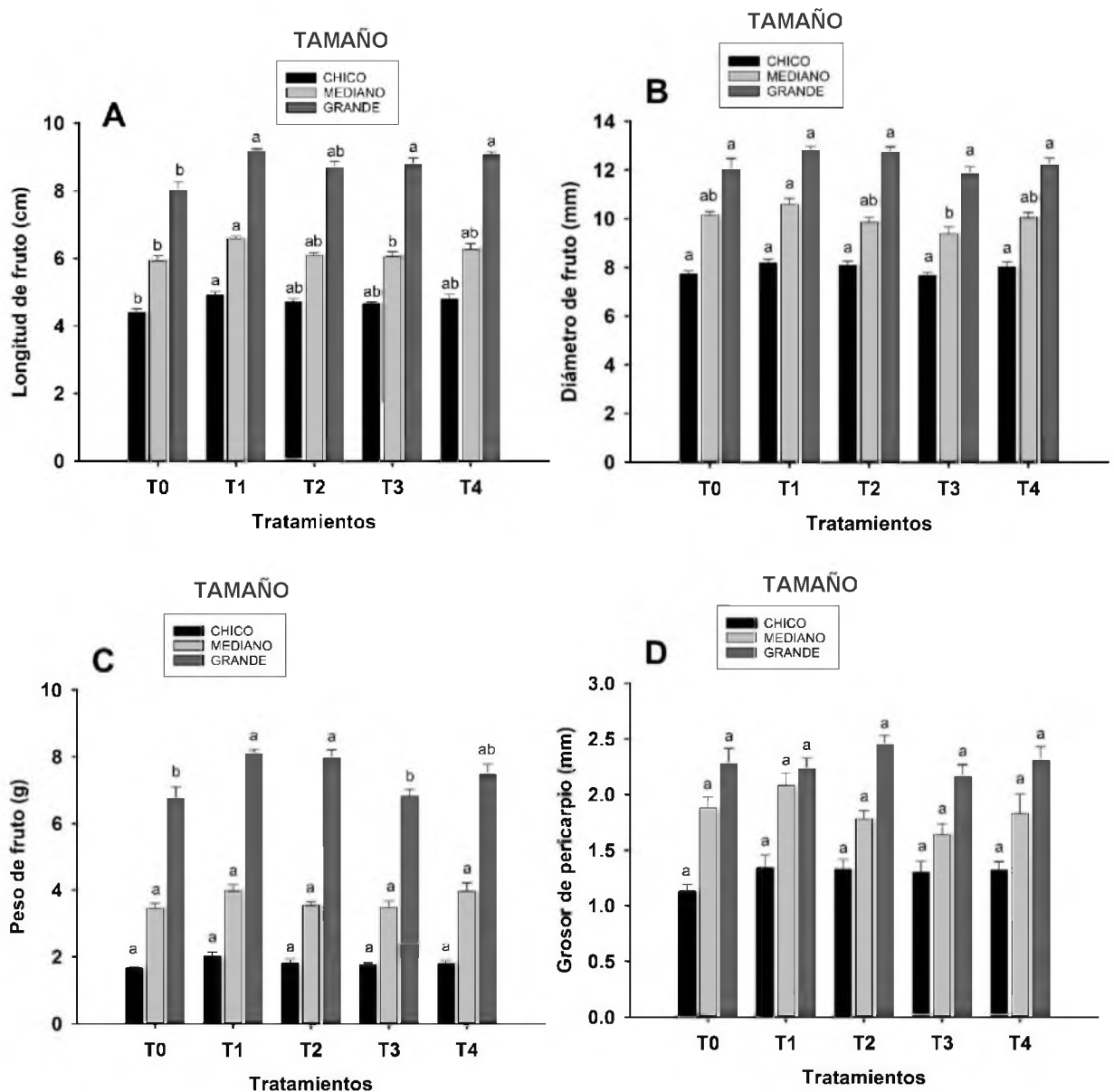


Figura 16. Efecto de los tratamientos de calcio sobre la longitud de fruto (A), diámetro de fruto (B), peso de fruto (C) y grosor de pericarpio (D) en frutos de chile soledad de tamaño (chico, mediano, grande). T0= Testigo absoluto; T1= 7.8 kg ha⁻¹; T2= 15.6 kg ha⁻¹; T3= 23.4 kg ha⁻¹; T4= 31.2 kg ha⁻¹. Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$).

7.2 Experimento de magnesio

7.2.1 Crecimiento

En cuanto al diámetro del tallo, a los 40 DDT (días después del trasplante), el tratamiento 3 mostró diferencias significativas con una media de 4.5 mm en comparación con los tratamientos 1, 2 y testigo. Sin embargo, de los 55 hasta los 100 DDT no hubo diferencias significativas entre los tratamientos de magnesio aplicados (T1, T2, T3 y T4), pero si hubo diferencias con respecto al testigo, con diámetros entre 6 y 9 mm (Figura 17A). En lo que respecta a la altura de la planta (Figura 17B), el tratamiento 4 alcanzó una altura de 50 cm a los 40 DDT, lo que mostró diferencias significativas con respecto al tratamiento 2. Similarmente, a los 55 DDT se observaron diferencias significativas en comparación con el testigo. En cambio, de los 70 hasta los 100 DDT los tratamientos 1, 2, 3 y 4 mostraron diferencias significativas con respecto al testigo.

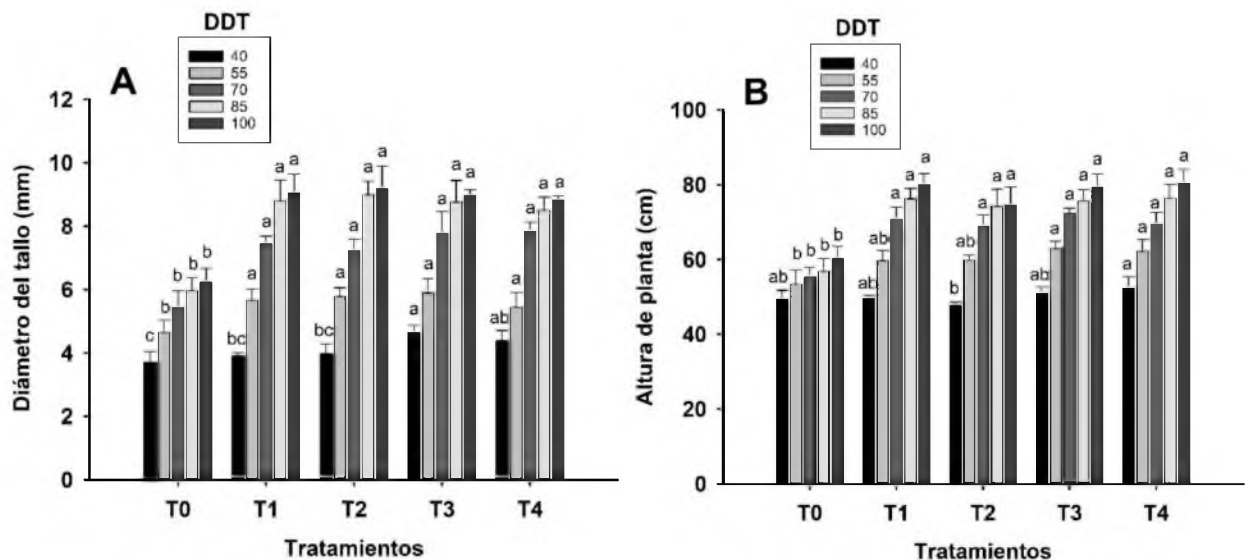


Figura 17. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre el diámetro del tallo (A) y altura de la planta (B). DDT= Días después del trasplante; T0= Testigo absoluto; T1=4.8 kg ha⁻¹; T2= 9.6 kg ha⁻¹; T3= 14.4 kg ha⁻¹; T4= 19.2 kg ha⁻¹. Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$).

En cuanto al número de frutos (Figura 18A), a los 40 DDT no hubo diferencias significativas entre los tratamientos de magnesio aplicados respecto del testigo. Sin embargo, a los 55 DDT, los tratamientos 3 y 4 mostraron diferencias significativas de 18 y 15 frutos, en comparación con el testigo. Posteriormente, a los 70 DDT, el tratamiento 3 mostró la media más alta de 90 frutos con diferencias significativas en comparación con los demás tratamientos y el testigo. A los 85 DDT, el tratamiento 1 alcanzó una media de 73 frutos con diferencias significativas con el tratamiento 4 y testigo. Finalmente, a los 100 DDT, el tratamiento 1 mostró diferencias significativas con una media superior a 44 en comparación con los tratamientos 2, 4 y testigo. En relación con el área foliar (Figura 18B), a los 40 DDT no hubo diferencias significativas entre los tratamientos de magnesio aplicados incluido el testigo. En cambio, a los 55 DDT, los tratamientos 2 y 3 mostraron diferencias significativas con respecto al testigo con una media máxima de 10 cm². Sin embargo, a los 70 y 100 DDT no hubo diferencias significativas con ninguno de los tratamientos de magnesio aplicados, incluido el testigo. Ahora bien, a los 85 DDT el tratamiento 2 mostró una media aproximada de 17 cm² siendo diferente significativamente con los tratamientos 1, 4 y el testigo.

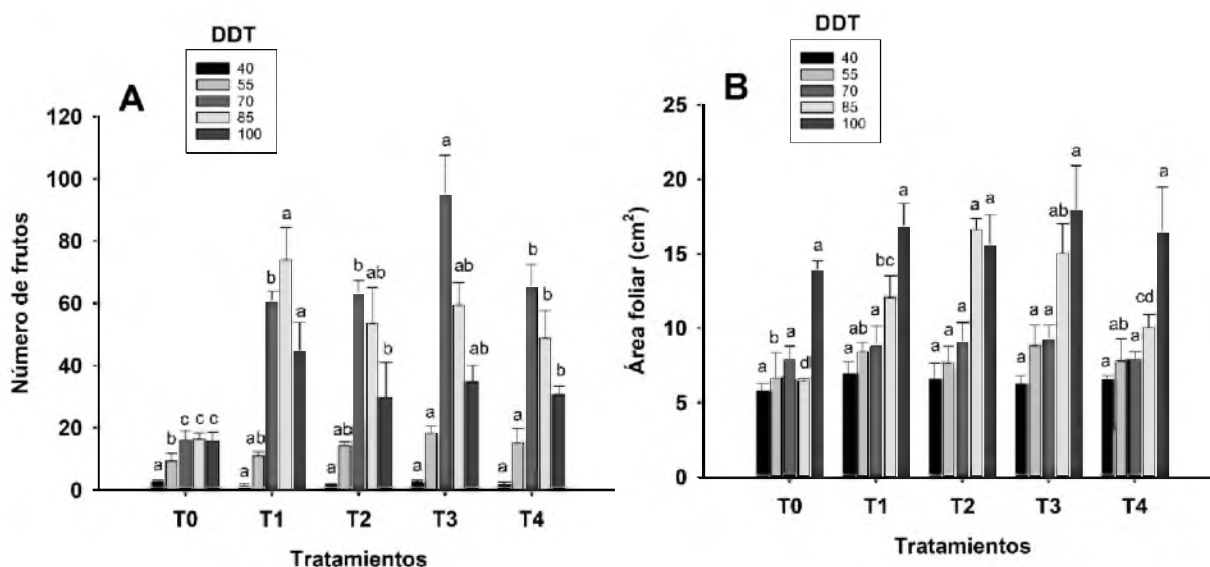


Figura 18. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre el número de frutos (A) y área foliar (B). DDT= Días después del trasplante; T0= Testigo absoluto; T1=4.8 kg ha⁻¹; T2= 9.6 kg ha⁻¹; T3= 14.4 kg ha⁻¹; T4= 19.2 kg ha⁻¹. Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de medias Tukey (p ≤ 0.05).

7.2.2 Savia

En cuanto a los resultados de grados brix (Figura 19), el testigo a los 70, 85 y 100 DDT mostró diferencias significativas con respecto al tratamiento 4, sin embargo, el tratamiento 1 y 3 a los 40 DDT, mostraron diferencia significativa con respecto al tratamiento 4. A los 55 DDT, el tratamiento 3 mostró diferencias significativas con el tratamiento 4 con un valor superior a 5.

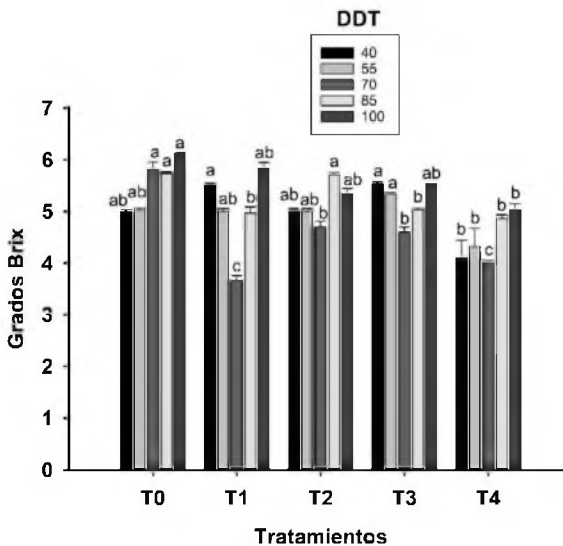


Figura 19. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre los grados brix de savia en la planta. DDT= Días después del trasplante; T0= Testigo absoluto; T1=4.8 kg ha⁻¹; T2= 9.6 kg ha⁻¹; T3= 14.4 kg ha⁻¹; T4= 19.2 kg ha⁻¹. Letras minúsculas indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$).

Con respecto al contenido de nitratos (Figura 20A), a los 40 DDT, el tratamiento 4 mostró diferencias significativas con un valor superior a los 1000 mg L⁻¹ en comparación con los tratamientos 3 y testigo. A los 55 DDT, el testigo presentó el valor más alto aproximado a 2800 mg L⁻¹ que fue significativamente diferente con los tratamientos de magnesio aplicados, mientras que a los 70 DDT el tratamiento 4 mostró el contenido de nitratos superior a 3000 mg L⁻¹ con diferencia significativa con respecto a los tratamientos 1, 2 y testigo. En cambio, a los 85 DDT los tratamientos 1 y 2 fueron estadísticamente diferentes a los tratamientos 3, 4 y testigo con aproximadamente 1800 mg L⁻¹. De manera similar a los 100 DDT, el tratamiento 1 indicó diferencia significativa comparado con todos los tratamientos.

Para el contenido de fosfatos (Figura 20B) se halló que a los 40 DDT no hubo diferencias significativas entre los tratamientos de magnesio aplicados y el testigo, en contraste a los 55 DDT el tratamiento 3 y 4 con una media aproximada de 350 mg L⁻¹ indicaron diferencia significativa con los tratamientos 1, 2 y testigo. En cambio, a los 70 DDT los tratamientos 2 y 3 mostraron diferencias significativas con respecto al tratamientos 4 y testigo con una media aproximada de 400 mg L⁻¹. Posteriormente, a los 85 DDT el tratamiento 1 mostró diferencias significativas con una media aproximada de 600 mg L⁻¹ comparado con los tratamientos 3, 4 y testigo. No obstante, a los 100 DDT el tratamiento 4 indicó diferencias significativas con los demás tratamientos, incluido el testigo con un contenido de 800 mg L⁻¹ de fosfato. Como se puede apreciar en el contenido de potasio (Figura 20C), el testigo indicó diferencias significativas en relación a los tratamientos magnesio aplicados de más de 1000 mg L⁻¹, posteriormente a los 55 DDT el tratamiento 3 indicó diferencias significativas con 1500 mg L⁻¹ en comparación con los demás tratamientos. A los 70 DDT no hubo diferencias significativas entre todos los tratamientos. Sin embargo, a los 85 DDT los tratamientos 1, 2 y 3 mostraron diferencias significativas con medias superiores a 1400 mg L⁻¹, con respecto al tratamiento 4 y testigo. Finalmente, a los 100 DDT, el tratamiento 4 mostró diferencias significativas con un valor superior a los 1200 mg L⁻¹ en comparación con los tratamientos 1, 2 y testigo.

El contenido de magnesio (Figura 20D) a los 40 DDT no mostró diferencias significativas. En cuanto a los 55 DDT, el tratamiento 4 fue significativamente diferente con respecto al tratamiento 1, 3 y testigo. Así mismo a los 70 DDT, el tratamiento 4 reveló valores de casi 3000 mg L⁻¹ con diferencias significativas entre todos los tratamientos, seguido de los 85 DDT, los tratamientos 3, 4 y testigo indicaron valores aproximados a 2000 mg L⁻¹ con diferencias significativas con respecto a los tratamientos 1 y 2.

Por último, a los 100 DDT el tratamiento 1 indicó diferencias significativas con los tratamientos 1, 2 y 3, excepto con el tratamiento 4, con un valor aproximado de 2500 mg L⁻¹.

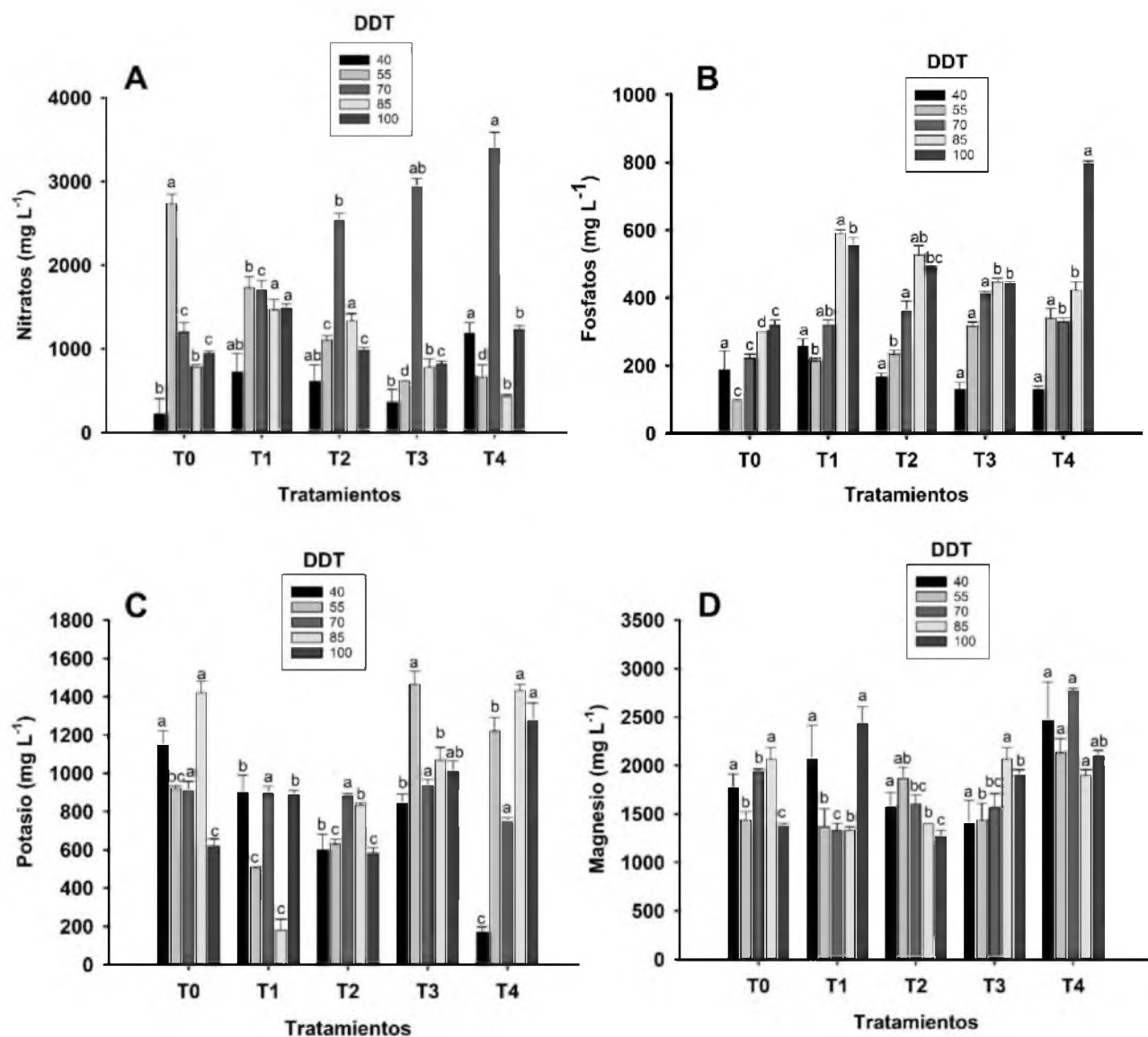


Figura 20. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre el contenido de nitratos (A), fosfatos (B), potasio (C) y magnesio (D) de la planta. DDT= Días después del trasplante; T0= Testigo absoluto; T1=4.8 kg ha⁻¹; T2= 9.6 kg ha⁻¹; T3= 14.4 kg ha⁻¹; T4= 19.2 kg ha⁻¹. Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$).

7.2.3 Suelo

El efecto de los tratamientos con magnesio sobre la conductividad eléctrica en la solución del suelo (Figura 21A) indicó que el tratamiento 1 con una media de $480 \mu\text{S cm}^{-1}$ a los 40 DDT tuvo diferencias significativas en comparación con los tratamientos 3 y 4, pero no presentó diferencias con respecto al testigo. Posteriormente a los 55 DDT, el tratamiento 1 reveló diferencias significativas con una media aproximada de $590 \mu\text{S cm}^{-1}$ con respecto al tratamiento 4. A los 70 DDT, el tratamiento 3 mostró menor conductividad de aproximadamente $300 \mu\text{S cm}^{-1}$ comparado con los demás tratamientos y el testigo. En cambio, a los 85 DTT, el tratamiento 1 fue el que alcanzó una media mínima de $300 \mu\text{S cm}^{-1}$ en comparación con todos los tratamientos y el testigo. Por último, a los 100 DDT, los tratamientos 1, 2 y 3 con medias superiores a los $500 \mu\text{S cm}^{-1}$ reveló diferencias significativas en comparación con el tratamiento 4 y testigo.

En relación con el pH (Figura 21B), los tratamientos 1, 3 y testigo con medias 5.27, 5.27 y 5.30 a los 40 DDT indicaron diferencias significativas con respecto al tratamiento 2.

Seguido de los 55 DTT, los tratamientos 1, 2 y testigo con medias 5.03, 5.10 y 5.17, presentaron diferencias significativas con los tratamientos 3 y 4. No obstante, en el lapso de los 70 DDT, no hubo diferencia significativa entre los tratamientos de magnesio aplicados. Continuando con los 85 DDT, el tratamiento 4 alcanzó un pH de 6.13 con diferencias significativas con respecto a los demás tratamientos y el testigo. Finalmente, a los 100 DDT, el testigo mostró diferencia significativa con un valor de pH de 5.53 con en comparación con los tratamientos 2 y 3.

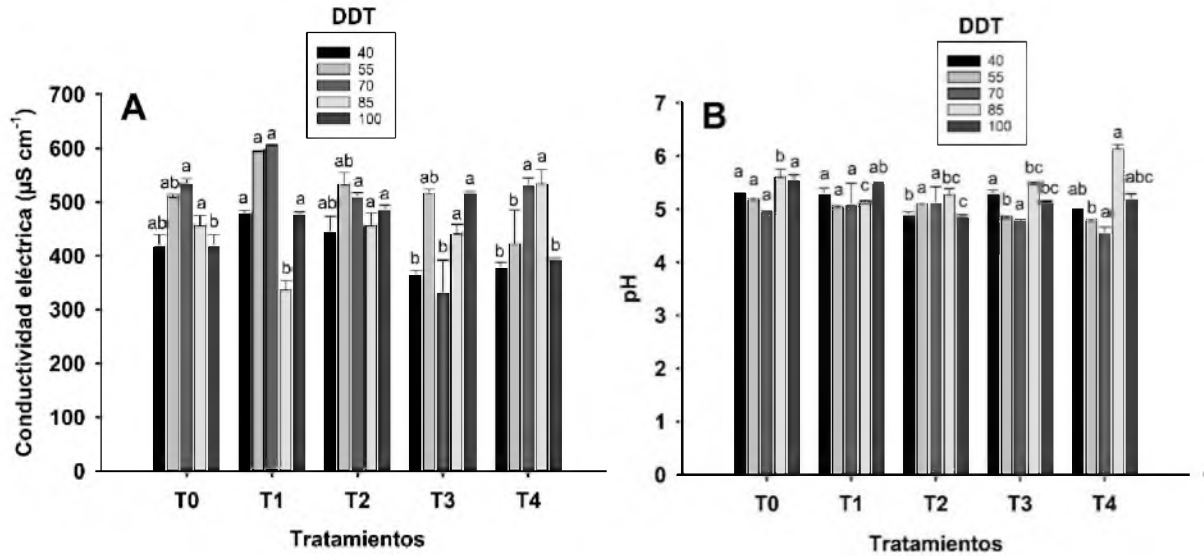


Figura 21. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre la conductividad eléctrica (A) y el pH (B) en la solución del suelo. DDT= Días después del trasplante; T0= Testigo absoluto; T1=4.8 kg ha⁻¹; T2= 9.6 kg ha⁻¹; T3= 14.4 kg ha⁻¹; T4= 19.2 kg ha⁻¹. Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$).

Con respecto al contenido de nitratos en la solución del suelo (Figura 22A), a los 40 DDT, el tratamiento 4 mostró diferencias significativas con una media de 250 mg L⁻¹ en comparación con el testigo, después a los 55 DDT, el tratamiento 4 mostró diferencia significativa con una media cercana a 350 mg L⁻¹ en comparación con los tratamientos 1, 2 y testigo. Seguidamente, a los 70 DDT, el tratamiento 2 evidenció una media de 250 mg L⁻¹ con diferencias significativa con respecto a los demás tratamientos y testigo. Sin embargo, a los 85 DDT, el tratamiento 4 y testigo mostraron una media superior a 400 mg L⁻¹. Por último, a los 100 DDT, el tratamiento 4 indicó diferencias significativas con respecto los tratamientos 1, 2, 3 y testigo.

En cuanto al contenido de fosfatos (Figura 22B), a los 40 DDT, el tratamiento 3 mostró diferencia significativa con una media de 3.5 mg L⁻¹ comparado con los tratamientos 2 y 4, mientras que, a los 55 DDT, el tratamiento 4 alcanzó una media de 6 mg L⁻¹ con diferencias significativas con respecto a los demás tratamientos y testigo. Luego a los 70 DDT, el tratamiento 3 evidenció diferencias significativas con una media superior a 2 mg L⁻¹ en comparación con todos los demás tratamientos.

Sin embargo, a los 85 DDT el tratamiento 3 indicó una media de casi 6 mg L⁻¹ con diferencias significativas comparado con los tratamientos 1, 4 y testigo. A los 100 DDT, el tratamiento 2 mostró una media mayor a 4 mg L⁻¹ en comparación con los demás tratamientos y el testigo.

El contenido de potasio (Figura 22C), a los 40 y 70 DDT no evidenció diferencias significativas entre los tratamientos. Posteriormente, a los 55 DDT, los tratamientos 2, 4 y testigo 4 mostraron diferencias significativas con una media de 70 mg L⁻¹ en comparación con los tratamientos 1 y 3. A los 85 DDT, el tratamiento 2 alcanzó una media cercana a 60 mg L⁻¹ con diferencia significativa comparado con los tratamientos 1, 3 y testigo. Finalmente, a los 100 DDT el tratamiento 1 reveló una media de 60 mg L⁻¹ con diferencias significativas entre todos los tratamientos incluido el testigo.

Al analizar magnesio (Figura 22D), a los 40 DDT los tratamientos 1 y 4 mostraron valores cercanos a 30 mg L⁻¹ con diferencias significativas entre los tratamientos 2, 3 y testigo. Posteriormente, a los 55 DDT, el tratamiento 4 indicó una media de 20 mg L⁻¹ con diferencias significativas comparado con los tratamientos 1, 3 y testigo. Posteriormente a los 70 DDT el tratamiento 4 mostró una media de 45 mg L⁻¹ mostrando diferencias significativas todos los tratamientos y testigo. Por último, a los 85 y 100 DDT, los tratamientos 1 y 4 alcanzaron medias aproximadas a 30 mg L⁻¹ con diferencias significativas entre todos los tratamientos.

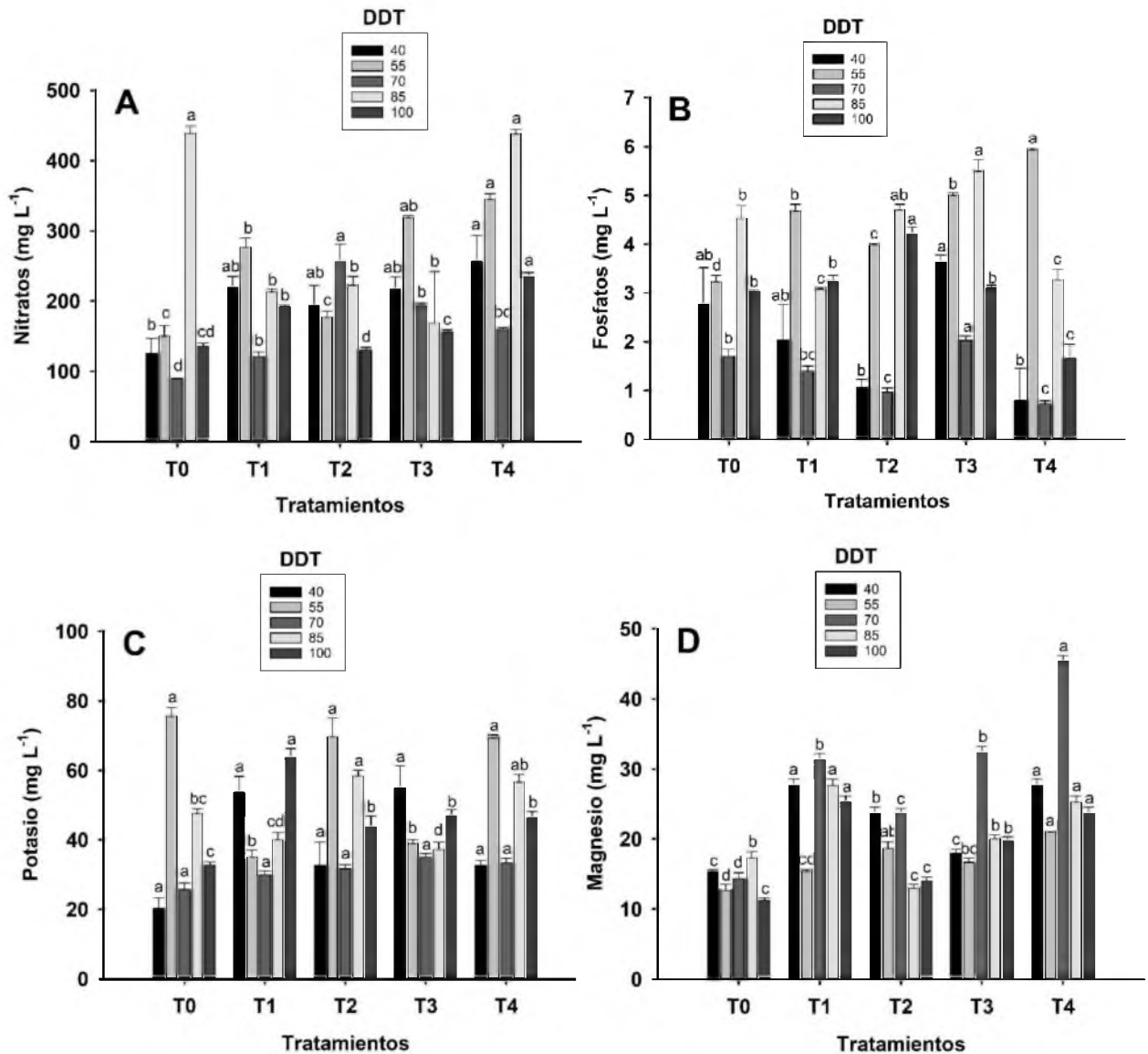


Figura 22. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre nitratos (A), fosfatos (B) potasio (C) y magnesio (D) en la solución del suelo. DDT= Días después del trasplante; T0= Testigo absoluto; T1=4.8 kg ha⁻¹; T2= 9.6 kg ha⁻¹; T3= 14.4 kg ha⁻¹; T4= 19.2 kg ha⁻¹. Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$).

7.2.4 Pigmentos fotosintéticos

Con respecto a clorofila a (Figura 23A), a los 40 DDT, el testigo indicó una media superior de $6 \mu\text{g mL}^{-1}$ con diferencia significativa en comparación con los tratamientos de magnesio aplicados. Seguido de los 55 DDT, el tratamiento 2 y testigo alcanzaron una media superior a $5.8 \mu\text{g mL}^{-1}$ con diferencias significativas entre los tratamientos 1, 3 y 4. A los 70 DDT, el tratamiento 1 mostró una media de casi $7 \mu\text{g mL}^{-1}$ con diferencias significativa entre todos los tratamientos. Mientras que, a los 85 DDT, el tratamiento 2 mostró una media de $4 \mu\text{g mL}^{-1}$ con diferencias significativas comparados con todos los tratamientos incluido el testigo. Finalmente, a los 100 DDT el tratamiento 1 y 3 indicaron una media mayor a $3 \mu\text{g mL}^{-1}$ con diferencias significativas con los tratamientos 2, 4 y testigo.

En cuanto al contenido de la clorofila b (Figura 23B), a los 40 y 55 DDT, no hubo diferencias significativas entre los tratamientos. No obstante, a los 70 DDT, el tratamiento 1 reveló la media más alta de casi $10 \mu\text{g mL}^{-1}$ con diferencias significativas en comparación con todos los tratamientos y el testigo. Sin embargo, a los 85 DDT, el testigo evidenció una media superior de $4 \mu\text{g mL}^{-1}$ con diferencias significativas comparado con los tratamientos 1, 3 y 4. Por último, a los 100 DDT el tratamiento 2 mostró una media de $6 \mu\text{g mL}^{-1}$ con diferencias significativas comparado con todos los tratamientos y el testigo.

Como resultado de la sumatoria de clorofilas a y b (Figura 23C), a los 40 DDT, el testigo indicó una media superior de $9 \mu\text{g mL}^{-1}$ con diferencias significativas comparado con los tratamientos 3 y 4. Posteriormente, a los 55 DDT, el tratamiento 2 y testigo alcanzaron una media de $8 \mu\text{g mL}^{-1}$ con diferencias significativas con el tratamiento 1, 3 y 4. Sin embargo, a los 70 DDT el tratamiento 1 mostró diferencia significativa con una media máxima de $16 \mu\text{g mL}^{-1}$ en comparación con los demás tratamientos. Seguidamente, a los 85 DDT, no existió diferencias significativas entre los tratamientos. Para finalizar, a los 100 DDT, el tratamiento 2 mostró diferencia significativa con una media de $9 \mu\text{g mL}^{-1}$ con respecto al tratamiento 4 y testigo.

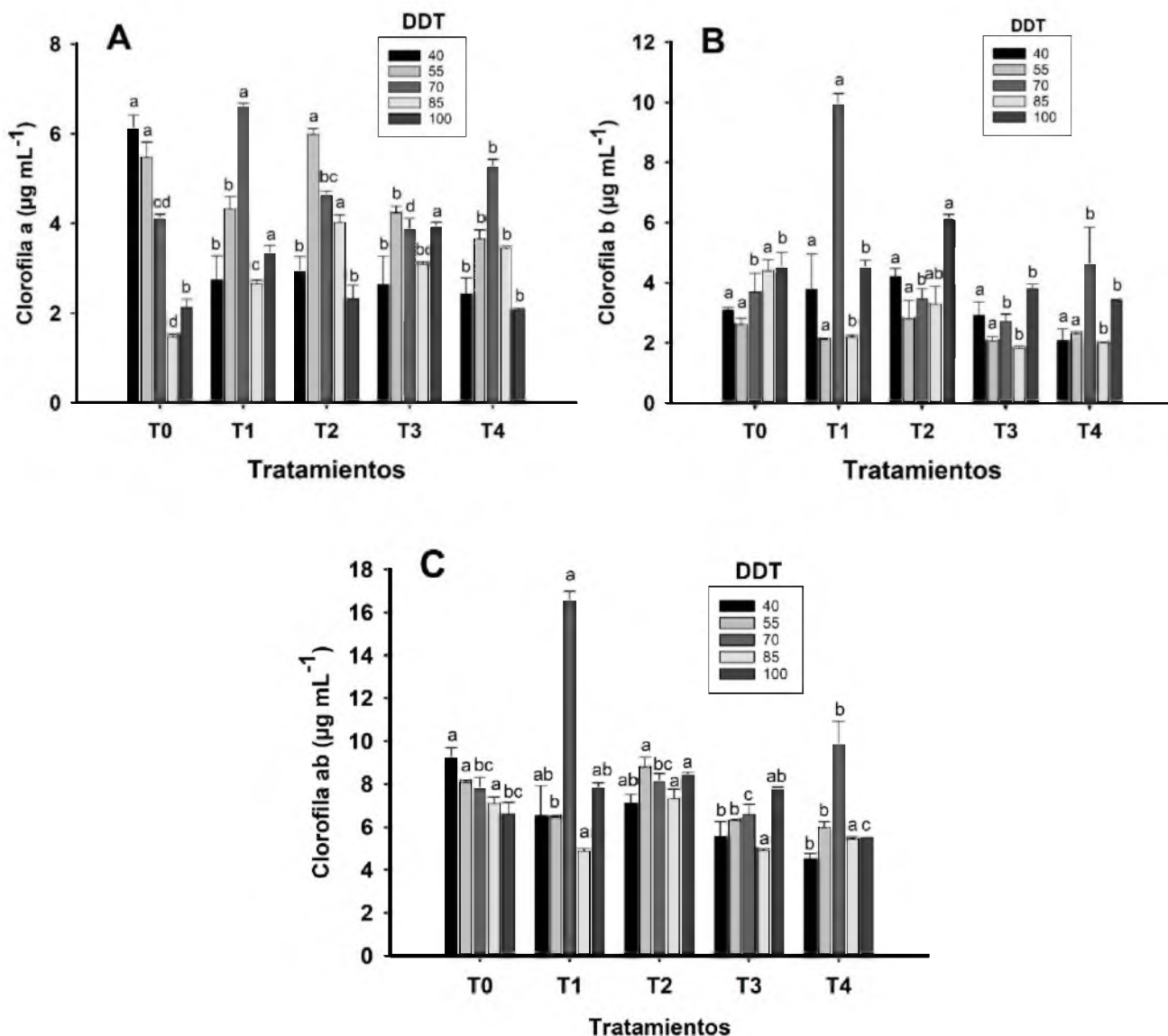


Figura 23. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre los pigmentos fotosintéticos: clorofila a ($\mu\text{g mL}^{-1}$) (A), clorofila b ($\mu\text{g mL}^{-1}$) (B) y clorofila ab ($\mu\text{g mL}^{-1}$) (C) en las hojas de chile soledad. DDT= Días después del trasplante; T0= Testigo absoluto; T1= 4.8 kg ha⁻¹; T2= 9.6 kg ha⁻¹; T3= 14.4 kg ha⁻¹; T4= 19.2 kg ha⁻¹. Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$).

7.2.5 Biomasa fresca y seca

En el peso fresco del fruto (Figura 24A), a los 85 y 150 DDT, el tratamiento 1 alcanzó una media de 70 g y 180 g respectivamente con diferencia significativa en comparación con el testigo.

De manera similar, en peso seco del fruto (Figura 24B), el tratamiento 1 fue el que demostró diferencias significativas a los 85 DDT con respecto al tratamiento 3 y testigo (a los 100 DDT únicamente con testigo).

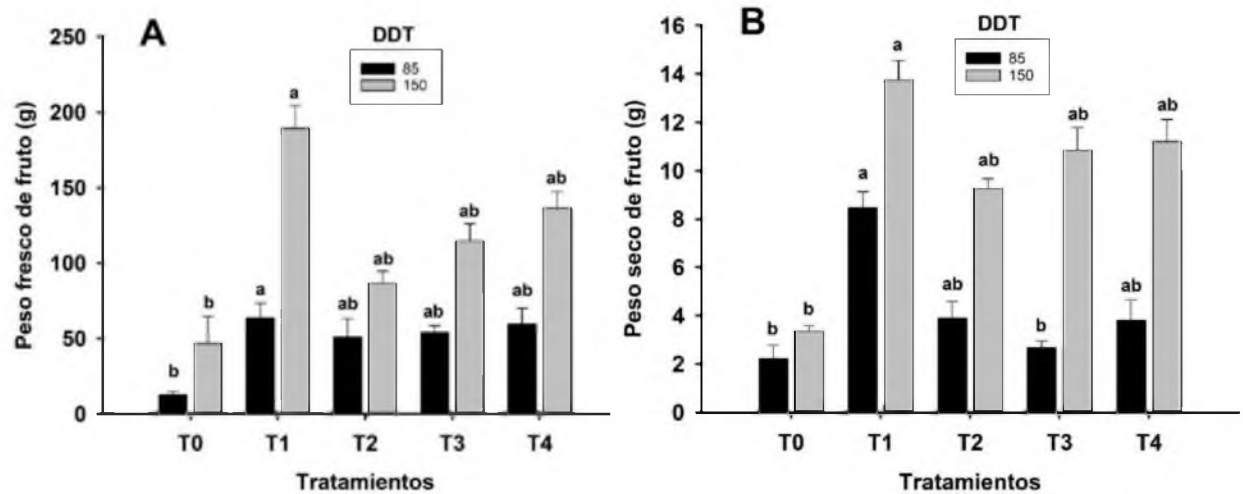


Figura 24. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre el peso fresco (A) y seco (B) en frutos de chile soledad. DDT= Días después del trasplante; T0= Testigo absoluto; T1=4.8 kg ha⁻¹; T2= 9.6 kg ha⁻¹; T3= 14.4 kg ha⁻¹; T4= 19.2 kg ha⁻¹. Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de medias Tukey (p ≤ 0.05).

Con respecto al peso fresco (Figura 25A) y peso seco de la raíz (Figura 25B) a los 85 DDT, no se indicaron diferencias significativas entre los tratamientos de magnesio aplicados. Sin embargo, a los 100 DDT el tratamiento 1 mostró diferencia significativa con respecto al testigo, con una media de 40 y 16 g, respectivamente.

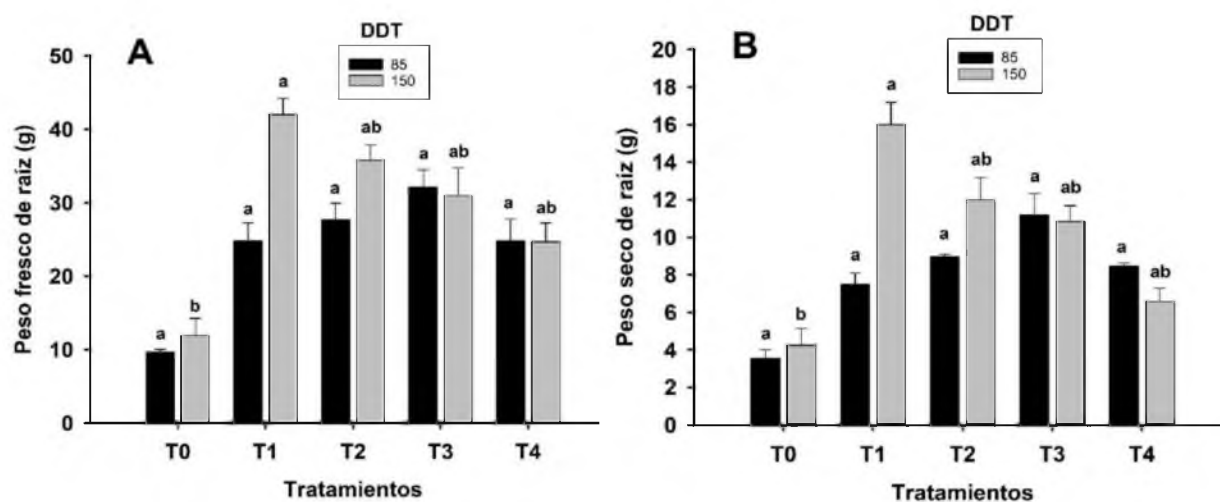


Figura 25. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre el peso fresco (A) y seco (B) en raíz de chile soledad. DDT= Días después del trasplante; T0= Testigo absoluto; T1=4.8 kg ha⁻¹; T2= 9.6 kg ha⁻¹; T3= 14.4 kg ha⁻¹; T4= 19.2 kg ha⁻¹. Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$).

En relación con el peso fresco del tallo y hojas (Figura 26A), a los 85 DDT, todos los tratamientos evidenciaron diferencias significativas con el testigo, sin embargo, a los 150 DDT el tratamiento 1 mostró una media de 280 g con diferencia significativa con respecto al testigo. En contraste con peso seco de tallo y hojas (Figura 26B), los tratamientos 1, 3 y 4 indicaron diferencias significativas con el testigo, en cambio, a los 150 DDT, el tratamiento 1 indicó una media de 70 g con diferencia significativa con respecto al testigo.

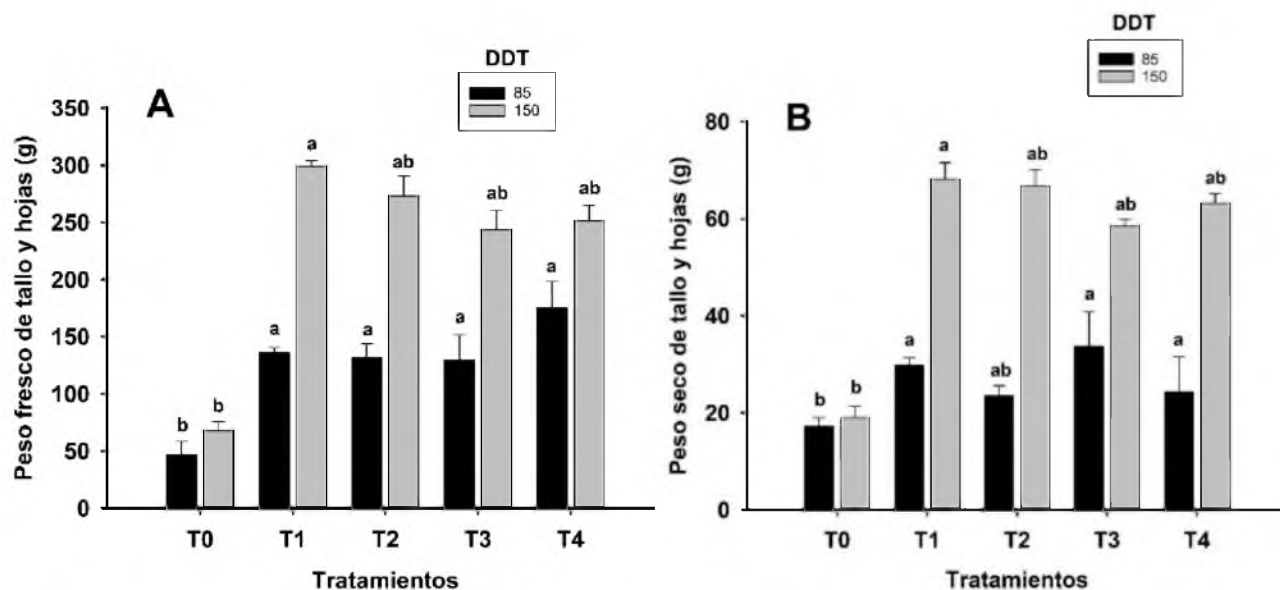


Figura 26. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre el peso fresco (A) y peso seco (B) en tallo y hojas de chile soledad. DDT= Días después del trasplante; T0= Testigo absoluto; T1=4.8 kg ha⁻¹; T2= 9.6 kg ha⁻¹; T3= 14.4 kg ha⁻¹; T4= 19.2 kg ha⁻¹. Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$).

7.2.6 Rendimiento del cultivo

Los hallazgos obtenidos en relación con el rendimiento en t ha⁻¹ (Figura 27A) y rendimiento por planta (Figura 27B), revelaron que los tratamientos de magnesio aplicados presentaron diferencias significativas con respecto al testigo, con medias entre 11 y 14 t ha⁻¹ y de 300 a 450 g por planta.

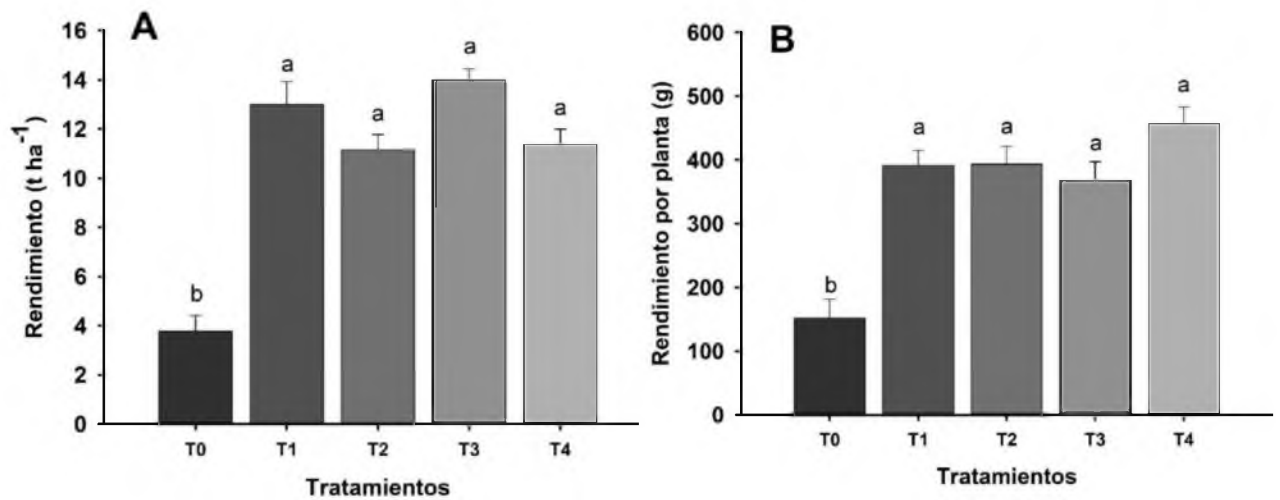


Figura 27. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre el rendimiento en ($t\ ha^{-1}$) (A) y por planta (g) (B) en chile soledad. DDT= Días después del trasplante; T0= Testigo absoluto; T1=4.8 $kg\ ha^{-1}$; T2= 9.6 $kg\ ha^{-1}$; T3= 14.4 $kg\ ha^{-1}$; T4= 19.2 $kg\ ha^{-1}$. Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$).

Estos rendimientos se ajustaron al modelo de regresión cuadrática de meseta, oscilando entre 3 a $16\ t\ ha^{-1}$, el modelo se describió significativamente (Figura 28) con un valor de $p=0.001$ y un R^2 de 0.75 donde la concentración crítica de sulfato de magnesio fue de $6\ kg\ ha^{-1}$ en relación con el rendimiento obtenido de cada tratamiento durante el ciclo agrícola (2022-2023).

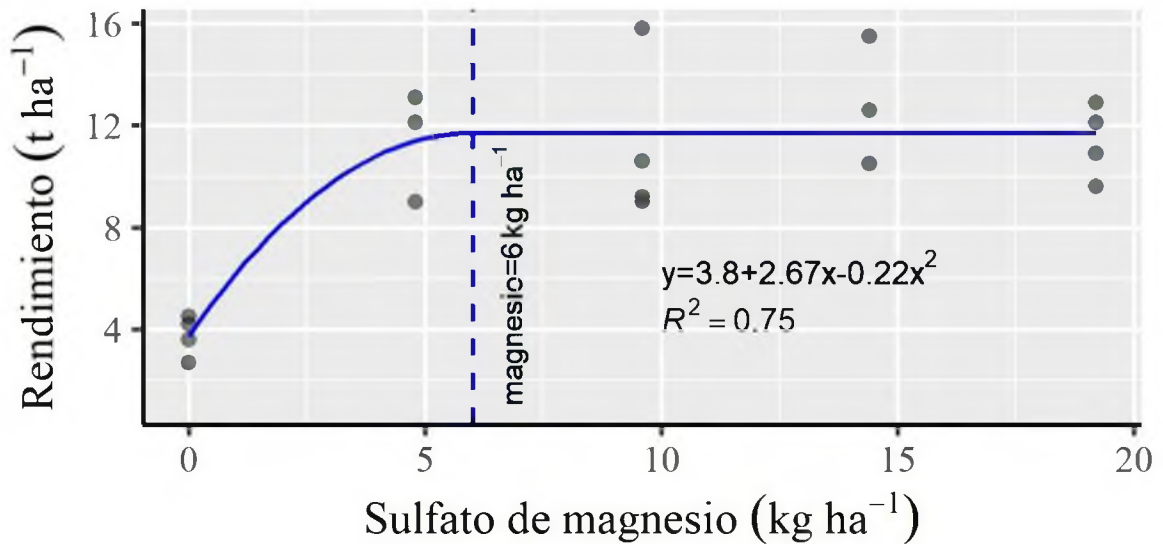


Figura 28. Gráfica de regresión cuadrática de meseta en el experimento de magnesio.

7.2.7 Calidad de frutos

7.2.7.1 Grados brix, pH, porcentaje de ácido cítrico y contenido de capsaicina

Los resultados obtenidos de grados brix en frutos (Figura 29A), destacaron que, en tamaño chico, los tratamientos 1, 2 y 3 mostraron una media superior a 1.4 con diferencias significativas con respecto al tratamiento 4 y testigo. En tamaño mediano, los tratamientos 2, 3 y testigo indicaron una media de 1.7 con diferencias significativas en comparación con los tratamientos 1 y 4. En frutos grandes, el tratamiento 1 alcanzó una media de 1.5 demostró diferencia significativa con los tratamientos 2 y 3.

El pH (Figura 29B) de los frutos en tamaño chico, los tratamientos 2 y 3 mostraron medias de 6.57 con diferencias significativas con los tratamientos 1 y 4. Por el contrario, en tamaño mediano no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos. En cambio, en tamaño grande, los tratamientos 1 y 2 alcanzaron medias de 6.50 con diferencias significativas con los tratamientos 3, 4 y testigo.

En relación con el porcentaje de ácido cítrico (Figura 29C), en tamaño chico, no se indicaron diferencias significativas entre los tratamientos de magnesio aplicados. Posteriormente, en tamaño mediano, el testigo mostró una media de 0.04 con diferencias significativas con respecto a los tratamientos 1 y 4. Sin embargo, en tamaño grande, los tratamientos 1 y 2 mostraron una media aproximada de 0.05 con diferencias significativas con respecto a los tratamientos 3, 4 y testigo. El contenido de capsaicina (Figura 29D), en tamaño chico, el tratamiento 3 mostró diferencia significativa con una media de 90 mg de capsaicina por cada gramo de peso seco con respecto a los demás tratamientos, en cambio, en tamaño mediano, no existió diferencia significativa entre los tratamientos. En tamaño grande, los tratamientos 1 y 2 alcanzaron una media de 80 mg de capsaicina por cada gramo de peso seco con diferencia significativa en comparación con los demás tratamientos.

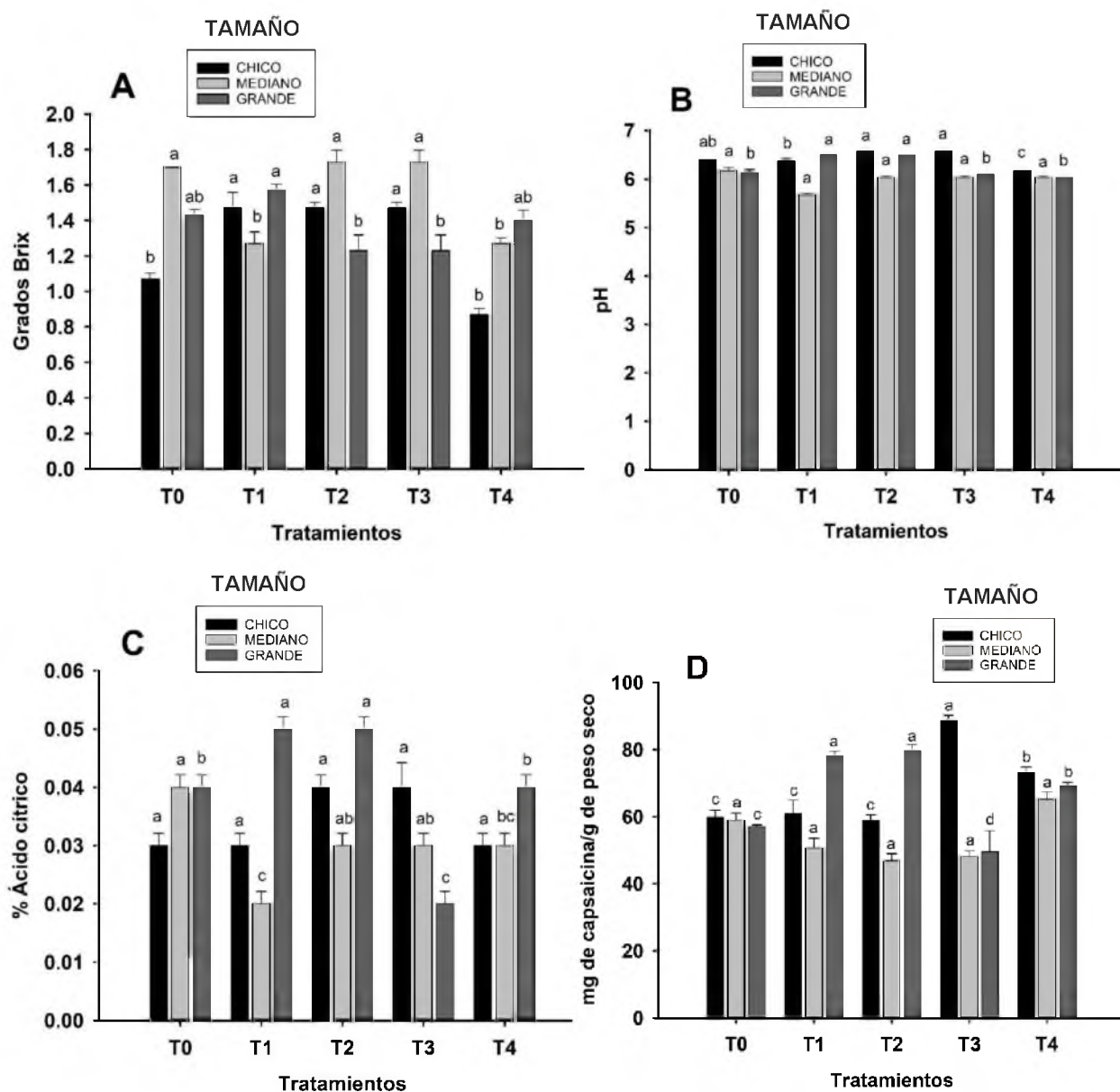


Figura 29. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre los grados brix (A), pH (B), % de ácido cítrico (C) y contenido de capsaicina (mg de capsaicina/g de peso seco) (D) en frutos de chile soledad de tamaño (chico, mediano, grande). T0= Testigo absoluto; T1=4.8 kg ha⁻¹; T2= 9.6 kg ha⁻¹; T3= 14.4 kg ha⁻¹; T4= 19.2 kg ha⁻¹. Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$).

7.2.7.2 Tamaño

En cuanto a las características de calidad física del fruto, la longitud del fruto (Figura 30A) en tamaño chico, se reveló que el tratamiento 1 y 3 mostró una media cercana a 6 cm con diferencia significativa con respecto al tratamiento 2 y testigo. En contraste, en tamaño mediano, los tratamientos 1, 3 y 4 fueron los que mostraron una media de 7 cm con diferencia significativa en comparación con el testigo. Aunque en frutos grandes, todos los tratamientos indicaron diferencia significativa con respecto al testigo, alcanzando medias entre 8.5 y 9 cm.

En lo que respecta al diámetro del fruto (Figura 30B), en tamaño chico, los tratamientos 2 y 3 indicaron una media aproximada de 8.5 mm con diferencias significativas respecto al testigo. En tamaño mediano, los tratamientos 3 y 4 mostraron medias de 12 mm, evidenciando diferencias significativas con el tratamiento 2 y testigo. Sin embargo, en tamaño grande, el tratamiento 1 mostró la media más alta de 13 cm con diferencias significativas entre el tratamiento 2 y testigo.

En relación al peso del fruto (Figura 30C) de tamaño chico, el tratamiento 3 mostró una media de 3 g, indicando diferencias significativas con el tratamiento 2 y testigo. En tamaño mediano, los tratamientos 3 y 4 destacaron una media de 6 g con diferencia significativa en comparación con los otros tratamientos. Sin embargo, en tamaño grande, los tratamientos 1 y 4 mostraron una media aproximada de 8 g evidenciando diferencias significativas.

Con respecto al grosor del pericarpio (Figura 30D), se indicó que en frutos chicos el tratamiento 3 mostró una media de 1.5 mm con diferencia significativa con los tratamientos 1, 4 y testigo, en contraste del tamaño mediano, no se indicaron diferencias significativas con ninguno de los tratamientos. En cuanto a frutos grandes, únicamente el tratamiento 1 mostró una media superior de 2.8 mm con diferencias significativas entre los tratamientos.

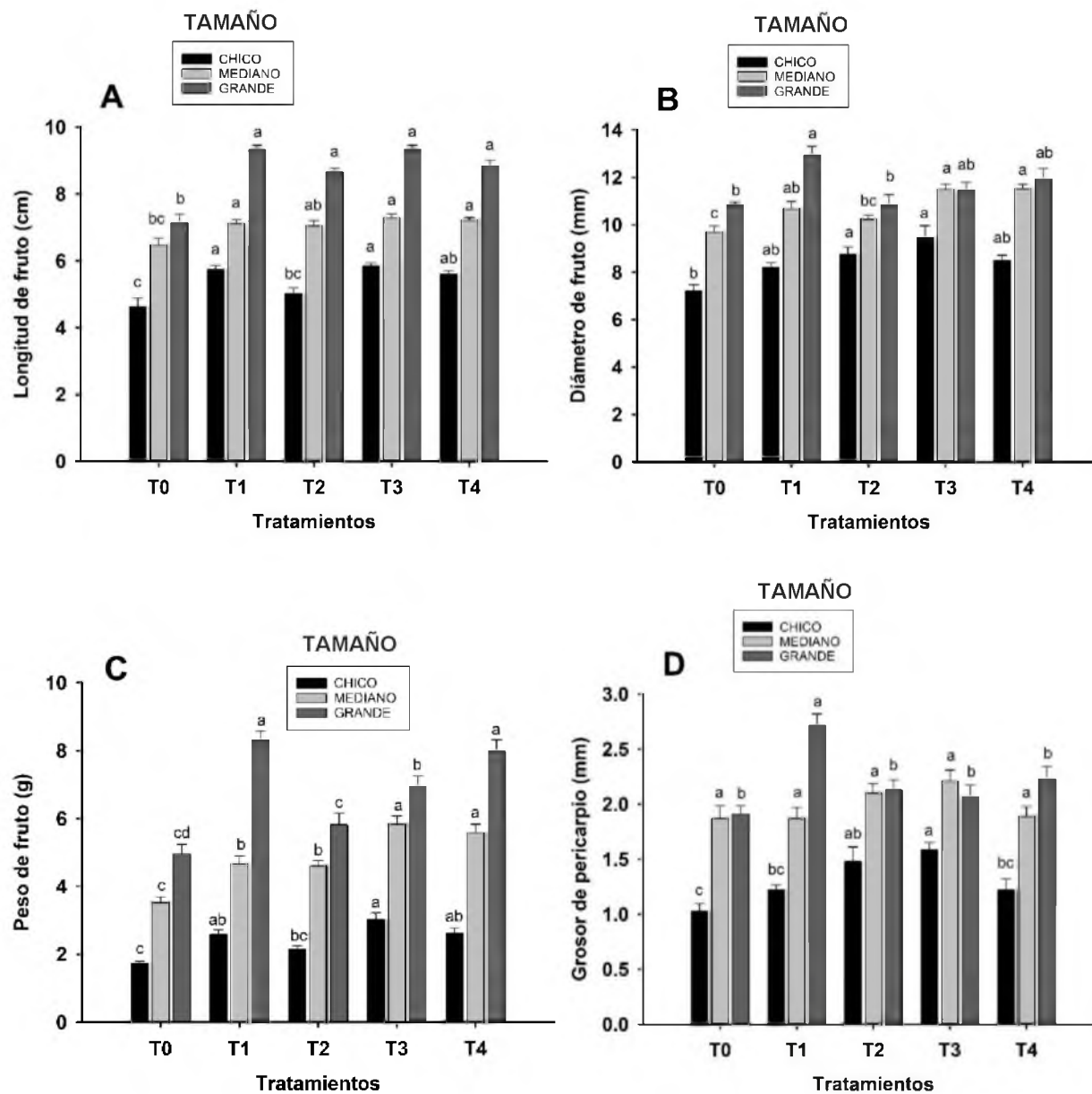


Figura 30. Efecto de los tratamientos de magnesio sobre la longitud de fruto (A), diámetro de fruto (B), peso de fruto (C) y grosor de pericarpio (D) en frutos de chile soledad de tamaño (chico, mediano, grande). T0= Testigo absoluto; T1=4.8 kg ha⁻¹; T2= 9.6 kg ha⁻¹; T3= 14.4 kg ha⁻¹; T4= 19.2 kg ha⁻¹. Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$).

8. DISCUSIÓN

8.1 Experimento de calcio

Los resultados obtenidos mostraron que todas las concentraciones de nitrato de calcio aplicadas de los 40 a 100 DDT, aumentaron el diámetro del tallo y altura de la planta con respecto al testigo. Además, aumentaron el área foliar a los 55, 85 y 100 DDT. Sin embargo, en número de frutos los tratamientos 1, 2 y 3 a los 55 DDT no indicaron diferencia significativa con respecto al testigo. Resultados obtenidos por Malik *et al.* (2020) establecen que las variables de altura, número de ramas y número de frutos de la planta aumentaron con la adición de Ca NO_3 al 0.2% de manera foliar respecto al testigo en cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* variedad Kashmir Long¹). Así como Ragab *et al.* (2021) menciona que existe un efecto del nitrato de calcio sobre el desarrollo y crecimiento vegetativo en *Capsicum annuum* L. donde a mayor nivel de nitrato de calcio (0.5 g L^{-1}) aumentó la altura y número de ramas en plantas durante las dos temporadas (2016-2017) mostrando diferencias significativas con el control. La adición de otras fuentes como cloruro de calcio foliar (20 mM) en cultivo de lechuga aumentó significativamente el área foliar pudiéndose deber a la acción del calcio sobre las propiedades estabilizadoras de la membrana foliar para un adecuado crecimiento (Youssef *et al.*, 2017).

En caso de grados brix no se observó una clara tendencia de las concentraciones de nitrato de calcio aplicadas, sin embargo, los tratamientos 1 y 4 a los 100 DDT aumentaron los grados brix de la savia, comparado con testigo. Al respecto, Hosseini *et al.* (2019), establecen que el contenido de azúcares solubles (glucosa, fructosa y sacarosa) en las hojas aumenta significativamente en plantas de remolacha bajo estrés por sequía seguida de la adición de calcio. Pudiéndose deber a un mecanismo de regulación de otros cationes como magnesio y silicio en hojas dando como resultado un mejoramiento del metabolismo del azúcar, así como un posible ajuste osmótico por parte de calcio aumentando la relación Na/K.

En relación con los nutrientes en la savia, el tratamiento 4 de los 40 hasta los 85 DDT aumentó el contenido de nitratos. Contrariamente, los tratamientos 1, 2 y 4 redujeron el contenido de fosfatos comparado con el testigo, de los 40 hasta 85 DDT. En cambio, el tratamiento 2, de los 40 a los 100 DDT (excepto 70 DDT) redujo el contenido de potasio comparado con el testigo, ya que el resto de los tratamientos no indicaron una tendencia clara de disminución. Según Ahmadi y Sourí (2019) indican que la aplicación foliar de nitrato de calcio aumentó significativamente la concentración de N y Ca en las hojas de las plantas de pimiento que en las del control. En plantas tratadas con cloruro de calcio, disminuyó el porcentaje de potasio y fósforo. Otros autores indicaron que, en tratamientos adicionados al suelo con nitrato de calcio, los nutrientes en hojas como fósforo, potasio y calcio indicaron un aumento significativo con respecto al tratamiento que no incluía calcio (Vasconcelos *et al.*, 2020). Del mismo modo en pimiento dulce las plantas que fueron tratadas con la dosis más alta de calcio quelado obtuvieron valores significativamente más altos en nitrógeno y calcio en las hojas (Al-Salman y Abdulla, 2023). Cabe mencionar que Swelam y El-Basir (2021) evaluaron el efecto de nitrato de calcio sobre el contenido de nutrientes (N, P, K y Ca) en hojas de pimiento amarillo durante dos temporadas (2019-2020), obteniendo un porcentaje de 3.79-3.78 de nitrógeno, 0.76-0.75 de fósforo, 1.83-1.82 de potasio y 2.20-2.24 de calcio todos con diferencias significativas con respecto al control. Comportamiento semejante en el contenido de nitratos y calcio, pero difiriendo de lo alcanzado en fosfatos ya que el testigo mostró las medias más altas con diferencias significativas con respecto a los demás tratamientos con calcio. La absorción de calcio y fosfato ocurre de manera simultánea, por lo que una mayor acumulación iones de calcio en la superficie de las raíces pudo provocar una precipitación química de fosfatos limitando su absorción (Swelam y El-Basir 2021).

Con respecto a la solución del suelo, el tratamiento 4 aumentó el contenido de nitratos (40, 55 y 85 DDT), el contenido de fosfatos (40, 55 y 100 DDT), el contenido de potasio (55, 70 y 85 DDT) y el contenido de calcio (40, 55, 85 y 100 DDT) con respecto al testigo.

El incremento de nitratos se debió a que se utilizó nitrato de calcio como fuente de fertilizante. De manera similar el nitrato de calcio mejoró la disponibilidad de fosfatos debido al aumento de pH en la solución del suelo (Gahoonia *et al.*, 1992) como se mostró a los 55 y 100 DDT. Por otro lado, Vasconcelos *et al.* (2020) reportan que los tratamientos que fueron adicionados con calcio tuvieron de la muestra directa del suelo un aumento en el contenido de potasio y calcio (0.40-5.05 cmol_c dm⁻³). Esto demuestra que no se afectó la relación Ca/K en la solución del suelo.

Los cloroplastos presentes en las hojas de las plantas están conformados por pigmentos fotosintéticos, los cuales contienen una serie de clorofilas (a y b) (Fernández-Marín *et al.*, 2018). Las clorofilas están directamente relacionadas con la nutrición durante las diferentes fases de desarrollo del cultivo (Xiaoyan *et al.*, 2020). En cuanto a la clorofila a, los tratamientos 1 y 3 (70 DDT) y el tratamiento 4 (55 y 85 DDT) y en clorofila b, el tratamiento 1 (100 DDT), mostraron los niveles más altos comparado con testigo, a diferencia de la clorofila total, el tratamiento 1 indicó los niveles más altos a los 70 y 100 DDT con respecto al testigo. Otros resultados coinciden con que una fuente adicionada de calcio (Ca quelado, Ca y complejo B, nitrato de Ca, superfosfato de Ca, sulfato de Ca) tienen efecto significativo respecto al control sobre parámetros de crecimiento en pimiento amarillo (*Capsicum annuum* L.). Ya que se cree que estimulan mediante síntesis y traslocación de foto asimilados el contenido y asimilación de nutrientes, elevando el contenido de pigmentos fotosintéticos (Clorofilas) (Swelam y El-Basir, 2021). Por su parte, Vasconcelos *et al.* (2020) reportan que la adición de nitrato de calcio en frijol aumentó el contenido de clorofila total en comparación con el tratamiento que no lo incluye por lo que se puede deber al potencial del nitrato de calcio para mitigar los efectos de la deficiencia de calcio y estabilizar el espesor de la lámina foliar.

En el presente estudio se apreció que tanto en peso fresco y seco de frutos y raíz no existió diferencia significativa entre todos los tratamientos incluyendo al testigo. En cambio, todos los tratamientos mostraron diferencia en peso y de tallos y hojas a los 150 DDT comparado con el testigo.

Concordando con lo obtenido por Díaz y Hook (2017) donde no existió efecto significativo en plantas de *Capsicum annuum* fertirrigadas con calcio (180 kg ha^{-1}) a los tratamientos en el peso fresco del fruto ($134\text{-}134 \text{ g/fruto}$), peso seco de fruto ($5.8\text{-}5.7 \%$), biomasa de fruto ($10.5\text{-}10.7 \text{ g/planta}$). Pero si la hubo en el peso fresco de la planta ($170\text{-}163 \text{ g}$). La aplicación de cloruro de calcio en combinación con ácido bórico (400 y 2000 ppm respectivamente) en plantas de *Capsicum annuum* L. generó diferencias significativas con respecto al control y elevaciones en los pesos secos y frescos (Salim *et al.*, 2019). Por otra parte, Vasconcelos *et al.* (2020) observaron disminuciones significativas en la biomasa de hojas, tallos y raíces sin calcio en sus tratamientos a comparación de la integración de calcio. En pimiento Rubio *et al.* (2009) realizaron 3 aplicaciones de calcio (0.2, 2.7 y 17 mM) y la mayor biomasa total (3 kg planta^{-1}) fue con el menor contenido de calcio, sin embargo, en peso fresco de frutos (g) no tuvo diferencias significativas con las dosis 2, 4 y 8 mM, pero si con fue significativamente diferente con la dosis mínima de 0.2 mM.

En este estudio se demostró un valor crítico de 11 kg ha^{-1} de nitrato de calcio para alcanzar un rendimiento máximo de 10 t ha^{-1} (Figura 13). Los rendimientos alcanzados mostraron que existió aumento significativo superior a 10 t ha^{-1} y hasta 450 g por planta.

En experimentos con *Capsicum annuum* L. cv. Rani que incluyen la aplicación de calcio fueron significativamente diferentes a los tratamientos con otros fertilizantes sulfurados o que contienen molibdeno, sin embargo, cabe mencionar que también la interacción con otros nutrientes como zinc y magnesio se alcanzaron rendimientos de 2403.93 g/planta y 711.56 q/ha para zinc y 2305.94 g/planta y 682.55 q/ha para magnesio pudiéndose atribuir a una interacción positiva entre Ca-Zn y Ca-Mg (Dwivedi *et al.*, 2023). Así mismo Malik *et al.* (2020) menciona que la aplicación foliar con nitrato de calcio al 2% aumentó el rendimiento de peso seco en frutos (46.6 q/ha) en *Capsicum annuum* variedad Kashmir Long¹ con respecto al testigo. La suplementación con nitrato de calcio en *Capsicum annuum* L. obtuvo un rendimiento de 5.62 kg m^2 con diferencia significativa con respecto al control.

Según Díaz y Hook (2017) en plantas de *Capsicum annuum* fertilizadas con calcio (riego) mostraron diferencias significativas en el rendimiento total (654-605 g/planta) con respecto al testigo.

Con respecto a la calidad de frutos, los valores de grados brix y mg de capsaicina obtenidos en el presente estudio muestran que existió aumento significativo en el tratamiento 2 en tamaño mediano y grande, así como en porcentaje de ácido cítrico fue el tratamiento 3 en tamaño chico y grande. Diferente al pH donde no existió un comportamiento claro entre todos los tratamientos. En pimiento se realizaron ensayos con 3 dosis de calcio (0.2, 2.7 y 17 mM) y obtuvieron mayor °Brix en el tratamiento con menor dosis de calcio 0.2 Mm, sin embargo, para la acidez (g ácido cítrico/ 100 mL de jugo) en frutos no hubo diferencia significativa. Proponiendo que deben mantener un nivel adecuado de calcio ya que es un factor crítico que mejora parámetros de calidad en frutos (Rubio *et al.*, 2009).

El calcio es de gran importancia ya que no solo mejora las características del cultivo de pimiento amarillo (*Capsicum annuum* L.) si no también el porcentaje de acidez, los sólidos solubles totales (TSS%) y biomasa total (Swelam y El-Basir, 2021). Un factor de interés en la obtención de capsaicina es el tipo de fertilización empleada como lo menciona Ramírez *et al.* (2009) que establecen que la prohexadiona de calcio (100 mg L^{-1}) aumenta sustancialmente el contenido de capsaicina en chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) con una obtención de hasta 60 mg L^{-1} de capsaicina. Siendo tal vez por el efecto precursor del crecimiento vegetativo del calcio y la acción del calcio como segundo mensajero, así mismo en chile habanero bajo tratamientos de estrés hídrico (riego cada 7 días), aumentó significativamente la concentración de capsaicina (16 mg g de peso seco) con respecto al control (60 mg g de peso seco), cabe mencionar que la especie *Capsicum chinense* tiene mayor contenido de capsaicina que *Capsicum annuum* L. (Ruíz-Lau *et al.*, 2011).

Es importante mencionar que otros factores abióticos como el estrés salino tienen un aumento significativo en la cantidad de capsaicina 15.72 mg/g de peso seco fertilizado con el nivel más bajo de nitrato de calcio (60 mg/kg) que con nivel más alto de calcio (120 mg/kg) fue de 13.26 mg/g de peso seco (Akladious y Mohamed 2018).

En cuanto a la longitud de fruto (mm) en tamaño grande, todos los tratamientos fueron estadísticamente diferentes al testigo, para el diámetro de fruto (mm) solo en tamaño mediano existió diferencia con el tratamiento 1 y en tamaño grande el tratamiento 1 y 2 fueron estadísticamente diferentes al testigo. En cambio, para el grosor de pericarpio no hubo diferencias significativas de todos los tratamientos con respecto al control. Otros autores establecen que existió diferencia significativa con la fertilización de nitrato de calcio al 2% en *Capsicum annuum* L. en dos ciclos agrícolas (2017-2018) en peso medio de fruto (5.10-5.14 g), longitud de frutos (7.88-8.04 cm) y ancho de fruto (0.88-0.91 cm), generando aumentos en el número, peso y diámetro de frutos comparado con testigo (Malik *et al.*, 2020).

8.2 Experimento de magnesio

El magnesio (Mg) es un macronutriente importante para las plantas ya que interviene en diversos procesos fisiológicos y bioquímicos. Este nutriente influye sobre la síntesis de clorofila, generación, transporte y manejo de fotoasimilados, así como la síntesis y movilización de proteínas y enzimas (Ishfaq *et al.*, 2022). En el presente estudio se evaluaron 4 tratamientos en chile soledad (*Capsicum annuum* L. variedad CHISER-522), que contenían diferentes dosis de sulfato de magnesio (T1=4.8 kg ha⁻¹; T2= 9.6 kg ha⁻¹; T3= 14.4 kg ha⁻¹; T4= 19.2 kg ha⁻¹). En esta investigación se demostró que los tratamientos 3 y 4 en la mayoría de las mediciones (40 a 100 DDT) aumentaron variables de crecimiento como diámetro del tallo, altura de planta y número de frutos, sin embargo, el tratamiento 2 aumentó el área foliar. Según Harris *et al.* (2018), la aplicación foliar de sulfato de magnesio a 100 y 150 ppm en cultivo de Pimiento (*Capsicum annuum* L.) generó un aumento significativo en variables de crecimiento como altura de la planta y número de hojas

a las 4, 5 y 7 semanas después del trasplante, así como el número de frutos por planta a diferencia del testigo. De manera similar, Gokul *et al.* (2020) realizó la aplicación foliar de sulfato de magnesio al 2% en combinación con biofertilizantes (*Azospirillum* y *Phosphobacteria*) y reportan que mejoró significativamente la altura de la planta y el índice de área foliar con respecto al testigo.

En otro estudio, evaluaron tratamientos en maíz (*Zea mays*) que tuvieron en su composición magnesio adicionada con triple fosfato los cuales mostraron diferencias significativas con el control en cuanto a la altura de la planta, esto pudiera deberse a que el magnesio actúa como un activar enzimático para unir ADT y ATP que genera energía necesaria para el crecimiento de la planta (Nardis *et al.*, 2021).

En este estudio, de las variables evaluadas en savia, el tratamiento 4 aumentó en al menos dos mediciones el nivel de nitratos (40 y 70 DDT), fosfatos (55 y 100 DDT) y magnesio (55, 70 y 85 DDT). En cambio, el tratamiento 3 incrementó el contenido de potasio (55 y 85 DDT). Gokul *et al.* (2020) mencionan que la aplicación foliar de magnesio mejoró el contenido de nutrientes como calcio, magnesio, potasio y fósforo. Aquí también se demostró que el tratamiento 4 presentó menor grados brix en la savia de la hoja (70, 85 y 100 DDT) comparado con el testigo. El Mg es decisivo en el transporte de carbohidratos desde la fuente hasta el sumidero, lo que concierne que la deficiencia de Mg va a generar la acumulación de azúcares en las hojas fuente (Peng *et al.*, 2015, 2018). Tal comportamiento sucedió en el contenido de grados brix donde el testigo mostró medias máximas con diferencias significativas con el tratamiento 4 que contenía mayor proporción de magnesio. De modo que el magnesio va a mejorar el transporte de azúcares desde el floema durante el periodo de crecimiento, reduciendo con ello el acopiamiento de azúcares solubles como fructosa, glucosa y sacarosa en las hojas (Jiao *et al.*, 2023).

Con respecto a la solución del suelo, el tratamiento 1 generó los niveles más altos de conductividad eléctrica (40 y 70 DDT) que el tratamiento 4. En cambio, el testigo mostró un aumento de pH (40, 55, 70 y 100 DDT) comparado con todos los tratamientos. De los nutrientes evaluados, el tratamiento 4 mostró el contenido más

alto de nitratos (40, 55, 70 y 100 DDT) y magnesio (40 hasta los 100 DDT) con respecto al testigo. Sin embargo, el tratamiento 3 indicó aumentos en el contenido de fosfatos (55, 70 y 85 DDT) y el tratamiento 2 en potasio (85 y 100 DDT) comparado con el testigo.

Zhang *et al.* (2022) establecen que los fertilizantes de magnesio de liberación rápida tuvieron características ácidas, con un rango de pH de 5.58 a 5.95, el pH promedio del suelo (capa 0 a 20 cm) fertilizado con cloruro de magnesio, nitrato de magnesio y sulfato de magnesio (liberación rápida) fue de 4.5, 4.7 y 4.8 respectivamente. Otros autores indican que la deficiencia de Mg puede elevarse sobre todo por un mayor agotamiento del magnesio intercambiable en el suelo (Ex-Mg) (Ishfaq *et al.*, 2022). El comportamiento de un mayor contenido de magnesio en los tratamientos también aumentó el de nitratos presentes en la solución del suelo.

Así como Poglodziński *et al.* (2021) mencionan el ajuste en la fertilización con sulfato de magnesio, es necesario para mejorar administración del nitrógeno en el suelo. El orden en el que están aprovechables los cationes intercambiables en suelo es primero calcio, magnesio, potasio y sodio, lo que es importante para tomar en cuenta la cantidad de magnesio presente como nutriente crucial que va a controlar la disponibilidad de potasio. Existe la posibilidad de que el potasio por sí solo que se encuentre de forma intercambiable en el suelo, no esté disponible en sitios con una elevada concentración de magnesio intercambiable (Laekemariam *et al.*, 2018). Como claramente se expresa en los resultados obtenidos el contenido de potasio en hojas no se vio afectado por la fertilización con magnesio debido a que las concentraciones aplicadas de magnesio no provocaron afectaciones en las de potasio, ya que no existió diferencia significativa entre los tratamientos con respecto al testigo.

Los compuestos que atraen la energía de los fotones y la llevan a los sitios de reacción (P680 y P700), tales como clorofilas y ficobilinas se denominan pigmentos fotosintéticos (Simkin *et al.*, 2022; Shevela *et al.*, 2021).

En este estudio se demostró que el tratamiento 1 aumentó el contenido de clorofilas (a, b y total) a los 70 DDT, y el tratamiento 2 aumentó las clorofilas b y total a los 100 DDT. Nuestros resultados coinciden con lo obtenido por Kibria *et al.* (2021), en cultivo de trigo donde la aplicación de 20 mg kg de magnesio al suelo aumentaron un 10% el contenido de clorofilas. Se encontró que los tratamientos 3 y 4 presentaron menor contenido de clorofila total a los 40 y 55 DDT con respecto al testigo. Como Sharma *et al.* (2020) menciona que las plantas que son sometidas a estrés abiótico, van a tener afectaciones directas sobre la eficiencia fotosintética del cultivo, reducción de la biosíntesis de clorofilas, mecanismos de transporte de electrones y la interacción de los fotosistemas. Esto también se puede deber a un segundo nutriente presente como el potasio ya que existe una influencia significativa importante entre esta interacción que va a requerir modificaciones en sus dosis para un mejor comportamiento sinérgico entre ambos (Ding *et al.*, 2006). Ya que la nutrición con potasio y magnesio van a generar modificaciones en el transporte de electrones fotosintéticos (osmóticamente activos) (Xie *et al.*, 2021).

Con respecto a la biomasa fresca y seca, el tratamiento 1 aumentó el peso fresco y seco fruto a los 85 y 150 DDT, de manera similar, se mostró un aumento significativo en peso fresco y seco de la raíz, únicamente a los 150 DDT.

En la biomasa de tallo y hojas, el tratamiento 4 aumentó en peso fresco a los 85 DDT y el tratamiento 3 en peso seco, sin embargo, en el tratamiento 1 aumentó el peso fresco y seco a los 150 DDT. Así como lo establece Peng *et al.*, (2018), el suelo que contenga suficiente magnesio genera un aumento en la producción de biomasa seca en la planta con respecto a suelos deficientes. Los fertilizantes de liberación rápida (MgSO₄) mostraron un efecto considerable en la generación de biomasa seca tanto en raíces, tallos, hojas, así como biomasa total en comparación de la no aplicación de magnesio al cultivo de soya (Zhang *et al.*, 2022). Es decir que no por adicionar más magnesio a la planta se obtendrá mayor biomasa, de la misma manera que ocurrió con Harris *et al.* (2018) donde el peso fresco de los frutos de chile verde (*Capsicum annuum* L.) aumentó en plantas fertilizadas con magnesio comparado con el testigo.

Lo obtenido en el presente estudio muestra que existió diferencia significativa entre en todas las dosis de magnesio aplicadas, que mejoraron el rendimiento comparado con el testigo (Figura 26). Tal resultado coincide con Lu *et al.*, (2021) en *Capsicum annuum* L., donde la aplicación de Mg al suelo (112.5 kg ha^{-1}) aumentó significativamente el rendimiento (39.7 t ha^{-1}). Sin embargo, nuestros resultados también indicaron que entre las dosis de magnesio aplicadas no existió diferencia significativa. Esto concuerda con lo reportado por Lozano-Fernández *et al.*, (2018), quienes establecen que no existió diferencia significativa entre los cuatro tratamientos aplicados a pimiento morrón cultivar Nathalie que contenían diferentes dosis de MgO (90, 60, 40 y 25 kg ha^{-1}), alcanzando rendimientos entre 50 y 70 t ha^{-1} . Por lo que adicionar más fertilizantes de magnesio del requerido al suelo no va a garantizar un aumento en los rendimientos y por tanto generará problemáticas por degradación en los suelos, así como aumentos en costos de producción.

En este estudio se demostró un valor crítico de 6 kg ha^{-1} para alcanzar un rendimiento máximo de 12 t ha^{-1} (Figura 27). Cabe mencionar que la concentración crítica de nutrientes del suelo es un resultado donde el rendimiento puede llegar hasta un 100 % del rendimiento máximo del cultivo (Martens *et al.*, 2020; Nachimuthu *et al.*, 2022). Para generar estrategias de un manejo eficiente de nutrientes en cultivos es necesario conocer el valor crítico en la cual las concentraciones de nutrientes en el suelo, deben mantenerse en los rangos óptimos para una mayor productividad en el área de experimentación, sin generar afectaciones al cultivo (Bai *et al.*, 2013; Kamireddy *et al.*, 2023; Soratto *et al.*, 2023).

Cabe mencionar que se deben considerar los valores críticos de nutrientes de forma independiente para la obtención de un rendimiento óptimo en las plantas ya que puede que exista alguna relación de sinergismo o antagonismo entre ellos que genere co-limitaciones entre nutrientes, como magnesio y fósforo por dar un ejemplo (Weih *et al.*, 2021). Para analizar estrategias de fertilización se requiere cuantificar la demanda de magnesio para cultivos en específico que alcancen el rendimiento óptimo de las plantas (Hauer-Jákli y Tränkner, 2019; Wang *et al.*, 2020;

Ishfaq *et al.*, 2022). Por ejemplo, Riga y Anza (2003) determinaron el valor crítico de magnesio con base a la biomasa seca de raíces en pimiento (*Capsicum annuum* L.) donde hubo un efecto significativo con el peso seco total. Sin embargo, en otros cultivos como tomate se aplicó 12 kg ha⁻¹ de magnesio el cual mejoró la cantidad, calidad y economía del cultivo, donde el análisis de regresión mostró que la aplicación de 11.3 kg ha⁻¹ de magnesio podría ser óptima para mejorar el rendimiento del cultivo. Cabe mencionar que recientemente se está usando el paquete “Soiltestcorr” (Correndo *et al.*, 2023) para calcular las dosis críticas de fertilización con magnesio en la obtención de un mayor rendimiento (Quddus *et al.*, 2022).

En cuanto a la calidad de fruto, el tratamiento 1 mostró un aumento en el contenido de °Brix en frutos de tamaño chico y grande, de manera similar, los tratamientos 2 y 3 en tamaño chico y mediano fueron los que aumentaron los °Brix. Cuando se incluye magnesio (3%) a la fertilización provoca un aumento de sólidos solubles totales en los frutos (°Brix) (Chatzistathis *et al.*, 2022). El magnesio contribuye a optimizar el acarreo de azúcares, ya que cuando el cultivo tiene escasos de magnesio, la síntesis de sacáridos como la sacarosa va a disminuir en las hojas y el transporte hacia el floema se va a limitar ocasionando la reducción en la calidad y rendimiento de la fruta (Jiao *et al.*, 2023).

Por otro lado, el tratamiento 4 disminuyó el pH en frutos chicos y el porcentaje de ácido cítrico en frutos de tamaño mediano y grande. En cambio, los tratamientos 1 y 2 aumentaron tanto pH, porcentaje de ácido cítrico como contenido de capsaicina en frutos grandes. Sin embargo, en tamaño chico, el tratamiento 3 aumentó el contenido de capsaicina. Esto probablemente se debe a que las dosis altas de magnesio en la planta ocasionan dificultades en la metabolómica del fruto, ya que la presencia de ácidos fumárico, málico, cítrico y glutámico se reducen y van a ser los que definen el sabor del fruto. De esta manera, el elevado suministro de magnesio va a ocasionar que los metabolitos se dirijan desde las hojas fuentes a sumideros sin tomar en cuenta a los frutos, ocasionando problemas de desarrollo y calidad (Kwon *et al.*, 2019).

Cabe mencionar que el papel de la fertilización con magnesio en la obtención de capsaicina es menor debido a que disminuye las concentraciones de calcio, zinc y vitamina C en frutos de pimiento *Capsicum annuum* L., sin embargo, en comparación con el control, la fertilización con magnesio aumentó las concentraciones de magnesio y capsaicinoides (Lu *et al.*, 2021).

En cuanto al tamaño de frutos destacan los tratamientos 1 y 3 en todos los tamaños evaluados, mostrando un aumento en la longitud del fruto. En adición, el tratamiento 3 aumentó el diámetro y peso del fruto en tamaño chico y mediano. Mientras que el tratamiento 1 aumentó diámetro, grosor y peso del fruto en tamaño grande. Algunos autores establecen que el magnesio mejora la traslocación de fotosintatos en órganos fuente (hojas) a sumidero (frutos) (Jiao *et al.*, 2023; Gerendás y Führs 2013). Por lo que tiene relación con lo obtenido en la presente investigación donde tratamientos con magnesio mejoraron las características morfológicas de los frutos a diferencia del testigo. Así mismo, Quddus *et al.* (2021) establecen que la dosis más alta aplicada de magnesio mejoró características de calidad como longitud de fruto.

9. CONCLUSIONES

La aplicación de nitrato de calcio aumentó el diámetro del tallo, área foliar, altura de planta y número de frutos. En savia mejoró el contenido de nitratos y calcio, pero redujo fosfatos y no mostró una clara tendencia en grados brix y potasio. En la solución del suelo no se visualizó un comportamiento conciso del pH, a diferencia de nutrientes como nitratos, fosfatos y potasio que aumentaron. La biomasa no mostró un efecto significativo en peso fresco y seco de frutos y raíz, solo se elevó el peso seco en tallo y hojas. Alcanzándose con el tratamiento 4 un rendimiento de 11 t ha⁻¹ y una concentración crítica de 11 kg ha⁻¹ de nitrato de calcio. Finalmente, en la calidad de fruto el calcio indicó un aumento de grados brix y capsaicina.

La aplicación de sulfato de magnesio al suelo mejoró las características de crecimiento como diámetro del tallo y número de frutos, aumentando el contenido de nitratos, fosfatos y magnesio en savia, sin embargo, no se indicó un efecto significativo en área foliar, contenido de potasio y pH. Respecto a la solución del suelo elevó el contenido de nitratos y magnesio, a diferencia de potasio y fosfatos los redujo. El magnesio va a influir directamente sobre los pigmentos fotosintéticos ya que la molécula de clorofila está constituida por dicho elemento, en cambio, no se mostró una tendencia precisa de comportamiento. La biomasa tanto en peso fresco y seco en fruto, tallo y hojas de la planta aumentó con la aplicación de magnesio. El tratamiento 3 alcanzó un rendimiento de 14 t ha⁻¹ y una concentración crítica de 6 kg ha⁻¹ de sulfato de magnesio. El magnesio evidenció aumentos en calidad de fruto como longitud, diámetro, peso, grosor de pericarpio y capsaicina. En conclusión, el calcio y el magnesio son nutrientes esenciales para las plantas por lo que es necesario conocer la concentración crítica de cada elemento para obtener el máximo rendimiento en cultivo de chile soledad variedad CHISER-522. Con ello evitar en mayor medida la degradación y contaminación de suelos y mantos freáticos. Además, estos nutrientes mejoran la calidad del fruto de chile soledad.

10. LITERATURA CITADA

- Aguilar-Meléndez, A., Vásquez-Dávila, M. A., Manzanero-Medina, G. I. y Katz, E. (2021). Chile (*Capsicum* spp.) as food-medicine continuum in multiethnic Mexico. *Foods*, 10(10), 2502.
- Aguilar-Rincón, V. H., Corona-Torres, T., López-López, P., Latournerie-Moreno, L., Ramírez-Meraz, M., Villalón-Mendoza, H. y Aguilar-Castillo, J. A. (2010). Los chiles de México y su distribución. SINAREFI, Colegio de Postgraduados, INIFAP, ITConkal, UANL, UAN. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 114 p.
- Aguirre, E. y Muñoz, V. (2015). El chile como alimento. *Revista de la Academia Mexicana de Ciencias*, 66(3).
- Ahmadi, M. y Soury, M. K. (2019). Nutrient uptake, proline content and antioxidant enzymes activity of pepper (*Capsicum annuum* L.) under higher electrical conductivity of nutrient solution created by nitrate or chloride salts of potassium and calcium. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 18(5), 113-122.
- Akladios, S., A. y Mohamed, H., I. (2018). Ameliorative effects of calcium nitrate and humic acid on the growth, yield component and biochemical attribute of pepper (*Capsicum annuum*) plants grown under salt stress. *Scientia Horticulturae*, 236(1), 244-250. Doi:10.1016/j.scienta.2018.03.047.
- Alfonso-García, J. M., Santos-Chávez, A., Hernández-Hernández, H., Palacios-Torres, R., Ramírez-Seañez, A. R. y Cruz-Pablo, B. (2019). Daño de *Liriomyza trifolii* (diptera: agromyzidae) en genotipos de chile soledad (*Capsicum annuum* L.). *Entomología Mexicana*, 6: 308-313.
- Al-Salman, M. A. A. W. y Abdulla, A. A. (2023). Effect of calcium foliar spraying and seedling age on the chemical components of leaves and fruits of *Capsicum annuum* L., grown in unheated greenhouses. *Euphrates Journal of Agricultural Science*, 1(15).

- Álvarez-Herrera, J. G., Vélez, J. E. y Jaime-Guerrero, M. (2022). Characterization of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) fruits from plants irrigated with different regimens and calcium doses. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 16(1), e13269-e13269.
- Azcón-Bieto y Talón, M. (2013). *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. McGraw-Hill Interamericana.
- Azofeifa, Á. y Moreira, M. A. (2005). Absorción y distribución de nutrimentos en plantas de chile dulce (*Capsicum annuum* CV. UCR 589) en Alajuela, Costa Rica. *Agronomía costarricense: Revista de Ciencias Agrícolas*, 29(1), 77-84.
- Azofeifa, A. y Moreira, M. A. (2008). Absorción y distribución de nutrimentos en plantas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L. cv. Hot) en Alajuela, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 32(1), 19-29.
- Baenas, N., Belović, M., Ilic, N., Moreno, D. A. y García-Viguera, C. (2019). Industrial use of pepper (*Capsicum annuum* L.) derived products: Technological benefits and biological advantages. *Food chemistry*, 274, 872-885.
- Bai, Z., Li, H., Yang, X., Zhou, B., Shi, X., Wang, B. y Zhang, F. (2013). The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types. *Plant and Soil*, 372, 27-37.
- Barry, C. S. (2009). The stay-green revolution: Recent progress in deciphering the mechanisms of chlorophyll degradation in higher plants. *Plant Science*, 176(3), 325-333.
- Bidwell, R. G. S. (1979). *Fisiología vegetal*. Primera edición en español. Editorial AGT México, DF, México.
- Bobadilla-Larios, V., Esparza-Ibarra, E., Delgadillo-Ruiz, L., Gallegos-Flores, P. y Ayala-Lujan, J. L. (2017). Chili varieties (*Capsicum annuum* L.) identified

- using RAPD markers. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 20(3), 465-473
- Buczowska, H., Michalojc, Z. y Nurzynska-Wierdak, R. (2016). Yield and fruit quality of sweet pepper depending on foliar application of calcium. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 40, 222-228. Doi:10.3906/tar-1501-56.
- Cakmak, I. y Yazici, A. M. (2010). Magnesio: un elemento olvidado en la producción de cultivos. *Mejores cosechas*, 94 (2), 23-25.
- Cázares-Sánchez, E., Ramírez-Vallejo, P., Castillo-González, F., Soto-Hernández, RM, Rodríguez-González, M., T. y Chávez-Servia, J., L. (2005). Capsaicinoids and use preference in different morphotypes of chili (*Capsicum annuum* L.) from central-eastern Yucatan. *Agroscience*. 627-638.
- Chaires-Grijalva, M. P., Antonio-Luis, M. C., Palacios-Torres, R. E., Hernández-Hernández, H., Castañeda-Vildozola, Á., Valenzuela-Escoboza, F. A. y López-Martínez, G. (2021). New records of pepper weevil parasitoids and their natural parasitism in Loma Bonita, Oaxaca. *Southwestern Entomologist*, 45(4), 979-984.
- Chatzistathis, T., Tsaniklidis, G., Papaioannou, A., Giannakoula, A. y Koukounaras, A. (2022). Comparative approach on the effects of soil amendments and controlled-release fertilizer application on the growth, nutrient uptake, physiological performance and fruit quality of pepper (*Capsicum annuum* L.) Plants. *Agronomy*, 12(8), 1935.
- Chiquini-Medina, R. A., Castillo-Aguilar, C. L. C., López-Castilla, L. C. y Quej-Chi, V. H. (2019). Varietal characterization of habanero chili (*Capsicum chinense* Jacq.) var. Rosita. *Agro Productivity*, 12(4), 61-66. Doi.org/10.32854/agrop.v0i0.543.
- Correndo, A. A., Pearce, A., Bolster, C. H., Spargo, J. T., Osmond, D. y Ciampitti, I. A. (2023). The soiltestcorr R package: An accessible framework for

reproducible correlation analysis of crop yield and soil test data. *SoftwareX*, 21, 101275.

Cruz-Crespo, E., Can-Chulim, A., Bugarín-Montoya, R., Pineda-Pineda, J., Flores-Canales, R., Juárez-López, P, y Alejo-Santiago, G. (2014). Concentración nutrimental foliar y crecimiento de chile serrano en función de la solución nutritiva y el sustrato. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37(3), 289-295.

Díaz, P. J. C. y Hook, J. E. (2017). Plastic-mulched bell pepper (*Capsicum annuum* L.) plant growth and fruit yield and quality as influenced by irrigation rate and calcium fertilization. *HortScience*, 52(5), 774-781.

Ding, Y., Luo, W. y Xu, G. (2006). Characterisation of magnesium nutrition and interaction of magnesium and potassium in rice. *Annals of Applied Biology*, 149(2), 111-123.

Dirección General de la población de Oaxaca (DIGEPO). (2015). Libro demográfico. Estadística Información. Disponible en http://www.digepo.oaxaca.gob.mx/recursos/info_pdf/Loma%20Bonita.pdf (fecha de consulta 1 de febrero de 2022).

Di-Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M. y Robledo, C. W. (2020). InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.

Dwivedi, H., Singh, S. K., Mahajan, S., Kishor, S., Maurya, D. y Kumar, V. (2023). Efficacy of mineral nutrients and nanomaterials on the productivity of *Capsicum* (*Capsicum annuum* L. cv. Rani) under polyhouse. *Journal of Applied Biology and Biotechnology*, 11(5), 206-212.

Farhat, N., Elkhouni, A., Zorrig, W., Smaoui, A., Abdelly, C. y Rabhi, M. (2016). Effects of magnesium deficiency on photosynthesis and carbohydrate partitioning. *Acta physiologiae plantarum*, 38(6), 145.

- Fernández-Marín, B., García-Plazaola, J. I., Hernández, A. y Esteban, R. (2018). Plant photosynthetic pigments: methods and tricks for correct quantification and identification. *Advances in plant ecophysiology techniques*, 29-50.
- Gahoonia, T. S., Claassen, N., y Jungk, A. (1992). Mobilization of phosphate in different soils by ryegrass supplied with ammonium or nitrate. *Plant and Soil*, 140, 241-248.
- Garza U. E. (2002). Manejo integrado de las plagas del chile en la Planicie Huasteca. INIFAP-CIRNE. Campo Experimental Ébano. Folleto Técnico Núm. 10. San Luis Potosí, México. 47 p.
- Gerendás, J. y Führs, H. (2013). The significance of magnesium for crop quality. *Plant Soil*. 368, 101-128. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1555-2>.
- Gokul, D., Poonkodi, P. y Angayarkanni, A. (2020). Effect of integrated nutrient management on the growth and nutrient content of chilli (*Capsicum annum* L.). *Int J Chem Stud*, 8(4), 2647-51.
- González-Zamora, A., Sierra-Campos, E., Pérez-Morales, R., Vázquez-Vázquez, C., Gallegos-Robles, M. A., López-Martínez, J. D., y García-Hernández, J. L. (2015). Measurement of capsaicinoids in chiltepin hot pepper: a comparison study between spectrophotometric method and high performance liquid chromatography analysis. *Journal of Chemistry*, 2015(1), 1-10. Doi:10.1155/2015/709150.
- Govindarajan, V. S. y Salzer, U. J. (1985). *Capsicum*-production, technology, chemistry, and quality part 1: History, botany, cultivation, and primary processing. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 22(2), 109-176.
- Gransee, A. y Führs, H. (2013). Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. *Plant and Soil*, 368(1), 5-21.
- Grzebisz, W. (2013). Crop response to magnesium fertilization as affected by nitrogen supply. *Plant Soil* 368, 23-39. Doi.org/10.1007/s11104-012-1574-z.

- Hadi, M. R. y Karimi, N. (2013). The role of calcium in plant salt tolerance. *Journal of Plant Nutrition*, 35 (13), 2037-2054.
- Harris, K. D., Vanajah, T. y Puvanitha, S. (2018). Effect of foliar application of Boron and Magnesium on growth and yield of green chilli (*Capsicum annuum* L.).
- Hauer-Jákli, M. y Tränkner, M. (2019). Critical leaf magnesium thresholds and the impact of magnesium on plant growth and photo-oxidative defense: a systematic review and meta-analysis from 70 years of research. *Frontiers in Plant Science*, 10, 766.
- Hernández, D. y Ocotero, V. M. (2016). El chile como alimento. *Ciencia*. 16-23.
- Hosseini, S. A., Réthoré, E., Pluchon, S., Ali, N., Billiot, B. y Yvin, J. C. (2019). Calcium application enhances drought stress tolerance in sugar beet and promotes plant biomass and beetroot sucrose concentration. *International journal of molecular sciences*, 20(15), 3777.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022). Edafología. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/> (fecha de consulta 10 de enero 2022).
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED). (2010). Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Estado de Oaxaca. Disponible en: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM20oaxaca/municipios/20044a.html> (fecha de consulta 12 de enero de 2022).
- Instituto para la innovación tecnológica en la agricultura (INTAGRI). (2020). Cultivo de Chile en México. Serie Hortalizas, Núm. 21. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 6 p.
- Ishfaq, M., Wang, Y., Yan, M., Wang, Z., Wu, L., Li, C. y Li, X. (2022). Physiological essence of magnesium in plants and its widespread deficiency in the farming system of China. *Frontiers in plant science*, 13, 802274.

- Jakobsen, S. T. (1993). Interaction between Plant Nutrients: III. Antagonism between Potassium, Magnesium and Calcium. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B Soil and Plant Sciences*, 43(1), 1-5. Doi:10.1080/09064719309410223.
- Jiao, J., Li, J., Chang, J., Li, J., Chen, X., Li, Z. y Zhang, B. (2023). Magnesium Effects on Carbohydrate Characters in Leaves, Phloem Sap and Mesocarp in Wax Gourd (*Benincasa hispida* (Thunb.) Cogn.). *Agronomy*, 13(2), 455.
- Kamireddy, M., Behera, S. K. y Kancherla, S. (2023). Establishing Critical Leaf Nutrient Concentrations and Identification of Yield Limiting Nutrients for Precise Nutrient Prescriptions of Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq) Plantations. *Agriculture*, 13(2), 453.
- Kibria, M. G., Barton, L. y Rengel, Z. (2021). Foliar application of magnesium mitigates soil acidity stress in wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207(2), 378-389.
- Kirkby, E. A. (2023). Introduction, definition and classification of nutrients. In *Marschner's Plant Mineral Nutrition* (pp. 3-9). Academic Press.
- Kraft, K. H., Brown, C. H., Nabhan, G. P., Luedeling, E., Luna-Ruiz, J. J., Coppens d'Eeckenbrugge, G. y Gepts, P. (2014). Multiple lines of evidence for the origin of the domesticated chili pepper, *Capsicum annuum*, in Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(17), 6165-6170. Doi:10.1073/pnas.1308933111.
- Kwon, M. C., Kim, Y. X., Lee, S., Jung, E. S., Singh, D., Sung, J. y Lee, C. H. (2019). Comparative metabolomics unravel the effect of magnesium oversupply on tomato fruit quality and associated plant metabolism. *Metabolites*, 9(10), 231.
- Laekemariam, F., Kibret, K. y Shiferaw, H. (2018). Potassium (K)-to-magnesium (Mg) ratio, its spatial variability and implications to potential Mg-induced K deficiency in Nitisols of Southern Ethiopia. *Agriculture & Food Security*, 7(1), 1-10.

- Lozano-Fernández, J., Orozco-Orozco, L. F. y Montoya-Munera, L. F. (2018). Effect of two environments and fertilization recommendations on the development and production of bell pepper (cv. Nathalie). *Acta Agronómica*, 67(1), 101-108.
- Lu, M., Liu, D., Shi, Z., Gao, X., Liang, Y., Yao, Z. y Chen, X. (2021). Nutritional quality and health risk of pepper fruit as affected by magnesium fertilization. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(2), 582-592.
- Malik, A. A., Narayan, S., Magray, M. M., Shameem, S. A., Hussain, K. y Bangroo, S. (2020). Effect of foliar application of micronutrients on growth, yield, quality and seed yield of chilli (*Capsicum annuum* L.) under temperate conditions of Kashmir Valley. *Int. J. Chem. Stud*, 8(4), 2781-2784.
- Martens, S., Odeurs, W., Elsen, A., Nawara, S., Amery, F. y Vandendriessche, H. (2020). Critical soil phosphorus values for yield reduction in intensive agricultural systems. *Journal of Agricultural Science and Technology B*, 4(2).
- Maurya, V. K., Gothandam, K. M., Ranjan, V., Shakya, A. y Pareek, S. (2018). Effect of drying methods (microwave vacuum, freeze, hot air and sun drying) on physical, chemical and nutritional attributes of five pepper (*Capsicum annuum* var. *annuum*) cultivars. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(9), 3492-3500.
- Mayland, H. F. y Wilkinson, S. R. (1989). Soil factors affecting magnesium availability in plant-animal systems: a review. *Journal of Animal Science*, 67(12), 3437-3444. [Doi.org/10.2527/jas1989.67123437x](https://doi.org/10.2527/jas1989.67123437x).
- Mengel, K y Kirkby, E. A. (4ta Ed.). (1987). *Principles of Plant Nutrition*. International Potash Institute Schneidergasse.
- Miller, R. O., Gavlak, R. y Horneck, D. (2013). *Soil, plant and water reference methods for the western region*. Colorado State University: Fort Collins, CO, USA, 155.

- Montero-Tavera, V., Guerrero-Aguilar, B. Z., Anaya-López, J. L., Martínez-Martínez, T. O., Guevara-Olvera, L. y González-Chavira, M. M. (2013). Genetic diversity of *Rhizoctonia solani* (Kuhn) isolates from Chile in Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(7), 1043-1054.
- Morales, F., S. D., Moreno-Velázquez, D., Jesús, T. D., Vázquez-Cruz, F., Ibáñez-Martínez, A. y Tobar-Reyes, J. R. (2020). Phenology and content of capsaicinoids in chili fruits produced under greenhouse conditions. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(3), 663-675.
- Nachimuthu, G., Schwenke, G., Mercer, C., Bischof, C., Hulme, P. y Bell, M. (2022). A review of phosphorus nutrition in irrigated cotton farming systems of Australia. *Journal of Cotton Research*, 5(1), 1-8.
- Nardis, B. O., Santana Da Silva Carneiro, J., Souza, I. M. G. D., Barros, R. G. D. y Azevedo Melo, L. C. (2021). Phosphorus recovery using magnesium-enriched biochar and its potential use as fertilizer. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 67(8), 1017-1033.
- Novoa, M. A., Miranda, D. y Melgarejo, L. M. (2018). Effect of deficiencies and excesses of phosphorus, potassium and boron on the physiology and growth of avocado (*Persea americana*, cv. Hass) plants. *Revista Colombiana De Ciencias Hortícolas*, 12(2), 293-307. [Doi.org/10.17584/rcch.2018v12i2.8092](https://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i2.8092).
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAOSTAT). (11 de diciembre de 2021). Fertilizantes por producto. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/RFB>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2002). Los fertilizantes y su uso. Una guía de bolsillo para los oficiales de extensión. Food y Agriculture Organization.
- Pahalvi H. N., Rafiya L., Rashid S., Nisar B. y Kamili A. N. (2021) Chemical fertilizers and their impact on soil health. In: Dar, G. H., Bhat, R, A.,

- Mehmood, M.A., Hakeem, K. R. (eds) Microbiota and Biofertilizers, Vol 2. Springer, Cham. Doi.org/10.1007/978-3-030-61010-4_1.
- Patiño-Ordoñez, T. E., Bustamante-Lara, T. I., Camacho-Vera, J. H., Mendoza-Castillo, V. M., Rodríguez-Haros, B. y Vargas-Canales, J. M. (2022). Especialización y competitividad de la producción de chile en México. *Regiones y Desarrollo Sustentable*, 21(42), 101-121.
- Peng, H. Y., Qi, Y. P., Lee, J., Yang, L. T., Guo, P., Jiang, H. X. y Chen, L. S. (2015). Proteomic analysis of *Citrus sinensis* roots and leaves in response to long-term magnesium-deficiency. *BMC genomics*, 16, 1-24.
- Peng, W. T., Zhang, L. D., Zhou, Z., Fu, C., Chen, Z. C. y Liao, H. (2018). Magnesium promotes root nodulation through facilitation of carbohydrate allocation in soybean. *Physiologia plantarum*, 163(3), 372-385.
- Pérez-Castañeda, L. M., Castañón-Nájera, G., Ramírez-Meraz, M. y Mayek-Pérez, N. (2015). Advances and perspectives about the study of the origin and genetic diversity of *Capsicum* spp. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 2(4), 117-128.
- Pérez-Castañeda, L. M., Castañón-Nájera, G. y Mayek-Pérez, N. (2008). Diversidad morfológica de chiles (*Capsicum* spp.) de Tabasco, México. *Cuadernos de biodiversidad*, nº 27 (septiembre 2008); pp. 11-22.
- Pickersgill, B. (1971). Relationships between weedy and cultivated forms in some species of chili peppers (genus *Capsicum*). *Evolution*. 25(4), 683-691. Doi: 10.1111/j.1558-5646.1971.tb01926. x.
- Pogłodziński, R., Barłóg, P. y Grzbisz, W. (2021). Effect of nitrogen and magnesium sulfate application on sugar beet yield and quality. *Plant, Soil and Environment*, 67(9), 507-513.
- Porra, R. J. (2002). The chequered history of the development and use of simultaneous equations for the accurate determination of chlorophylls a and b. *Photosynthesis research*, 73, 149-156.

- Quddus, M. A., Siddiky, M. A., Hussain, M. J., Rahman, M. A., Ali, M. R. y Masud, M. A. T. (2022). Magnesium influences growth, yield, nutrient uptake, and fruit quality of tomato. *International Journal of Vegetable Science*, 28(5), 441-46.
- Ragab, S. M., Abd Alhafez, Z. A. y S Mostafa, Y. (2021). Enhancing Growth, Productivity, Fruit Quality and Postharvest Storability of Hot Pepper by Calcium Nitrate and Salicylic Acid Foliar Application. *Alexandria Science Exchange Journal*, 42(4), 961-975.
- Ramírez M. M., Arcos C. G., Méndez A. R. y Meneses M. I. (2019). Variedades e híbridos de chile para el trópico de México. *Agropecuaria: Un enfoque integrado*, 39.
- Ramírez, H., Méndez-Paredes, O., Benavides-Mendoza, A. y Amado-Ramírez, C. (2009). Influence of prohexadione calcium and oxidation promoters on yield, capsaicin and vitamin C in Jalapeño pepper. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 15(3), 231-236.
- Reyes-Tena, A., Rodríguez-Alvarado, G., Santillán-Mendoza, R., Díaz-Celaya, M. y Fernández-Pavía, S. P. (2019). Marchitez causada por *Fusarium solani* en chile chilaca (*Capsicum annum*) en Michoacán. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 37(1), 43-47.
- Riga, P. y Anza, M. (2003). Effect of magnesium deficiency on pepper growth parameters: Implications for determination of magnesium-critical value. *Journal of plant nutrition*, 26(8), 1581-1593.
- Roacho-Cortés, E., Castellanos-Ramos, J. Z. y Etchevers-Barra, J. D. (2021). Field diagnostic techniques to determine nitrogen in maize. *Revista Terra Latinoamericana*. 39.
- Rodríguez, A., Peña-Fleitas, M. T., Padilla, F. M., Gallardo, M. y Thompson, R. B. (2021). Petiole sap nitrate concentration to assess crop nitrogen status of greenhouse sweet pepper. *Scientia Horticulturae*, 285, 110157.

- Rubio, F., Flores, P., Navarro, J. M. y Martínez, V. (2003). Effects of Ca²⁺, K⁺ and cGMP on Na⁺ uptake in pepper plants. *Plant Science*, 165(5), 1043-1049.
- Rubio, J. S., Garcia-Sanchez, F., Rubio, F. y Martínez, V. (2009). Yield, blossom-end rot incidence, and fruit quality in pepper plants under moderate salinity are affected by K⁺ and Ca²⁺ fertilization. *Scientia Horticulturae*, 119(2), 79-87.
- Ruíz-Lau, N., Medina-Lara, F. y Martínez-Estévez, M. (2011). El chile habanero: su origen y usos. *Ciencia*, 63(3), 70-76.
- Salazar-Jara, F. I. y Juárez-López, P. (2013). Requerimiento macronutricional en plantas de chile (*Capsicum annuum* L.). *Revista Bio Ciencias*. 2(2), 27-34.
- Salim, B. B. M., El-Gawad, A., Gamal, H., El-Yazied, A. y Hikal, M. (2019). Effect of calcium and boron on growth, fruit setting and yield of hot pepper (*Capsicum annuum* L.). *Egyptian Journal of Horticulture*, 46(1), 53-62.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (15 de septiembre de 2021). Producción de chile en México. Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/crecio-2-7-por-ciento-la-produccion-de-chile-verde-en-mexico-en-2020-y-registra-mayor-demanda-en-los-mercados-internacionales?idiom=es> (fecha de consulta 15 de enero de 2021).
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (20 de junio de 2020). El chile es parte de nuestra riqueza mexicana. Disponible en <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-chile-es-parte-de-nuestra-riqueza-mexicana?idiom=es> (fecha de consulta 14 de enero de 2022).
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (31 de diciembre de 2018). Las 64 variedades de chile en México. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/es/articulos/las-64-variedades-de-chile-en-mexico?idiom=es> (fecha de consulta 12 de enero de 2022).

- NMX-FF-025-2015. (2015). Norma Oficial Mexicana NMX-FF-025-2015, Productos alimenticios no industrializados para uso humano. Fruta fresca. Chile (*Capsicum* spp.) especificaciones. (cancela a la NMX-FF-025-SCFI-2007). Secretaría de Economía. Diario Oficial de la Federación. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5379404&fecha=23/01/2015.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2016). Chiles y pimientos mexicanos. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. 1-32.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2019). Un panorama del cultivo de chile. <http://infosiap.siap.gob.mx/images/stories/infogramas/100705-monografia-chile.pdf> (fecha de consulta 15 de enero 2022).
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2022). Anuario estadístico de la producción agrícola. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (fecha de consulta 25 de octubre de 2023).
- Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Ramakrishnan, M., Singh Sidhu, G. P., Bali, A. S. y Zheng, B. (2020). Photosynthetic response of plants under different abiotic stresses: a review. *Journal of Plant Growth Regulation*, 39, 509-531.
- Shevela, D., Kern, JF, Govindjee, G., Whitmarsh, J. y Messinger, J. (2021). Fotosistema II. *ELS*, 2 (7), 1-16.
- Silva, A. Z., Wamser, A. F., Nowaki, R. H., Cecílio-Filho, A. B. y Mendoza Cortez, J. W. (2017). Síntomas de deficiencia de macronutrientes en pimiento dulce (*Capsicum annuum* L.). *Agrociencia* (Montevideo), 21 (2), 31-43.
- Silva-Rojas, H. V., Fernández-Pavia, S. P., Góngora-Canul, C., Macías-López, B. C. y Ávila-Quezada, G. D. (2009). Distribución espacio temporal de la marchitez del chile (*Capsicum annuum* L.) en Chihuahua e identificación del

- agente causal *Phytophthora capsici* Leo. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 27(2), 134-147.
- Simkin, A. J., Kapoor, L., Doss, C. G. P., Hofmann, T. A., Lawson, T. y Ramamoorthy, S. (2022). The role of photosynthesis related pigments in light harvesting, photoprotection and enhancement of photosynthetic yield in planta. *Photosynthesis Research*, 152(1), 23-42.
- Soratto, R. P., Sandaña, P., Fernandes, A. M., Calles, T. S., Yagi, R., Souza, E. F. y Martins, J. D. (2023). Soil and leaf phosphorus thresholds for modern potato production systems in tropical Oxisols. *European Journal of Agronomy*, 148 (1), 1-10.
- Steiner, A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil*, 15, 134-154.
- Swart, E. D., Groenwold, R., Kanne, H. J., Stam, P., Marcelis, L. F. y Voorrips, R. E. (2004). Non-destructive estimation of leaf area for plants of different ages and accessions of *Capsicum annuum* L. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 79 (5), 764-770.
- Swelam, W. M. y El-Basir, A. (2021). Role of Calcium Fertilizers on Yellow Pepper Productivity. *Journal of Plant Production*, 12(3), 323-328.
- Thor, K. (2019). Calcium: nutrient and messenger. *Frontiers in Plant Science*, 10, 440.
- Thuy, T. L. y Kenji, M. (2015). Effect of high temperature on fruit productivity and seed-set of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) in the field condition. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 5(12), 515-520.
- Tucuch-Haas, C. J., Alcántar-González, G., Ordaz-Chaparro, V. M., Santizo-Rincón, J. A. y Larqué-Saavedra, A. (2012). Production and quality of habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) with different NH₄⁺/NO₃⁻ ratios and size of substrate particles *Terra Latinoamericana*, 30(1), 9-15.

- Valentín-Miguel, M. C., Castro-Brindis, R., Rodríguez-Pérez, J. E. y Pérez-Grajales, M. (2013). Extracción de macronutrientes en chile de agua (*Capsicum annuum* L.). *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 19(4), 71-78.
- Valenzuela-Escoboza, F. A., Bautista-Martínez, N., Lomelí-Flores, J. R., Valdez-Carrasco, J. M., Cortez-Mondaca, E. y Palacios-Torres, R. E. (2010). Identificación y fluctuación poblacional del minador de la hoja *Liriomyza trifolii* en chile jalapeño en el norte de Sinaloa. *Acta Zoológica Mexicana*, 26(3), 585-601.
- Vasconcelos, C. V., Costa, A. C., Müller, C., Castoldi, G., Costa, A. M., de Paula Barbosa, K. y Da Silva, A. A. (2020). Potential of calcium nitrate to mitigate the aluminum toxicity in *Phaseolus vulgaris*: effects on morphoanatomical traits, mineral nutrition and photosynthesis. *Ecotoxicology*, 29(2), 203-216.
- Vázquez-Flota, F., de Lourdes Miranda-Ham, M., Monforte-Gonzalez, M., Gutierrez-Carbajal, G., Velazquez-Garcia, C. y Nieto-Pelayo, Y. (2007). Biosynthesis of capsaicinoids, the pungent principle of peppers. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30(4), 353-360.
- Vera-Sánchez, K. S., Cadena-Iñiguez, J., Latournerie-Moreno, L., Santiaguillo-Hernández, J. F., Rodríguez-Contreras, A., Basurto-Pena, F. A., Castro-Lara, D., Rodríguez-Guzmán, E., López-López, P. y Ríos-Santos, E. (2016). Conservación y utilización sostenible de las Hortalizas Nativas de México. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas, México. 132 pp.
- Wang, Z., Hassan, M. U., Nadeem, F., Wu, L., Zhang, F. y Li, X. (2020). Magnesium fertilization improves crop yield in most production systems: A meta-analysis. *Frontiers in plant science*, 10 (1727), 1-10.
- Weih, M., Liu, H., Colombi, T., Keller, T., Jäck, O., Vallenback, P. y Westerbergh, A. (2021). Evidence for magnesium-phosphorus synergism and co-limitation of grain yield in wheat agriculture. *Scientific reports*, 11(1), 1-12.
- White, P.J. y Broadley, M.R. (2003). Calcium in plants. *Annals of Botany*, 92(4), 487-511.

- Xiaoyan, W., Zhiwei, L., Wenjun, W. y Jiawei, W. (2020). Chlorophyll content for millet leaf using hyperspectral imaging and an attention-convolutional neural network. *Ciencia Rural*, 50.
- Xie, K., Cakmak, I., Wang, S., Zhang, F. y Guo, S. (2021). Synergistic and antagonistic interactions between potassium and magnesium in higher plants. *The Crop Journal*, 9(2), 249-256.
- Youssef, S., Abd Elhady, S. A. E., Abu El-Azm, N. A. I. y El-Shinawy, M. Z. (2017). Foliar application of salicylic acid and calcium chloride enhances growth and productivity of lettuce (*Lactuca sativa*). *Egyptian Journal of Horticulture*, 44(1), 1-16.
- Zhang, W., Liu, Y., Muneer, M. A., Jin, D., Zhang, H., Cai, Y. y Wu, L. (2022). Characterization of Different Magnesium Fertilizers and Their Effect on Yield and Quality of Soybean and Pomelo. *Agronomy*, 12(11), 1-18.