

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



EVALUACIÓN DEL SUMINISTRO DE CALCIO EN PLANTAS DE PIMIENTO
IRRIGADAS CON ALTAS CONCENTRACIONES DE BORO

Tesis

Que presenta TOMÁS MORENO GÓMEZ
como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila

Diciembre 2020

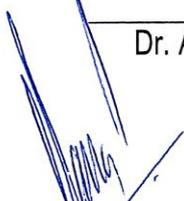
EVALUACIÓN DEL SUMINISTRO DE CALCIO EN PLANTAS DE PIMIENTO
IRRIGADAS CON ALTAS CONCENTRACIONES DE BORO

Tesis

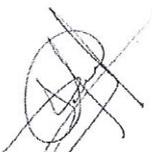
Elaborada por **TOMÁS MORENO GÓMEZ** como requisito parcial para obtener
el grado de **Maestro en Ciencias en Horticultura** con la supervisión y
aprobación del Comité de Asesoría



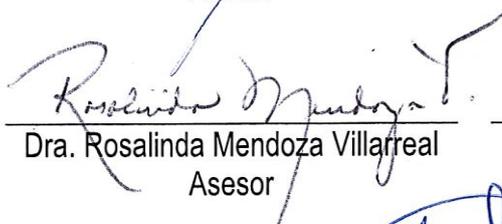
Dr. Armando Hernández Pérez
Asesor principal



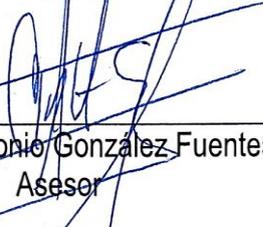
Dr. Alberto Sandoval Rangel
Asesor



Dr. Valentín Robledo Torres
Asesor



Dra. Rosalinda Mendoza Villarreal
Asesor



Dr. José Antonio González Fuentes
Asesor



Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente
Subdirector de Postgrado
UAAAN

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a **DIOS** por darme vida y fuerzas en cada momento para afrontar los problemas que se me presentan gracias.

A la **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO** “*Alma Terra Máter*” por recibirme, abrirme sus puertas y por brindarme un hogar gracias.

Por formarme profesionalmente y por generar en mí nuevos conocimientos.

Al **CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA** (CONACYT), por el apoyo brindado en el financiamiento de mis estudios de Maestría.

Al **DR. ARMANDO HERNÁNDEZ PEREZ**, por brindarme la oportunidad de trabajar con él, por su tiempo, apoyo, comprensión y paciencia en todo momento, pero sobre todo su amistad y confianza.

Al **DR. ALBERTO SANDOVAL RANGEL**, por su apoyo y sugerencias otorgados en la realización de este trabajo.

Al **DRA. ROSALINDA MENDOZA VILLARREAL**, por su apoyo y participación en la realización de este proyecto

Al **DR. VALENTÍN ROBLEDO TORRES**, por su apoyo y participación en la realización de este proyecto.

Al **DR. JOSÉ ANTONIO GONZÁLEZ FUENTES**, por su apoyo y cooperación para la realización de este proyecto.

A la **T. A. María Guadalupe Pérez Ovalle**, por su amistad, así como por el apoyo y confianza brindados en el trabajo de laboratorio.

A la **Dr. Alonso Méndez López**, por su apoyo y sugerencias para la realización de este trabajo.

A mis compañeros y amigos de generación: **Daniela Pérez, Alberto Paul, Fredy, Nayelli Briseida, Juan Francisco, Ana Lidia, Nayelli Azucena** gracias por compartir sus conocimientos y amistad durante esta etapa.

A mis compañeros y amigos de MCH y del DAP: **Magda, Lupita, Xóchitl, Jorge Díaz, Leo, Simeón, Refugio** A quienes agradezco su apoyo y conocimientos que de alguna manera han compartido conmigo.

A amigo (a): **Jehu, Gearim, Isaí, José camilo, Erick, José Rubicel, Yesenia y a la pequeña Gretel** por su amistad y apoyo incondicional.

DEDICATORIAS

A mis padres Tomás Moreno Domínguez y Mirta Gómez Pérez

Gracias por todo su apoyo brindado. En especial a ti mamá por tus sabios consejos, así como por depositar tu confianza en mí, sobre todo gracias por enseñarme a luchar y esforzarme para cumplir mis sueños y seguir adelante.

A mis hermanos: Jorge Antonio, Samuel, Martha Elidia, Héctor Leonel.

A ustedes como una muestra de amor y cariño, que siempre han estado ahí apoyándome, dándome muchos consejos, y motivándome para seguir adelante.

A mis sobrinos: Dulce Dayana, Héctor Elías y Arturo

Por alegrarme los momentos con sus ocurrencias y travesuras. Así como por ser uno de los motivos para ser mejor cada día.

A Blanca Flor Santiago Hernández

Por formar parte de mi vida y aún a pesar de la distancia con tus consejos y palabras de motivación me ayudaste a alcanzar este logro.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIAS.....	iv
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	xi
INTRODUCCIÓN.....	1
Justificación.....	2
Objetivo General.....	3
Objetivo específico.....	3
Hipótesis.....	3
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Antecedentes y origen.....	4
Importancia económica Pimiento.....	4
Calidad del agua de riego.....	6
Boro (B).....	7
Toxicidad por boro.....	8
Deficiencia de boro.....	9
Aplicación de boro en cultivos.....	9
Estrés abiótico.....	10
Calcio (Ca).....	10
Calcio como mensajero secundario.....	11
Toxicidad por calcio.....	12
Deficiencia por calcio.....	12
Aplicación de calcio en cultivos.....	12
MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
Localización.....	14
Material vegetal.....	14
Producción de plántulas.....	14
Trasplante.....	14
Tratamiento.....	14
Diseño Experimental.....	15
Variables agronómicas.....	15

Biomasa seca	15
Fotosíntesis, Transpiración y conductancia estomática.....	16
Concentración y contenido nutrimental.....	16
Rendimiento	16
Análisis estadístico	16
RESULTADOS.....	17
DISCUSIÓN	27
CONCLUSIÓN	33
BIBLIOGRAFIA	34

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Área cultivada en hectáreas y producción en toneladas de pimiento en los diferentes continentes y su porcentaje a nivel mundial en 2014 (FAO, 2017).	5
Tabla 2. Efecto de la concentración de B y Ca en la solución nutritiva sobre la altura de planta, longitud de raíz, peso seco de raíz (PSR), peso seco de tallo (PST), peso seco de hoja (PSH) y peso seco total (PST) de plantas de pimiento morrón.	17
Tabla 3. Efecto de la concentración de B y Ca en la solución nutritiva sobre la transpiración, fotosíntesis y conductancia estomática de las plantas de pimiento morrón.....	20
Tabla 4. Efecto de las concentraciones de B y Ca en la solución nutritiva sobre el contenido total de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y boro (B) en las plantas de pimiento morrón.....	22
Tabla 5. Efecto de la concentración de B y Ca en la solución nutritiva sobre el peso de fruto y rendimiento por plantas de pimiento morrón.....	25

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Efecto de las concentraciones de B y Ca en la solución nutritiva sobre la altura de planta y longitud de raíz de plantas de pimiento morrón. Las barras indican el error estándar de la media..... 18
- Figura 2.** Efecto de las concentraciones de B y Ca en la solución nutritiva sobre el peso seco de raíz, tallo, hoja y total por planta. Las barras indican el error estándar de la media. 19
- Figura 3.** Efecto de las concentraciones de B y Ca en la solución nutritiva en la transpiración, fotosíntesis y conductancia estomática. Las barras indican el error estándar de la media. 21
- Figura 4.** Efecto de las concentraciones de B y Ca en la solución nutritiva sobre el contenido total de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y calcio (Ca) en las plantas de pimiento morrón. Las barras indican el error estándar de la media. 23
- Figura 5.** Efecto de las concentraciones de B y Ca en la solución nutritiva sobre el contenido total de magnesio (Mg) y boro (B) en las plantas de pimiento morrón. Las barras indican el error estándar de la media. 24
- Figura 6.** Efecto de las concentraciones de B y Ca en la solución nutritiva sobre el peso de fruto y rendimiento por planta. Las barras indican el error estándar de la media. 26

RESUMEN

EVALUACIÓN DEL SUMINISTRO DE CALCIO EN PLANTAS DE PIMIENTO
IRRIGADAS CON ALTAS CONCENTRACIONES DE BORO.

POR

TOMÁS MORENO GÓMEZ
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. ARMANDO HERNÁNDEZ PÉREZ-ASESOR-

Saltillo, Coahuila

Diciembre, 2020

La toxicidad de B es una restricción ambiental que limita la productividad de los cultivos. El objetivo de esta investigación fue determinar la influencia de Ca en plantas de pimiento irrigadas con altas concentraciones de B. Los tratamientos evaluados fueron tres concentraciones de Ca (9, 11 y 13 meq L⁻¹) y 5 concentraciones de B (0.5, 1.5, 3, 4.5 y 6 ppm). La fotosíntesis, altura de planta, peso seco de raíz y hoja decreció al aumentar la concentración de B en la solución nutritiva; sin embargo, el efecto negativo del B fue menor cuando se incrementó la concentración de Ca en la solución nutritiva, principalmente a 9 meq L⁻¹. La longitud de raíz fue afectada por concentraciones altas de B, pero no se observó el efecto positivo del incremento de Ca. Asimismo, el contenido total de N, P, K, Ca y Mg en las plantas de pimiento decreció al aumentar la concentración de B; sin embargo, este detrimento fue menor al incrementar la concentración de Ca a 9 y 11 meq L⁻¹. El contenido total de B en las plantas de pimiento decreció al aumentar la concentración de B, pero cuando la dosis de Ca en la solución fue mayor a 7 meq L⁻¹ el contenido total de B presentó una disminución más pronunciado. Por lo tanto, al incrementar la concentración de Ca (9 meq L⁻¹) en la solución nutritiva puede mejorar el crecimiento y absorción de nutrientes de las plantas de pimiento en condiciones de exceso de B.

Palabras claves: toxicidad, mensajero secundario, biomasa, fotosíntesis

ABSTRACT

**EVALUATION OF CALCIUM SUPPLY IN SWEET PEPPER PLANTS
IRRIGATED WITH HIGH BORON CONCENTRATIONS**

BY

**TOMÁS MORENO GÓMEZ
MASTER´S DEGREE IN HORTICULTURE SCIENCES**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. ARMANDO HERNÁNDEZ PÉREZ –ADVISER–**

Saltillo, Coahuila

December, 2020

Boron (B) toxicity is an environmental restriction limiting crop productivity. The goal of this research work was to determine the influence of Calcium (Ca) in sweet pepper plants irrigated with high B concentrations. The assessed treatments included three Ca concentrations (7, 9 and 11 meq L⁻¹) and five B concentrations (0.5, 1.5, 3.0, 4.5 and 6.0 ppm). Photosynthesis, plant height, root dry weight and leaf dry weight decreased as B concentration increased in the nutrient solution; however, B negative effect was lower as Ca concentration increased in the nutrient solution, in particular at nine (9) meq L⁻¹. High B concentrations affected root length and Ca increase did not show any positive effect. Furthermore, total N, P, K, Ca and Mg contents in sweet pepper plants decreased when B concentration increased; however, these decreases were lower when Ca concentration increased at nine (9) and eleven (11) meq L⁻¹. Total B content in plants decreased when the concentration of this micronutrient increased in the solution; however, when Ca rate in the solution was higher than seven (7) meq L⁻¹, B content experienced a sharper drop. Therefore, under B excess conditions, the growth and nutrient uptake of sweet pepper plants can improve by increasing Ca concentration (9 meq L⁻¹) in the nutrient solution.

Key words: toxicity, secondary messenger, biomass, photosynthesis.

INTRODUCCIÓN

La calidad del agua superficial es un tema ambiental global muy sensible que es importante para el desarrollo económico a largo plazo y la sostenibilidad ambiental (Nagy-Kovács *et al.*, 2019). El agua de riego contiene varias sales disueltas (Kurunc *et al.*, 2020). Las características y la cantidad de estas sales disueltas dependen de la fuente de agua y su composición química. Los iones más comúnmente disueltos en el agua son calcio (Ca^{2+}), sodio (Na^+), magnesio (Mg^{2+}), sulfato (SO_4^{2-}), nitrato (NO_3^-), cloruro (Cl^-), boro (B), carbonato (CO_3^{2-}) y bicarbonatos (HCO_3^-). La proporción y concentración de estos iones disueltos se utilizan para determinar la idoneidad del agua para el riego (Sarkar y Islam, 2019). Los numerosos iones naturales que contiene el agua influyen seriamente en la utilización agrícola. Esto debido a que el agua de riego con iones excesivos impacta el medio ambiente. Por ejemplo muchas plantas sufren toxicidad y retraso en el crecimiento lo que resulta en una reducción del rendimiento (Jang *et al.*, 2012).

Por su parte, los micronutrientes son esenciales para la supervivencia de las plantas a pesar de la baja cantidad necesaria en comparación con los macronutrientes. El rango dinámico de concentraciones internas óptimas de micronutrientes requiere una regulación estricta para que sus requisitos se cumplan en diferentes condiciones ambientales (Castro *et al.*, 2018). El boro (B) es un micronutriente esencial para las plantas que se absorbe a través de las raíces principalmente en forma de ácido. El elemento está involucrado en la estructura y funcionamiento de la pared celular y la membrana; por lo tanto, participa en numerosas reacciones de transporte de iones, metabolitos y hormonas. Además de tener un rango muy estrecho entre deficiencia y toxicidad (Brdar-Jokanović, 2020).

La toxicidad de este nutrimento en las plantas está relacionada a la calidad del agua de riego utilizada y a los suelos con concentraciones excepcionalmente altas en B (Guerreiro *et al.*, 2009; Chatzissavvidis y Antonopoulou, 2020). Lo cual en plantas de pimiento morrón se presenta en la región marginal de hojas maduras, cuyas áreas se vuelven cloróticas o necróticas (Ozturk *et al.*, 2010). Mismo que, es una restricción ambiental importante que limita la productividad de los cultivos (El-Shazoly *et al.*, 2019),

como consecuencia del deterioro de las funciones celulares y de los procesos fisiológicos y bioquímicos (Chatzissavvidis y Antonopoulou, 2020). Por otra parte, el calcio (Ca) es un elemento esencial necesario para el crecimiento y desarrollo de las plantas en condiciones de estrés y sin estrés (Thor, 2019). Por lo que cumple función no solo como un factor importante para la estabilidad de la pared celular y de la membrana sino también como un segundo mensajero involucrado en varios procesos celulares. La variación intracelular de la concentración de Ca^{+2} libre se encuentra entre los primeros eventos que siguen a la percepción de la planta del cambio ambiental (Aldon *et al.*, 2018; Thor, 2019).

El estrés abiótico es uno de los principales factores limitantes que influyen en el crecimiento y la productividad de las especies vegetales (Atif *et al.*, 2019). Esto generalmente con lleva a un incremento del calcio Ca^{+2} libre en el citoplasma de las células, el cual genera una expresión genética que activa respuestas bioquímicas que le da a la planta la posibilidad de adaptarse a condiciones adversa de diferente naturaleza (Liang *et al.*, 2009). Según lo reportado por Arrington y DeVetter (2017) que las aplicaciones foliares de Ca y B plantas de arándano Northern Highbush no generaron ningún incremento en la firmeza, el peso de la fruta y de igual forma para el rendimiento de cultivo. Mientras que la aplicación de calcio ayudaron a contrarrestar de la acumulación de B en brotes y raíz en las plantas de canola, disminuyendo de esta manera la toxicidad de B en ellas (Metwally *et al.*, 2018).

Justificación

Debido a la poca información sobre la toxicidad por boro en los cultivos de mayor importancia económica es necesario determinar los efectos de la aplicación de calcio para contrarrestar la toxicidad de boro en las plantas de pimiento morrón.

Objetivo General

Determinar el efecto de calcio en el crecimiento, rendimiento y actividad fisiológica de las plantas de pimiento morrón desarrolladas a altas concentraciones de boro.

Objetivo específico

- Obtener la concentración óptima de calcio que reduce la toxicidad de boro en el crecimiento de las plantas de pimiento morrón.
- Determinar la proporción óptima de calcio y boro que permite incrementar el crecimiento y rendimiento de la fruta del pimiento morrón.
- Determinar la actividad fisiológica de las plantas pimiento morrón de las diferentes concentraciones de B y Ca.
- Determinar la concentración adecuada entre calcio y boro que permiten mejorar el estado nutricional de las plantas de pimiento morrón.

Hipótesis

Al menos una de las concentraciones de Ca reducirá la toxicidad de boro, mejorando el crecimiento y desarrollo de las plantas de pimiento morrón.

REVISIÓN DE LITERATURA

Antecedentes y origen

El chile (*Capsicum annum* L.) se ha cultivado en las regiones tropicales y subtropicales de América (Palacios y Sánchez, 2017), desde hace 6000 años, los pimientos rojos fueron utilizados en Sudamérica como especie para condimentar los alimentos suaves. En el siglo XVI se propagó su cultivo en España donde se distribuyó al resto del continente Europeo (Abu-Zahra, 2012). México es centro de origen, diversidad y domesticación del cultivo de chile con gran variedad genética no explorada. Se ha registrado su domesticación en los estados de Tamaulipas, Puebla y Oaxaca (Morales, 2012), esto según los datos de análisis de macrorresto vegetal, variación morfológica en variedades de cultivos e identificación de especies progenitoras silvestres. Junto con análisis genéticos bioquímicos y moleculares de las poblaciones domesticadas también se utilizan para fechar y localizar áreas geográficas de domesticación (Kraft *et al.*, 2014).

Importancia económica Pimiento

Los pimientos son buena fuente de antioxidantes que puede variar entre los genotipos (rojo, amarillo, naranja, verde, chocolate / marrón, vainilla / blanco, y púrpura), tanto en la etapa inmadura como en la maduración total (Chávez-Mendoza *et al.*, 2015). Estos antioxidantes tienen habilidades científicamente probadas para prevenir algunos tipos de cánceres, también tienen un efecto en el control de enfermedades cardiovasculares, aterosclerosis, e influyen evitando positivamente el proceso de envejecimiento (Selahle *et al.*, 2015).

En la actualidad el cultivo del pimiento presenta un área cultivada a nivel mundial cercana a los dos millones de hectáreas. Según datos de FAO (2017), Asia es el continente que presenta una mayor área destinada a este cultivo, seguido por África, América, Europa y Oceanía, abarcando más de la mitad (60%) del total la superficie cultivada de pimiento en el mundo. Además, es el principal productor, con una producción cercana al 70% de la producción mundial total. Mientras que África ocupa el segundo lugar en superficie cultivada con un 18.75% y el 9.97% la producción total. El continente americano por su parte representa el 11.43% del área cultivada en el mundo,

y un 13.31% de la producción total mundial. Europa ocupa el cuarto lugar en superficie (5.48%) con una producción de 9.25% del total. Por otro lado, los principales países productores son: China con 49.95%, México 8.45%, Turquía 6.58%, Indonesia 5.8%, España 3.5% y Estados Unidos con 2.83%. La producción de pimienta deshidratado es llevada principalmente por los países asiáticos, como la India con un 39%, Tailandia y China con 8% en ambos países.

Tabla 1. Área cultivada en hectáreas y producción en toneladas de pimienta en los diferentes continentes y su porcentaje a nivel mundial en 2014 (FAO, 2017).

	Área cultivada (ha)	Porcentaje (%)	Producción (t)	Porcentaje (%)	Rendimiento (t/ha)
Asia	1,243,790	64.20	21,757,606	67.31	17.49
África	363,211	18.75	3,221,701	9.97	8.87
América	221,477	11.43	4,303,419	13.31	19.43
Europa	106,233	5.48	2,990,230	9.25	28.15
Oceanía	2,658	0.14	51,390	0.16	19.33
Mundial	1,937,369	100	32,324,346	100	-

La producción nacional se centra principal en una estacionalidad, esto a razón del traslape con la producción de Estados Unidos. Lo cual se ve muy marcada ya que el 79% de la producción se destina a aquel país, esta estacionalidad tiene sus puntos bajos principalmente en los meses de mayo, junio, Julio y agosto, pues los precios de comercialización son los más bajos para los productores mexicanos, ya que, productores americanos están en plena cosecha. Para poder tener remuneraciones viables en México la producción se debe de centrar en los meses de: noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo, obteniendo los mejores precios de comercialización, destacando a los estados de Guanajuato, Jalisco, Querétaro, Durango y Coahuila como principales productores (SIAP, 2017).

La producción de chile en sus diferentes variedades en México alcanzo las 2.3 millones de toneladas. La dependencia federal destaco por el consumo

per cápita de chile verde en México es de 16 kilogramos al año y se cultiva en una superficie de 149 mil hectáreas, por lo que se considera una de las principales variedades del país (SIAP-SAGARPA, 2016). El cultivo de chile representa el 3.5% del PIB agrícola nacional, la demanda internacional se ha incrementado en 20 países, que incluyen integrantes del TLCAN, el TPP, el TLCTN, así como del bloque de países de la Unión Europea y otros con los que México no tiene acuerdo de libre comercio, así mismo sus ventajas comparativas lo posicionan como un proveedor predilecto en el comercio internacional de este cultivo (SAGARPA, 2017).

Calidad del agua de riego

A nivel mundial, el 70 % de las extracciones mundiales de agua azul se destinan a la irrigación. La agricultura de riego ocupa el 20 % del total de la superficie agrícola, pero representa el 40 % del total de los alimentos producidos en el mundo (FAO, 2012). El agua constituye un recurso indispensable para los cultivos, de modo que el control y seguimiento de su calidad constituye un factor a tener muy en cuenta, por sus propias características estructurales el agua disuelve y mantiene en suspensión un gran número de sustancias (Delgado *et al.*, 2010). Por lo tanto que la calidad del agua es un componente importante con respecto al uso sostenible del agua para la agricultura (Zaman *et al.*, 2018).

Hay cuatro criterios básicos para evaluar la calidad del agua con fines de riego (Zaman *et al.*, 2018):

- ❖ Contenido total de sales solubles (peligro de salinidad)
- ❖ Proporción relativa de iones de sodio (Na^+) a calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) - relación de adsorción de sodio (peligro de sodio)
- ❖ Carbonatos de sodio residuales (RSC) - concentración de aniones de bicarbonato (HCO_3^-) y carbonato (CO_3^{2-}), en lo que respecta a los iones Ca^{2+} más Mg^{2+} .
- ❖ Concentraciones excesivas de elementos que provocan un desequilibrio iónico en las plantas o toxicidad.

Para lograr los tres primeros criterios importantes, es necesario determinar las siguientes características en las aguas de riego: conductividad eléctrica (CE), aniones solubles (CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-}) donde Cl^- y SO_4^{2-} son cationes opcionales y solubles (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) donde K es opcional. Finalmente, también se debe medir la concentración de boro.

Boro (B)

El B fue descubierto por Gay Lussac y Thenard en 1808 (Gupta y Solanki 2013), es un miembro del grupo de elementos metaloides que también incluye silicio (Si) y germanio (Ge). Estos elementos son intermedios en propiedades entre metales y no metales (Marschner, 2012). Se distribuye ampliamente en bajas concentraciones a lo largo de la naturaleza en forma de diversos boratos inorgánicos que constituyen aproximadamente 10 mg kg^{-1} de la corteza terrestre, las reservas de minerales de borato son raras y generalmente se encuentran en regiones desérticas áridas con una historia geológica de actividad volcánica y / o hidrotermal (Ozturk *et al.*, 2010).

El requerimiento de boro para el crecimiento de las plantas se estableció por primera vez a principios del siglo XX, y hoy en día es ampliamente conocido que el boro es un elemento esencial para todas las plantas vasculares (Herrera-Rodríguez *et al.*, 2010). En la solución del suelo B existe principalmente como ácido bórico (B(OH)_3), altamente soluble en condiciones de pH entre 5,5 y 7,5, por lo cual puede ser lixiviado y perderse del suelo en zonas lluviosas. Por el contrario, en condiciones de poca lluvia, el B no puede lixiviarse lo suficiente y, por lo tanto, puede acumularse hasta niveles que se vuelven tóxicos para el crecimiento de las plantas (Moreno-Echeverry *et al.*, 2016). El ácido bórico es absorbido por las raíces por tres mecanismos diferentes: a) difusión pasiva a través de la bicapa lipídica, b) transporte facilitado a través de canales, y c) transporte activo de alta afinidad inducido en respuesta a la baja concentración de boro (Miwa y Fujiwara, 2010).

Una vez que las células radicales han absorbido el boro, este micronutriente se trasloca hacia el xilema. Si las plantas están en un medio con suficiente disponibilidad de boro, la carga del xilema se lleva a cabo por difusión simple a través de la bicapa lipídica y por difusión facilitada a través de canales. Sin

embargo, bajo condiciones de deficiencia en boro se induce en el xilema un sistema de transporte activo de alta afinidad (Martín, 2014).

El boro juega un papel importante en el crecimiento y desarrollo de las plantas entre los cuales figuran (Marschner, 2012):

- ❖ Transporte de azúcar,
- ❖ Síntesis de la pared celular,
- ❖ Lignificación,
- ❖ Estructura de la pared celular,
- ❖ Carbohidrato metabolismo,
- ❖ Metabolismo del ARN,
- ❖ Respiración
- ❖ Metabolismo del ácido indol acético (IAA),
- ❖ Metabolismo fenol
- ❖ Metabolismo de membranas.

En base al enlistado anterior podría decirse, que B está involucrado en una serie de vías metabólicas, o que la deficiencia da como resultado un "efecto cascada" debido a Interrupción de un proceso celular crítico y central (Marschner, 2012).

Toxicidad por boro

Los requerimientos de B entre especies son altamente variables ya que la cantidad óptima para una especie puede ser toxica o insuficiente para otra (Vera *et al.*, 2014). En base a esto se puede clasificar al pimiento como una planta semi tolerante en cuanto a la toxicidad del elemento B (Guerreiro *et al.*, 2009; Sarafi *et al.*, 2017). Los síntomas visuales de toxicidad por boro incluyen raíces y brotes de menor tamaño, y clorosis o necrosis de las hojas. Las causas subyacente de estos cambios puede estar vinculada a la interrupción de una amplia gama de procesos fisiológicos, que incluyen: i) la inhibición de la fotosíntesis , ii) disminución de la conductancia estomática , iii) aumento de la peroxidacion de lípidos, iv) alteración de las enzimas dentro de las vías antioxidantes, v) aumento de la permeabilidad de las membranas, vi) reducción de la extrusión de protones en las raíces, y vii)degradación de la suberina y lignina (Simón-Grao *et al.*, 2019).

Deficiencia de boro

La deficiencia de boro es un trastorno nutricional generalizado en condiciones de alta precipitación, B se lixivia fácilmente del suelo como $B(OH)_3$. La disponibilidad de boro para las plantas disminuye al aumentar el pH del suelo, particularmente en suelos calcáreos y suelos con un alto contenido de arcilla, probablemente como resultado de la formación de $B(OH)_4^-$ y la subsiguiente adsorción de aniones (Marschner, 2012). La deficiencia es más frecuente en los suelos arenosos lixiviados, alcalinos y con gran cantidad de cal, sin embargo, la B se lixivia fácilmente en la mayoría de los suelos y las deficiencias a menudo se presentan en áreas de alta precipitación o en sistemas irrigados que utilizan agua con un bajo contenido de concentración de B menores a $0,3 \mu\text{g ml}^{-1}$ (Marschner, 2012). Las plantas en general toma una forma de roseta que es unos típicos síntomas hipoplástico debido a la deformación de todas sus estructuras y a la desorganización de sus meristemos (Martínez *et al.*, 2009; Alcántara y Trejo, 2012).

Aplicación de boro en cultivos

El boro (B) es necesario para el crecimiento de todas las plantas. Una nutrición adecuada de B es fundamental para obtener altos rendimientos y calidad de los cultivos (Ali *et al.*, 2015). El suministro de ácido bórico como fuente de boro promueve una mayor absorción de este a diferencias de otras fuentes como el bórax generando como resultado un mayor rendimiento en el cultivo de frijol común (Flores *et al.*, 2018). Varias investigaciones demuestran que la aplicación de B causa aumento en la cantidad de vainas en el cultivo de soya (Raimundi *et al.*, 2013; Trinidad *et al.*, 2015). El boro puede llegar afectar el equilibrio de los nutrientes en las plantas de tabaco, aumentando el contenido de N en las hojas, pero a niveles más altos de B puede afectarlo negativamente. Además, aumenta diferentes enzimas basadas en N que son beneficiosas para el tabaco, y, por otro lado, puede presentarse disminución del contenido de NO_3^- . Sin embargo, puede tener un efecto positivo en la acumulación de fosforo y potasio en las hojas (Ali *et al.*, 2015).

Estrés abiótico

Las plantas viven en un entorno en constante cambio que por lo general son desfavorables o estresantes para su crecimiento y desarrollo. Estas condiciones ambientales adversas incluyen estrés biótico, como infección por patógenos y ataque de herbívoros, y estrés abiótico, como sequía, calor, frío, deficiencia de nutrientes y exceso de sal o metales tóxicos (Zhu, 2016). Los causales generan pérdidas inmensas en la producción agrícola a nivel mundial (Chávez *et al.*, 2012). Las respuestas al estrés abiótico de las plantas están reguladas por la integración de diversas señales ambientales y endógenas, incluidas las hormonas vegetales. La adaptación de las plantas al estrés abiótico está controlada por cascadas moleculares, en las que se modula la expresión de muchos genes, y también participan en la vía de intercomunicación con otros mecanismos de señalización (Osakabe y Osakabe, 2012).

Se ha comprobado que existen varias hormonas vegetales que funcionan en las respuestas al estrés abiótico. El ácido abscísico (ABA) ha sido reconocido durante mucho tiempo como la 'hormona del estrés' de la planta primaria, que regula una amplia gama de mecanismos que conducen a una mayor tolerancia al estrés (Danquah *et al.*, 2014). Mientras que el etileno participa en la respuesta al estrés abiótico, al limitar el crecimiento a favor de una mayor tolerancia al estrés (Ng *et al.*, 2013). El ácido salicílico y el ácido jasmónico de igual manera, son importantes en las respuestas al estrés; sin embargo, estas hormonas están relacionadas principalmente con el estrés biótico (An y Mou, 2011). Además, hay estudios que respalda la participación de auxinas y giberelinas en la adaptación al estrés, que puede ocurrir indirectamente a través de alteraciones en el crecimiento (Tognetti *et al.*, 2012).

Calcio (Ca)

El Ca es un elemento mineral esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Corpas, 2018). Es absorbido como ion divalente Ca^{2+} , a través del sistema radicular por el flujo generado por la corriente de transpiración. Este proceso ocurre principalmente en los pelos radiculares y las puntas de las raíces jóvenes (El Habbasha y Ibrahim, 2015). La captación, distribución y almacenamiento de Ca en las plantas estar estrictamente regulados para

cumplir sus diferentes funciones (Thor, 2019). Mismo que, desempeña importantes funciones bioquímicas y apoya muchos procesos metabólicos, además de activar varios sistemas enzimáticos, contribuyendo así al correcto desarrollo de las plantas (El Habbasha y Ibrahim, 2015). De igual manera, se desempeña como un mensajero secundario de las acciones de las hormonas y de factores ambientales, en los que se incluyen el estrés biótico y abiótico en plantas superiores (Reyes *et al.*, 2013). La mayoría de las funciones del Ca como componente estructural de las macromoléculas están relacionadas con su capacidad de coordinación, a través de la cual proporciona mecanismos de conexión intermolecular estables, pero reversibles, predominantemente en las paredes celulares y en la membrana plasmática. El Ca estabiliza las membranas celulares para unir el grupo fosfato y el ácido carboxílico en fosfolípidos y proteínas, preferiblemente en la superficie de la membrana (El Habbasha y Ibrahim, 2015).

Calcio como mensajero secundario

Los mensajeros secundarios son pequeñas moléculas e iones que transmiten las señales recibidas por los receptores de la superficie celular a las proteínas afectadas, suelen estar presentes en concentraciones bajas en las células en reposo y pueden producirse o liberarse rápidamente cuando se estimulan las células (Newton *et al.*, 2016). No obstante, Ca es un mensajero secundario importante que participa en la transducción de señales procedentes del medio ambiente (Cho *et al.*, 2012; Neef *et al.*, 2015); como son : como luz, tacto, inductores de patógenos, hormonas vegetales, alta salinidad, frío y sequía (Neef *et al.*, 2015). Además, es un ion de señalización muy versátil que se encuentra en el centro de una sofisticada red de vías de señalización. Estos caminos integran la información de fuentes bióticos y abióticos que tienen un impacto resultante en los genes expresión y fisiología celular (Dodd *et al.*, 2010).

En las plantas, las señales de Ca toman la forma de aumentos transitorios del mismo en el citosol. A menudo ocurren como oscilaciones repetitivas o pico donde la frecuencia, amplitud y forma del aumento de Ca^{2+} están determinados por la naturaleza del estímulo (Dodd *et al.*, 2010)

Toxicidad por calcio

El exceso de Ca puede ocurrir en lugares ricos en Ca, materiales y suelos, incluidos muchos desiertos y áreas agrícolas que se riegan con agua dura (Marschner, 2012). Este nutrimento puede suministrar a altas concentraciones y pueden alcanzar más del 10% del peso seco de las plantas. Los síntomas de toxicidad por exceso de Ca son poco comunes, cuando se presenta el Ca generalmente se acumula en la vacuola (Marschner, 2012; Alcántara y Trejo, 2012). Aunque, es un esencial elemento para todos los organismos vivos, el exceso de Ca puede ser citotóxico, por su tendencia a precipitar con fosfato inorgánico (Islam y Kawasaki, 2015). Presentándose deficiencias inducidas de magnesio o potasio (Alcántara y Trejo, 2012).

Deficiencia por calcio

Los síntomas de su deficiencia siempre son más pronunciados en los tejidos jóvenes, de tal manera que las zonas meristemáticas de las raíces, tallos y hojas, donde existen divisiones celulares, son las más susceptibles, quizás porque se necesita para que forme una nueva laminilla media en la placa celular que aparece entre las células hijas (Álvarez-Mares *et al.*, 2017). La deficiencia en las plantas causa daño a la membrana. Lo que justifica que las plantas con deficiencia de Ca posean un menor capacidad antioxidante (Cho *et al.*, 2012). Por otra parte, los altos niveles de K y Mg pueden reducir la absorción de Ca y, por lo tanto, el uso excesivo de fertilizantes que contienen estos nutrientes puede conducir a una deficiencia de Ca (Cho *et al.*, 2012).

Aplicación de calcio en cultivos

Los iones de calcio son requeridos para la estabilidad de la membrana, estabilización de la pared celular e integridad de la misma y en todas las células son fundamentales para múltiples eventos de señalización intracelulares (Dayod *et al.*, 2010). El aumento de los niveles de Ca en los tejidos podría también aumentar la tolerancia al estrés de las plantas y mejoran la calidad del almacenamiento poscosecha (Dayod *et al.*, 2010).

La aplicación de exógena calcio 4 Mm mejoró la capacidad de transporte de electrones y redujo el daño hipóxico de las hojas de pepino (He *et al.*, 2018). Mientras suministro de altas concentraciones de Ca incremento la altura,

diámetro del tallo y biomasa plantas en plantas de tomate esto en relación con las plantas en donde se aplicó de dosis bajas de Ca (Jiang *et al.*, 2013).

Aplicación de calcio y boro en cultivos

Se han encontrado en muchos informes, los efectos la interacción de B y Ca han sido muy variables y contradictorio según las condiciones del estudio (Tariq y Mott, 2007; Sarafi, Chatzissavvidis y Therios, 2017). Sin embargo, se ha presentados antagonismo debido a los alto nivel de Ca en la solución nutritiva con las concentración de B en la hoja y pétalo en rosas de corte "Easy Lover" (Shams *et al.*, 2012). Mientras que según Arunkumar *et al.*, (2018) el Ca tiene un efecto sinérgico sobre el B en las hojas y tallo de las plantas. Así mismo las aplicaciones foliares de cloruro de calcio y ácido bórico de forma individual o en combinación aumenta las características de crecimiento vegetativo, el porcentaje de cuajado y el rendimiento de frutos de las plantas *Capsicum annuum* (Salim *et al.*, 2019).

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

La presente investigación se realizó durante el periodo de junio a diciembre del 2019 en un invernadero tipo gótico en el Departamento de Horticultura dentro de las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Cuyas coordenadas geográficas son: 25°25' 23.55" latitud N, 101 2'5.16 longitud O y altura de 1763 msnm. Durante el experimento se presentó una temperatura promedio diaria de 30 °C, humedad relativa promedio de 55% y una radiación fotosintéticamente activa incidente diaria de 450 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{S}^{-1}$.

Material vegetal

Se utilizaron semillas pimiento naranja cv. Shir F1. presentando un fruto muy firme con una pared gruesa, con un peso promedio de fruto de 220 g, así como una alta resistencia al agrietamiento y tolerancia al frío.

Producción de plántulas

Se sembraron las semillas de pimiento morrón se realizó el 5 de mayo del 2019 en charolas de poliestireno de 200 cavidades, utilizando como sustrato peat moss. Se colocaron una semilla por cavidad y se aplicaron riegos en base a las necesidades hídricas de las plántulas.

Trasplante

Esta actividad se hizo el 4 de junio, a los 30 días después de la siembra o cuando las plántulas habían alcanzado una altura promedio entre 12 y 15 cm. Los contenedores se llenaron con sustrato a base de peat moss y perlita con una relación de 70/30 (v/v). Se plantaron una plántula en cada contenedor cubriendo totalmente el cepellón; a una distancia entre plantas 50 cm y entre contenedor de 40 cm.

Tratamiento

Los tratamientos consistieron en cinco concentraciones de B (0.5, 1.5, 3.0, 4.5 y 6.0 ppm) y tres concentraciones de Ca (7, 9 y 11 meq L⁻¹), la combinación de estos dio un total de 15 tratamientos. Como fuente de boro y calcio se

utilizaron ácido bórico y nitrato de calcio. Las concentraciones de Ca se obtuvieron a partir de las modificaciones de la solución Steiner (1961). Mientras que las concentraciones de B se determinó en base a lo mencionado por Yermiyahu (2008) “las concentraciones superiores a 2 ppm de B en el agua de riego son inapropiadas para el cultivo de pimiento”. Para la preparación de las soluciones nutritivas se consideró el análisis mineral del agua de riego. El pH de las soluciones se ajustó a 6.0 ± 0.1 con H_3PO_4 al 85% y HNO_3 al 55%. Tres días después del trasplante se iniciaron los riegos con las soluciones correspondientes a cada tratamiento. Los riegos se realizaron en forma manual, aplicando un volumen de acuerdo a las necesidades hídricas y etapa fenológica del cultivo.

Diseño Experimental

El diseño experimental utilizado fue el de bloques completos al azar con un arreglo factorial de 3 x 5, con cuatro repeticiones en cada tratamiento, la combinación de estos dio un total de 15 tratamientos.

Variables agronómicas

Al finalizar el experimento se procedió a la medición de la altura de planta se determinó midiendo desde la base hasta la parte apical de la misma. Los diferentes órganos de la planta se separaron. El sistema radicular se sometió a un lavado con agua de la llave y agua destilada para eliminar el exceso de sustrato, para posteriormente determinar la longitud y volumen de raíz, este último se determinó con método de desplazamiento, utilizando una probeta de 1000 ml.

Biomasa seca

La raíz, tallo y hoja fueron colocados en bolsas de papel estraza y posteriormente se introdujeron en un horno de secado a una temperatura de 65 °C durante 72 h, para después registrar la biomasa seca en una balanza analítica.

Fotosíntesis, Transpiración y conductancia estomática

Para determinar tanto la transpiración, la fotosíntesis, así como la conductancia estomática se seleccionaron hojas bien desarrolladas y completamente sanas, evaluando este parámetro entre 12:00 a 13:00 h, utilizando un equipo portátil marca LICOR modelo- 6800XT.

Concentración y contenido nutrimental

Los tejidos secos se digitaron en una mezcla de 2:1 de H₂SO₄: HClO₄ y 2 ml de H₂O₂ al 30%. La determinación de N se realizó por el procedimiento de Micro-Kjeldahl (Bremmer 1996); mientras que, las concentraciones de fósforo (P), potasio (K), Ca, magnesio (Mg) y B se determinaron con espectrómetro de emisión de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES, model Liberty, VARIAN, Santa Clara, CA) (Soltanpour *et al.* 1996). Una vez obtenido la concentración nutrimental, se utilizó la biomasa seca de los distintos órganos para obtener el contenido nutrimental por planta.

Rendimiento

Las variables que se evaluaron rendimiento de fruto por planta (RFP) que se determinara al momento de cada cosecha, tomando los frutos de una planta por unidad experimental: peso promedio de los frutos (PPF) los cuales fueron pesados en una balanza electrónica marca Ohaus®, modelo cs2000, con capacidad de 2000g x 1g. Mientras que el rendimiento, se evaluó tomando en consideración todas las plantas de la unidad experimental, con un intervalo entre cosecha de ocho días.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) y la comparación de medias fue de acuerdo con la prueba de Tukey ($\alpha \leq 0.05$) utilizando el programa estadístico SAS (Statistical Analysis Systems) versión 9.0.

RESULTADOS

Los parámetros de altura de planta, longitud de raíz, peso seco de raíz, peso seco de tallo y peso seco de hoja fueron afectados significativamente por las concentraciones de B en la solución nutritiva; mientras que, a excepción del peso seco de tallo, estos mismos parámetros fueron afectados por las concentraciones de Ca, así como por la interacción de ambos factores evaluados (tabla 2).

Tabla 2. Efecto de la concentración de B y Ca en la solución nutritiva sobre la altura de planta, longitud de raíz, peso seco de raíz (PSR), peso seco de tallo (PST), peso seco de hoja (PSH) y peso seco total (PST) de plantas de pimiento morrón.

B (ppm)	Altura de planta (cm)	Volumen de raíz (ml)	Longitud de raíz (cm)	PSR (g)	PST (g)	PSH (g)	Peso total por planta (g)
0.5	59.278a	111.111ab	43.333a	5.33b	13.055b	21.389c	39.111a
1.5	57.222a	120.000a	41.500ab	7.000a	15.333a	24.833a	45.000a
3	55.889a	115.556a	43.333a	6.111ab	14.000ab	24.111a	43.556a
4.5	53.444b	99.167b	41.056ab	5.667b	13.222b	24.167a	41.167a
6	50.556c	101.944b	39.667b	5.444b	12.667b	22.500b	41.278 a
Anova $p \leq$	<.0001	0.0002	0.0006	0.001	<.0001	<.0001	0.0605
Ca (meq L ⁻¹)							
7	57.000a	112.500a	43.467a	5.467b	13.200a	22.167b	40.933a
9	59.400a	107.333a	40.367b	6.267a	13.767a	24.267a	42.400a
11	55.533b	108.833a	41.500b	6.000ab	14.000a	23.767a	42.733a
Anova $p \leq$	<.0001	0.3210	0.0002	0.0363	0.1182	<.0001	0.4835
Interacción	0.006	0.0644	<.0001	0.0264	0.111	<.0001	0.0522
CV (%)	3.54	8.636	4.31	13.80	7.683	3.35	10.22

Medias con letra diferentes indican efectos significativos según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p \leq 0.05$. Anova = análisis de varianza. Interacción = B x Ca. CV= coeficiente de variación.

La altura de planta tendió a reducir conforme se incrementó la concentración de B en la solución nutritiva; sin embargo, este detrimento fue menos pronunciado al incrementar la concentración de Ca en la solución nutritiva a 9 meq L⁻¹ (Figura 1A). La longitud de raíz fue superior al emplear una dosis de 3 ppm de B con concentraciones de 7 y 11 meq L⁻¹ de Ca, inferior o superior a esta dosis de B éste parámetro decreció; mientras que, cuando se adicionó 9 meq L⁻¹ de Ca la longitud de raíz fue superior con 0.5 ppm de B (Figura 1B).

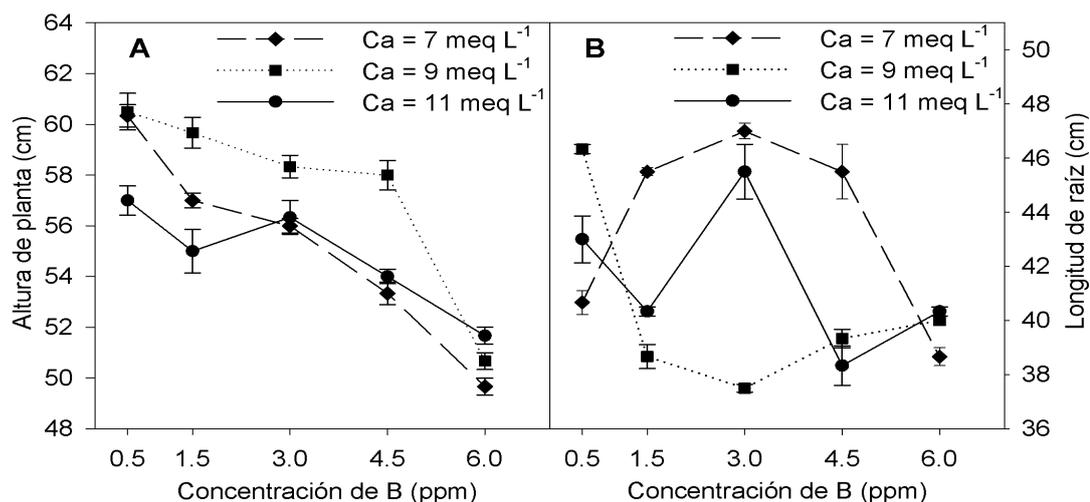


Figura 1. Efecto de las concentraciones de B y Ca en la solución nutritiva sobre la altura de planta y longitud de raíz de plantas de pimienta morrón. Las barras indican el error estándar de la media.

El peso seco de raíz fue mayor con una dosis de 1.5 meq L⁻¹ de B en la solución, inferior o superior a esta dosis este parámetro decreció, observando este comportamiento cuando la concentración de Ca en la solución nutritiva fue de 7 y 9 meq L⁻¹, pero se observó un detrimento menos pronunciado al adicionar 9 meq L⁻¹ de Ca; mientras que, al incrementar la concentración de Ca a 11 meq L⁻¹ el peso seco de raíz fue mayor con una dosis de 3 ppm de B (Figura 2A). El peso de tallo fue superior con una dosis de 1.5 meq L⁻¹ de B en la solución nutritiva, observándose un detrimento con concentraciones más alta independientemente de la concentración de Ca con la que hayan nutrido las plantas (Figura 2B). El peso seco de hoja fue mayor con las dosis de 1.5 y 6 ppm de B al trabajar con concentraciones de Ca de 7 y 9 meq L⁻¹; pero, al incrementar la concentración de Ca a 11 meq L⁻¹ el peso seco de hoja fue mayor al adicionar una dosis de 4.5 ppm de B; sin embargo, dentro de las concentraciones de Ca evaluadas, el mayor peso seco de hoja se presentó al adicionar 9 meq L⁻¹ de Ca a la solución nutritiva (Figura 2C).

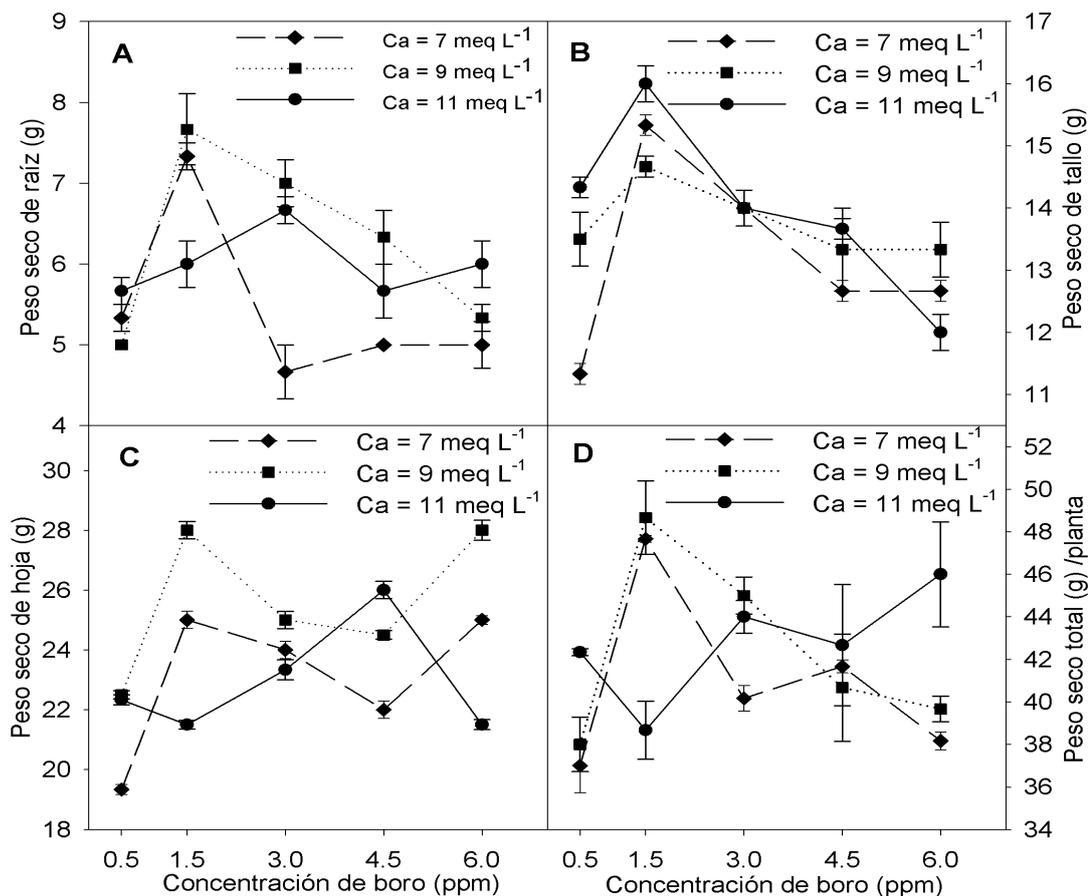


Figura 2. Efecto de las concentraciones de B y Ca en la solución nutritiva sobre el peso seco de raíz, tallo, hoja y total por planta. Las barras indican el error estándar de la media.

Las diferentes variables fisiológicas fueron afectadas significativamente por las concentraciones de B (Tabla 3). Mientras que las concentraciones de Ca tuvieron efectos significativos en la fotosíntesis, conductancia estomática. Pero no en la transpiración. La interacción entre B y Ca se presentó diferencias significativas en todas las variables (Tabla 3). La tasa de transpiración se registró en las plantas nutridas con 1.5 ppm de B. así mismo, la fotosíntesis se incrementó con una concentración 1.5, 3.0 y 4.5 ppm de B. No obstante, una concentración de 1.5 ppm de B disminuyó la conductancia estomática. Mientras que, concentraciones de 7 y 9 meq L⁻¹ Ca incrementaron la fotosíntesis y la conductancia estomática (Tabla 3).

Tabla 3. Efecto de la concentración de B y Ca en la solución nutritiva sobre la transpiración, fotosíntesis y conductancia estomática de las plantas de pimiento morrón.

B (ppm)	Transpiración mmol m ⁻² s ⁻¹	Fotosíntesis umol m ⁻² s ⁻¹	Conductancia estomática mmol m ⁻² s ⁻¹
0.5	2.89711c	3.771b	133.284a
1.5	3.58211b	3.984ab	117.461b
3	4.08678a	4.051a	129.265a
4.5	2.44344d	3.983ab	135.679a
6	2.78822c	3.487c	133.698a
Anova P≤	<.0001	<.0001	<.0001
Ca (meq L ⁻¹)			
7	3.125a	3.843ab	134.230a
9	3.214a	3.967a	135.200a
11	3.139a	3.756b	120.202b
Anova P≤	0.2873	0.004	<.0001
interacción	<.0001	<.0001	<.0001
CV (%)	5.118	4.035	4.126

Medias con letra diferentes indican efectos significativos según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p \leq 0.05$. Anova = análisis de varianza. Interacción = B x Ca. CV= coeficiente de variación.

La transpiración fue mayor en las plantas nutridas con 3 ppm de B y 9 meq L⁻¹ de Ca. Mientras que una concentración mayor o menos a esta tiende a disminuir la transpiración (Figura 3A). La fotosíntesis se incrementó al aumentar la dosis de B, con un máximo con 4.5 ppm, presentando este comportamiento al incrementar la concentración de Ca en la solución nutritiva a 9 y 11 meq L⁻¹; mientras que, al adicionar únicamente 7 meq L⁻¹ de Ca este parámetro decreció cuando la dosis de B fue mayor a 1.5 ppm (Figura 3B). La conductancia estomática fue superior con 0.5 y 3 ppm de B con 9 meq L⁻¹ Ca. Además, la conductancia estomática se incrementó con 11 meq L⁻¹ Ca con forme se incrementó las concentraciones de B (Figura 3C).

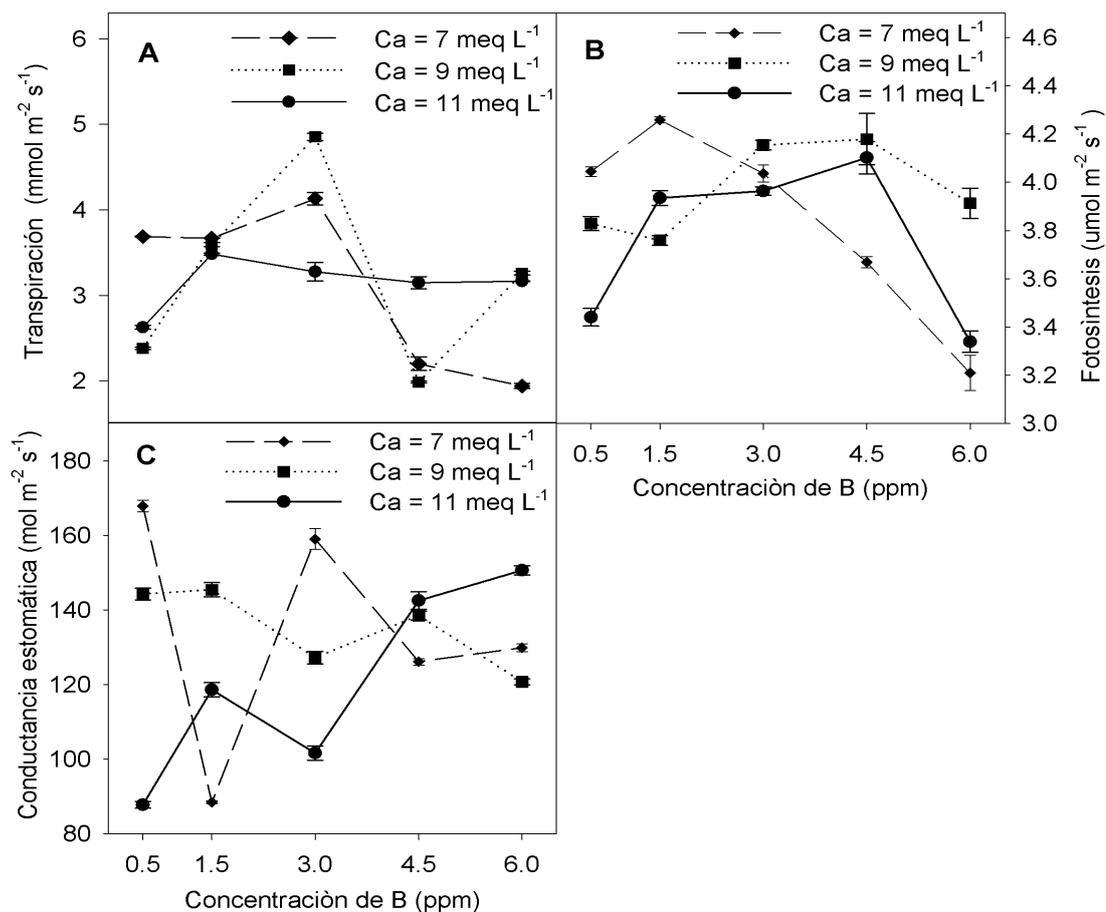


Figura 3. Efecto de las concentraciones de B y Ca en la solución nutritiva en la transpiración, fotosíntesis y conductancia estomática. Las barras indican el error estándar de la media.

El contenido total de N, P, K, Ca, Mg y B en las plantas de pimiento morrón fue afectado significativamente por las concentraciones de B en la solución nutritiva; igualmente, a excepción del contenido total de Mg, el contenido total de estos iones en las plantas de pimiento fue afectado por las concentraciones de Ca en la solución nutritiva; asimismo, el contenido total de N, P, K, Ca, Mg y B en las plantas de pimiento fue influenciado significativamente por la interacción de los dos factores evaluados (Tabla 4).

Tabla 4. Efecto de las concentraciones de B y Ca en la solución nutritiva sobre el contenido total de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y boro (B) en las plantas de pimiento morrón.

B (ppm)	N	P	K (mg)	Ca	Mg	B (μg)
0.5	871.48c	143.506b	953.01b	531.26b	184.347e	2.69293e
1.5	997.22a	170.407a	1093.19a	637.67a	232.779c	4.88914a
3	986.78ab	166.016a	1000.12b	618.48a	260.419a	4.19058c
4.5	944.14b	165.251a	1062.16a	615.24a	243.803b	3.5735d
6	958.52ab	163.045a	1055.37a	543.04b	208.958d	4.49126b
Anova $p \leq$	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Ca (Meq L⁻¹)						
7	925.62b	153.160c	1011.79b	576.601b	223.864a	4.10395a
9	970.7a	168.575a	1069.40a	599.662a	225.104a	4.0926a
11	940.56ab	163.201b	1017.12b	591.154ab	229.216a	3.7059b
Anova $p \leq$	0.0101	<.0001	0.0002	0.0221	0.0868	<.0001
Interacción	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
CV (%)	4.035	3.424	3.517	3.662	2.937	3.419

Medias con letra diferentes indican efectos significativos según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p \leq 0.05$. Anova = análisis de varianza. Interacción = B x Ca. CV= coeficiente de variación.

El mayor contenido de N en las plantas de pimiento se presentó en aquellas plantas que se les proporcionó 1.5 ppm de B y 7 meq L⁻¹ de Ca, con una dosis diferente de B el contenido total de N decreció; no obstante, cuando se incrementó la concentración de Ca en la solución a 9 y 11 meq L⁻¹ el mayor contenido de N se obtuvo con 3 ppm de B, con una dosis diferente de B el contenido total de N fue menor, aunque el detrimento fue menos pronunciado que con 7 meq L⁻¹ de Ca (Figura 4A). De igual manera, el contenido total de P y K en las plantas de pimiento fue mayor con 1.5 ppm de B al adicionar 7 y 9 meq L⁻¹ de Ca, pero con una dosis inferior o superior de B el contenido de estos iones decreció, con un detrimento menos marcado con 9 meq L⁻¹ de Ca (Figura 4B y C). El contenido de Ca total en las plantas de pimiento fue mayor con 1.5 y 3 ppm de B y 7 meq L⁻¹ de Ca; mientras que, al incrementar la concentración de Ca a 9 meq L⁻¹ el contenido total de Ca fue mayor con 1.5 ppm de B, superando al contenido alcanzado con 7 meq L⁻¹ de Ca; en tanto

que, al incrementar la concentración de Ca a 11 meq L⁻¹ el contenido total de Ca fue superior con 4.5 ppm de B (Figura 4D).

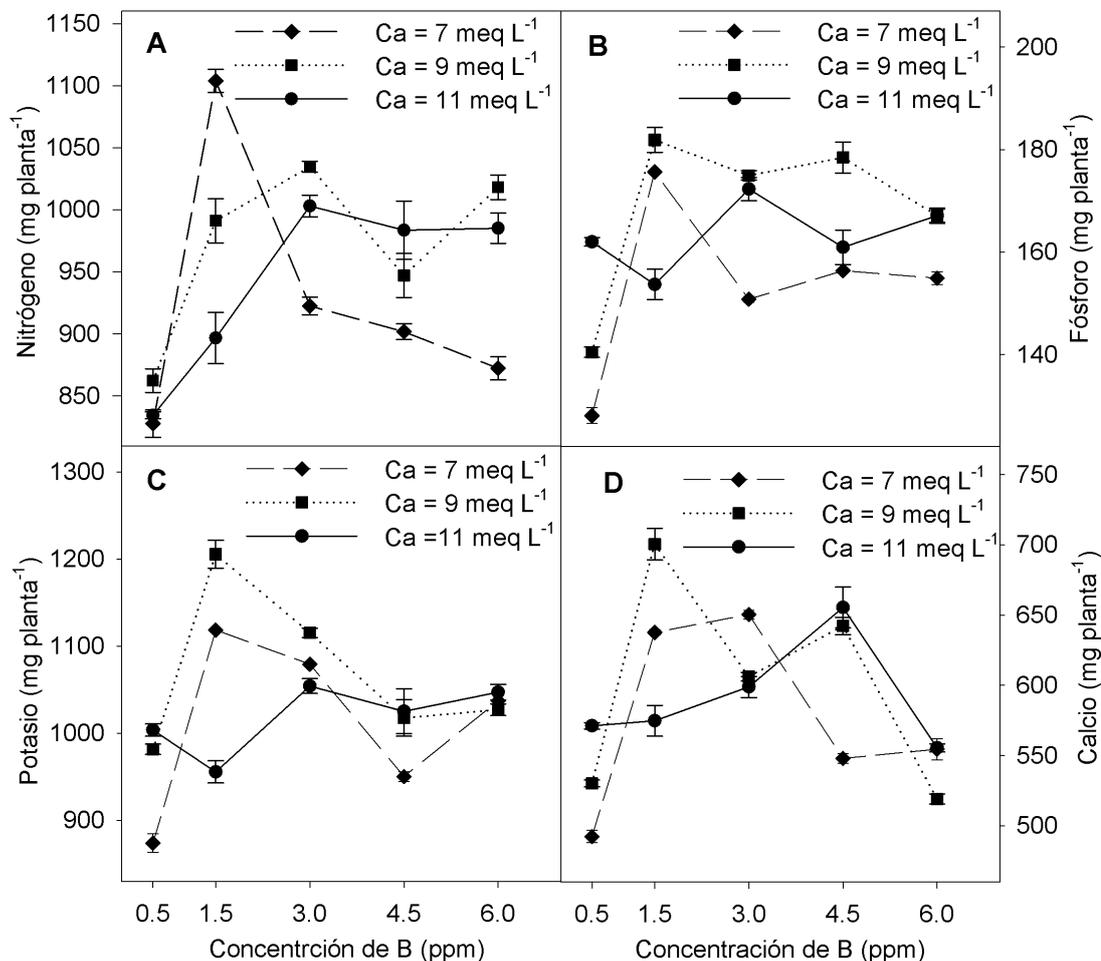


Figura 4. Efecto de las concentraciones de B y Ca en la solución nutritiva sobre el contenido total de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y calcio (Ca) en las plantas de pimiento morrón. Las barras indican el error estándar de la media.

El contenido total de Mg en las plantas de pimiento incrementó al aumentar la dosis de B en la solución nutritiva, observando este comportamiento con las diferentes concentraciones de Ca adicionados a la solución nutritiva; sin embargo, con concentraciones de 7 y 11 meq L⁻¹ de Ca el contenido máximo de Mg se observó con una dosis de 3 ppm de B, pero al adicionar 9 meq L⁻¹ de Ca el mayor contenido total de Mg se presentó con una dosis de 4.5 ppm de B (Figura 5A). Por otro lado, el contenido total de B en las plantas fue mayor con 1.5 y 3 ppm de B al adicionar únicamente 7 meq L⁻¹ de Ca en la solución nutritiva; pero, al incrementar la concentración de Ca a 9 meq L⁻¹ el mayor

contenido total de B se presentó con una dosis de 1.5 ppm de B, diferente a esta dosis el contenido de B decreció; mientras que, al incrementar la dosis de Ca a 11 meq L⁻¹ el contenido de B fue mayor con 1.5 y 6 ppm de B (Figura 5B).

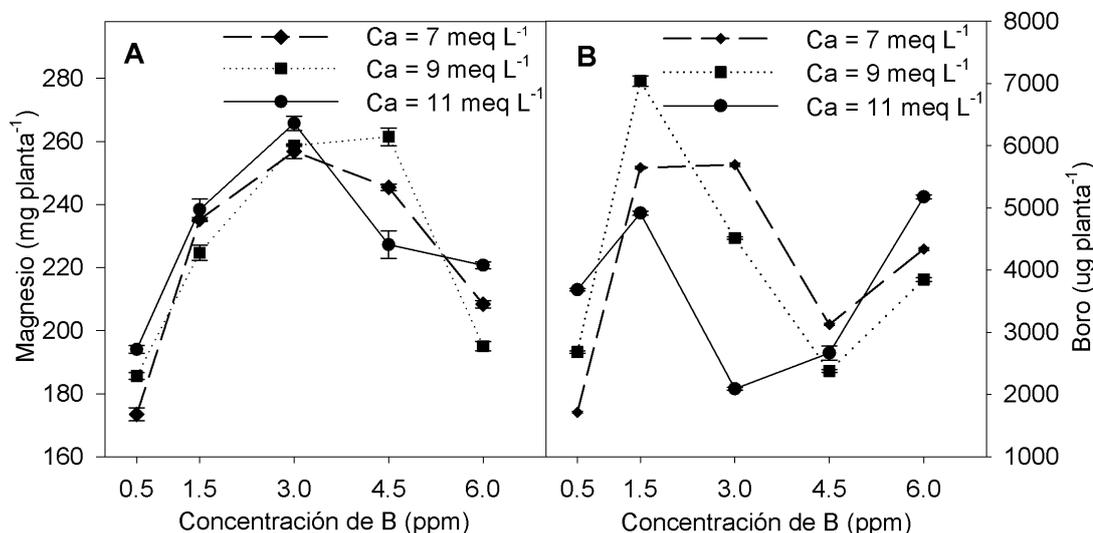


Figura 5. Efecto de las concentraciones de B y Ca en la solución nutritiva sobre el contenido total de magnesio (Mg) y boro (B) en las plantas de pimienta morrón. Las barras indican el error estándar de la media.

El peso de fruto y el rendimiento por planta presentaron diferencias significativas con las concentraciones tanto de B como de Ca, no obstante, solo el rendimiento por planta se afectó de forma significativa con las concentraciones de Ca, sin embargo, las dos variables fueron afectados por la interacción de B y Ca (Tabla 5). El mayor peso de fruto se registró en plantas nutridas 0.5, 1.5 y 3.0 ppm de B. Mientras que el rendimiento por planta se incrementó con la concentración de 0.5 ppm de B (Tabla 5). Por otro lado, una concentración de Ca menor a 11 meq L⁻¹ disminuye el rendimiento por planta (Tabla 8).

Tabla 5. Efecto de la concentración de B y Ca en la solución nutritiva sobre el peso de fruto y rendimiento por plantas de pimiento morrón

B (ppm)	Peso de fruto (g)	Rendimiento (g planta ⁻¹)
0.5	170.822a	731.28a
1.5	161.678ab	594.79bc
3	151.111abc	621.38b
4.5	132.444c	484.94d
6	146.467 bc	538.61cd
Anova $p \leq$	0.0003	<0.0001
Ca (Meq L⁻¹)		
7	152.427a	583.55b
9	153.26a	563.20b
11	151.827a	635.85a
Anova $p \leq$	0.9653	<0.0001
Interacción	0.0011	0.0003
CV %	10.46	6.95

Medias con letra diferentes indican efectos significativos según la prueba de comparación múltiple de Tukey con $p \leq 0.05$. Anova = análisis de varianza. Interacción = B x Ca. CV= coeficiente de variación.

El peso de fruto y rendimiento se vieron influenciado por las concentraciones de B (Figura 11). El peso del fruto se incrementó en las plantas nutridas con 0.5 ppm de B con 9 meq L⁻¹ de Ca. sin embargo, una concentración de 1.5 ppm de B con 11 y 7 ppm de B incrementaron los pesos de los frutos respectivamente, aunque en menor proporción (Figura 6A). Mientras que los mejores rendimientos se obtuvieron en plantas irrigadas con 0.5 ppm de B con 11 meq L⁻¹ de Ca ya que concentración de B superiores a esta tiende a disminuir el rendimiento de las plantas de pimiento morrón (Figura 6B).

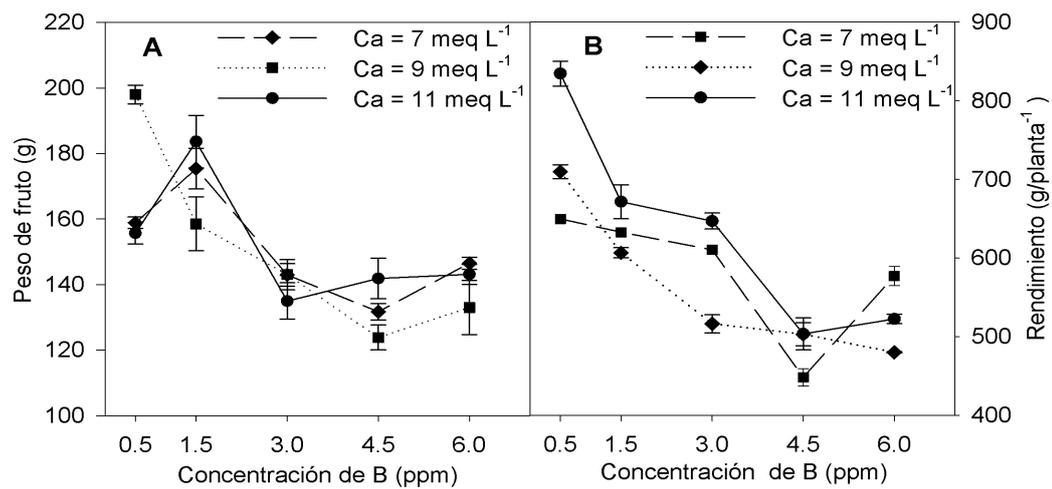


Figura 6. Efecto de las concentraciones de B y Ca en la solución nutritiva sobre el peso de fruto y rendimiento por planta. Las barras indican el error estándar de la media.

DISCUSIÓN

El B es un micronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas y su disponibilidad en el suelo y el agua de riego es de gran importancia para la producción de las especies cultivadas, pues ejerce una función muy importante a nivel fisiológico y bioquímico (Arunkumar *et al.* 2018). Sin embargo, los requerimientos de B pueden variar de una planta a otra, algunas especies toleran hasta 0.5 mg L^{-1} , mientras que otras pueden llegar a tolerar hasta 4 mg L^{-1} , superior a estas concentraciones podría conducir a una toxicidad (Batar, Köksal y Yersel 2009; Princi *et al.*, 2015).

Por otro lado, calcio (Ca) es un nutrimento que cumple con diversas funciones en las células. Siendo quizás una de las más importante la de regulación de la fisiología de la planta desempeñando un papel como mensajero secundario (Gao *et al.*, 2019). El cual se lleva a cabo mediante una acumulación alta de Ca en el citosol de las plantas y funciona como señal que es codificada por proteínas como las calmodulinas que con llevan a una reacción en cadena obteniéndose como resultado la activación de factores de transcripción para la expresión de genes de defensa (Thor, 2019).

El efecto tóxico del B se observó en este trabajo, debido a que las plantas tendieron a reducir su altura al emplear dosis altas de este ion; sin embargo, el efecto de la toxicidad sobre el crecimiento de las plantas de pimiento se redujo al incrementar la concentración de Ca en la solución nutritiva a 9 meq L^{-1} . El beneficio del Ca sobre la toxicidad de B pudo deberse a que al ser éste un mensajero secundario ante condiciones de estrés, el Ca mitigó el estrés causado por B (Gao *et al.* 2019). En tanto que, la longitud de la raíz también fue afectada por dosis altas de B, pero no se observó el efecto positivo del Ca al incrementar su concentración en la solución nutritiva, ya que la mayor longitud de raíz se presentó con una concentración de 7 meq L^{-1} de Ca y 3 ppm de B. Esta respuesta alcanzada pudo deberse a que el B tiene una tendencia a acumularse en las hojas maduras (Takano, Miwa y Fujiwara 2008) y no en la raíz.

El Ca tiene diversas funciones en las plantas entre las cuales está la de mantener estabilidad de la membrana, altera la morfología de las células del

mesófilo vegetal, reduce el número de estomas y aumenta el grado de apertura estomática. lo cual podría con llevar a una mayor o menor perdida de agua en esta investigación las plantas con una mayor transpiración fueron aquellas irrigadas con 3 ppm de B y 9 meq L⁻¹ de Ca. Mientras que una concentración mayor o menos a esta tiende a disminuir la transpiración esto podría deberse a un efecto de sinergismo de entre B y Ca (Arunkumar *et al.*, 2018) en concentraciones bajas de B lo cual aumentaría la apertura estomática. Mientras que con concentraciones altas de B la disminución de la transpiración fue resultado del antagonismo con Ca (Shams *et al.*, 2012). Se ha indicado que las alta concentración de B afecta negativamente el proceso fotosintético, ya que éste ion en exceso daña a las proteínas involucradas con las reacciones de luz en el fotosistema II y la subunidad de H⁺-ATPasa, así como algunas actividades relacionadas con las enzimas Rubisco y la NADP-GAPDH (Han *et al.* 2009; Chen *et al.*, 2014). En este trabajo se obtuvo una reducción de la fotosíntesis al adicionar dosis demasiado altas de B en la solución nutritiva; sin embargo, la inhibición de la actividad fotosintética de las plantas de pimiento morrón fue mitigada al incrementar la concentración de Ca a 9 y 11 meq L⁻¹ en la solución nutritiva, soportando una dosis de hasta 4.5 ppm de B. Tomando en cuenta que el Ca ayuda a las plantas a protegerse contra la peroxidación lipídica, fuga de electrolitos y contenido de H₂O₂ producidos ante diferentes condiciones adversas del medio (Siddiqui *et al.*, 2013), al incrementar la concentración de Ca en la solución nutritiva la planta de pimiento morrón pudo incrementar la absorción de Ca para mitigar en mayor medida el estrés causado en el proceso fotosintético al adicionar una dosis alta de B (4.5 y 6 ppm), comparado al adicionar únicamente 7 meq L⁻¹ de Ca.

La conductancia estomática fue superior con 0.5 y 3 ppm de B con 9 meq L⁻¹ Ca. Así también la conductancia estomática se incrementó con 11 meq L⁻¹ Ca con forme se incrementó las concentraciones de B. Efecto contrario a lo mencionado por (Irfan Qureshi *et al.*, 2005; Aftab *et al.*, 2010) el estrés oxidativo podría ser inducido debido a disminución de la conductancia estomática en respuesta a abióticos estrés. (Qureshi *et al.*, 2005). En consecuencia, de la limitación de CO₂, ya que de que los electrones de PSII están disponibles para formar ácidos grasos de tilacoides y estroma. Por otro

lado, Marschner (1995) mencionan que la producción de biomasa de un cultivo se determina en gran medida por la fotosíntesis, ya que aproximadamente el 90% del peso seco de una planta se considera derivado de los productos formados durante este proceso. En este trabajo se observó que el efecto de las altas concentraciones de B en la solución nutritiva sobre la fotosíntesis también se vio reflejado en la producción de biomasa, donde la mayor actividad de esta variable fisiológica se relacionó con los tratamientos donde se obtuvo la mayor producción de biomasa seca de raíz y hoja, principalmente al adicionar 9 meq L^{-1} de Ca, resultado que pudo deberse a que, además de su participación como segundo mensajero, el Ca cumple funciones en la biogénesis de la pared celular, división, expansión y organización celular (Kölling *et al.* 2019), por lo que al aumentar la dosis de Ca se pudo generar un mayor desarrollo vegetal lo que se reflejó en una mayor biomasa seca.

Según Sarafi, Chatzissavvidis y Therios (2017), una dosis inadecuada de B afecta el estado nutricional de la planta. Por su parte, Princi *et al.* (2015) y Ferreira *et al.* (2020) indican que el exceso de B puede afectar la absorción N por las raíces, esto debido a que hay una alteración de su metabolismo. En este trabajo se observó una reducción del contenido total de N en las plantas de pimiento morrón al incrementar la dosis de B en la solución nutritiva, principalmente cuando se adicionó únicamente 7 meq L^{-1} de Ca; sin embargo, al incrementar la concentración de Ca (9 y 11 meq L^{-1}) en la solución nutritiva el contenido total de N en las plantas presentó un menor detrimento a altas dosis de B, demostrando que al aumentar la concentración de Ca se mantiene el proceso metabólico de la pared celular y el transporte de iones (Tariq y Mott 2007; Sarafi *et al.* 2018a). La reducción de la absorción neta de Nitrato en plantas de tomate debido al exceso de B fue reportado por Princi *et al.* (2016) atribuyendo este efecto a la reducción de la actividad de las proteínas H^+ ATPasa en membrana plasmática de las células de la raíz.

El B se parece al P en sus acciones fisiológicas y bioquímicas, tanto el B como P son componentes de ésteres fisiológicamente activos y forman compuestos polihidroxílicos con algunos complejos orgánicos (Bergmann 1992; Farooq *et al.* 2018). Sin embargo, la relación de B con P aún no está del todo clara (Mühlbachová *et al.* 2017; Farooq *et al.* 2018). En este experimento se

observó que el contenido de P en las plantas de pimiento es afectado por la dosis empleada de B, lo que concuerda con Sarafi *et al.* (2018b), quienes sugieren que hay una dependencia entre el aumento de B en la solución nutritiva y la disminución de la absorción de P; pero, de igual manera que el N, el contenido de P en las plantas fue menos afectado por el exceso de B al incrementar la dosis de Ca en la solución nutritiva (9 y 11 meq L⁻¹). Asimismo, el contenido total de K en las plantas de pimiento también presentó una reducción al aumentar la dosis de B en la solución nutritiva; sin embargo, el efecto del incremento de la concentración del Ca en la solución sobre el efecto inhibitor del exceso de B en el contenido nutrimental únicamente se observó con 9 meq L⁻¹, en tanto que, al incrementar el Ca a 11 meq L⁻¹ se observó un efecto negativo en el contenido de K en las plantas. La respuesta anterior pudo deberse a que el K presenta antagonismo con Ca (Ranade-Malvi 2011). De la misma forma, se observó un detrimento del contenido total de Ca en las plantas de pimiento al aumentar la dosis de B en la solución nutritiva, principalmente con las concentraciones más bajas de Ca (7 y 9 meq L⁻¹) en la solución nutritiva; mientras que, al aumentar la concentración de Ca en la solución a 11 meq L⁻¹ el contenido total de Ca incrementó, con un máximo con 4.5 ppm de B; sin embargo, cuando se empleó una concentración de 9 meq L⁻¹ de Ca en la solución nutritiva se observó una recuperación del contenido total de Ca en la dosis de 4.5 ppm de B, obteniendo semejante contenido total de Ca que el obtenido con 11 meq L⁻¹ de Ca.

El Ca es un nutriente mineral esencial en las plantas, el cual realiza la función de mensajero secundario ante condiciones de estrés (White y Broadley 2003; Rahman *et al.* 2016). La señalización del Ca a condiciones desfavorables se lleva a cabo mediante una acumulación de éste en el citosol, para posteriormente conllevar a una reacción en cadena obteniéndose como resultado la activación de factores de transcripción para la expresión de genes de defensa (Thor 2019). Por lo que la respuesta del contenido total de Ca en este trabajo ante dosis altas de B pudo deberse a que la planta al estar bajo estrés por las dosis altas de B llevó una mayor absorción y acumulación de Ca; sin embargo, esta respuesta dependió de la disponibilidad de Ca en el medio de crecimiento, por lo que el mayor contenido total de Ca con dosis altas de B se presentó con 9 y 11 meq L⁻¹ de Ca. Esta respuesta de las plantas

de pimienta pudo ser responsable del comportamiento de la producción de biomasa seca de hojas y la fotosíntesis ante dosis alta de B y concentraciones altas de Ca en la solución nutritiva.

El efecto adverso de la toxicidad de B en el contenido total de Mg en las plantas de pimienta se observó en este trabajo, sin embargo, no se obtuvo una respuesta positiva del incremento de la concentración del Ca en la solución nutritiva. Por otro lado, el Ca cumple funciones importantes en el mantenimiento de la membrana e integridad celular y la regulación del transporte de iones (Giladi, Tal y Khananshvili 2016). Se ha indicado que la aplicación de Ca puede reducir la absorción de B en plantas de rábano y canola, debido a que disminuye la permeabilidad de la membrana de célula vegetal a este ion (Turan *et al.* 2009; Siddiqui *et al.* 2013; Radi *et al.* 2014; Hua *et al.* 2020). A pesar de que en este trabajo se incrementó la dosis de B en la solución nutritiva, se pudo observar que cuando la dosis de B fue mayor a 1.5 ppm el contenido total de B en las plantas de pimienta se redujo, alcanzando un mínimo con 4.5 ppm de B, con un detrimento más pronunciado al incrementar las concentraciones de Ca en la solución (9 y 11 meq L⁻¹); pero, cuando la dosis de B se incrementó a 6 ppm se observó una recuperación del contenido total de B en las plantas. El menor contenido total de B en las plantas de pimienta alcanzado con una dosis de 4.5 ppm de B y concentraciones de Ca de 9 y 11 meq L⁻¹ concuerda con el incremento del contenido total de Ca por las plantas con estos tratamientos, por lo tanto, el incremento del contenido total de Ca reguló la absorción de B cuando éste se encontraba en altas concentraciones en el medio de crecimiento.

Los frutos con mayores pesos se obtuvieron en las plantas irrigadas con 0.5 ppm de B con 9 meq L⁻¹ de Ca. sin embargo, una concentración de 1.5 ppm de B con 11 y 7 ppm de B incrementaron los pesos de los frutos respectivamente, aunque en menor proporción. Lo cual podría deberse Así como también a las funciones del Ca como son: la biogénesis de la pared celular, división, expansión y organización celular (Kölling *et al.*, 2019). Así como también el importante papel del B en elongación y división celular (Akshit *et al.*, 2020). Además de que el boro está involucrado en el transporte de azúcar siendo componente integral del complejo azúcar-borato, donde el ácido borónico facilita la salida de glucosa y ribonucleósidos de los

liposomas (Atique-ur-Rehman *et al.*, 2018). Presentándose una translocación y redistribución de asimilados desde las hojas viejas a los puntos de crecimiento, particularmente frutos (Atique-ur-Rehman *et al.*, 2018). Lo que podría indicar que las concentraciones bajas podrían cumplir la demanda de boro en los frutos incrementando su peso.

Mientras que los mejores rendimientos se obtuvieron en plantas nutridas con 0.5 ppm de B con 11 meq L⁻¹ de Ca ya que concentración de B superiores a esta tiende a disminuir el rendimiento de las plantas de pimiento morrón. Esto podría ser debido a que el tubo polínico necesita B para germinar y mantener el alargamiento, mientras que Ca juega un papel en determinación de la estructura y función de la pared celular (Fang *et al.*, 2016). Sin embargo, la competencia que presente entre B y Ca que genera una disminución de Ca en plantas con toxicidad de boro (Sotiropoulos *et al.*, 2002; Sarafi, Chatzissavvidis y Therios, 2017b). Dando como resultado un crecimiento irregular del tubo polínico (Fang *et al.*, 2016). Lo que podría generar un menor amarre de fruto.

CONCLUSIÓN

Concentraciones superiores a 1.5 ppm de B puede afectar el crecimiento, producción de biomasa y absorción de nutrientes por las plantas de pimiento morrón; sin embargo, al incrementar la concentración de Ca en la solución nutritiva, principalmente a 9 meq L⁻¹ las plantas pueden tolerar concentraciones más altas de B, mejorando su desarrollo.

.

.

BIBLIOGRAFIA

- Abu-Zahra, T. R. (2012). Vegetative, flowering and yield of sweet pepper as influenced by agricultural practices. *Middle East Journal of Scientific Research*. <https://doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2012.11.09.1612>
- Aftab, T., Khan, M. M. A., Idrees, M., Naeem, M., & Ram, M. (2010). Boron Induced Oxidative Stress, Antioxidant Defence Response and Changes in Artemisinin Content in *Artemisia annua* L. *Journal of Agronomy and Crop Science*. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2010.00427.x>
- Akshit Sheoran, S., R. H., Kumar, S., & Kavinder. (2020). Effect of potassium and boron fertilization on growth, forage yield and quality of berseem (*Trifolium alexandrinum* L.). *Legume Research*, 43(3), 421–426. <https://doi.org/10.18805/LR-4290>
- Aldon, D., Mbengue, M., Mazars, C., & Galaud, J. P. (2018). Calcium signalling in plant biotic interactions. In *International Journal of Molecular Sciences*. <https://doi.org/10.3390/ijms19030665>
- Ali, F., Ali, A., Gul, H., Sharif, M., Sadiq, A., Ahmed, A., Ullah, A., Mahar, A., & Kalhor, S. A. (2015). Effect of Boron Soil Application on Nutrients Efficiency in Tobacco Leaf. *American Journal of Plant Sciences*. <https://doi.org/10.4236/ajps.2015.69139>
- Álvarez Mares, V., Partida Ruvalcaba, L., Godoy Vega, F., Medina Montenegro, H. M., Millán Ocampo, S., Cárdenas Flores, A., & Cárdenas Cota, H. M. (2017). Eficacia de formulaciones y dosis de calcio en el rendimiento de pimiento morrón. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(7), 1689. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i7.162>
- An, C., & Mou, Z. (2011). Salicylic Acid and its Function in Plant Immunity. In *Journal of Integrative Plant Biology*. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2011.01043.x>
- Arrington, M., & DeVetter, L. W. (2017). Foliar applications of calcium and boron do not increase fruit set or yield in northern highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum*). *HortScience*. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI12207-17>
- Arunkumar, B. ., Thippeshappa, G. ., Anjali, M. ., & Prashanth, K. . (2018). Boron : A critical micronutrient for crop growth and productivity. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(2), 2738–2741.
- Atif, R. M., Shahid, L., Waqas, M., Ali, B., Rashid, M. A. R., Azeem, F., Nawaz, M. A., Wani, S. H., & Chung, G. (2019). Insights on calcium-dependent protein kinases (CPKs) signaling for abiotic stress tolerance in plants. In

International Journal of Molecular Sciences.
<https://doi.org/10.3390/ijms20215298>

- Atique-ur-Rehman, Farooq, M., Rashid, A., Nadeem, F., Stuerz, S., Asch, F., Bell, R. W., & Siddique, K. H. M. (2018). Boron nutrition of rice in different production systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(3), 25. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0504-8>
- Batar, T., Köksal, N. S., & Yersel, Ş. E. (2009). Production and characterization of wall plaster with borax and paper wastes and perlite additives. *Ekoloji*. <https://doi.org/10.5053/ekoloji.2009.726>
- Brdar-Jokanović, M. (2020). Boron toxicity and deficiency in agricultural plants. In *International Journal of Molecular Sciences*. <https://doi.org/10.3390/ijms21041424>
- Castro, P. H., Lilay, G. H., & Assunção, A. G. L. (2018). Regulation of Micronutrient Homeostasis and Deficiency Response in Plants. In *Plant Micronutrient Use Efficiency: Molecular and Genomic Perspectives in Crop Plants*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812104-7.00002-2>
- Chatzissavvidis, C., & Antonopoulou, C. (2020). Boron toxicity in fruit crops: Agronomic and physiological implications. In *Fruit Crops*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818732-6.00016-2>
- Chávez-Mendoza, C., Sanchez, E., Muñoz-Marquez, E., Sida-Arreola, J. P., & Flores-Cordova, M. A. (2015). Bioactive compounds and antioxidant activity in different grafted varieties of bell pepper. *Antioxidants*. <https://doi.org/10.3390/antiox4020427>
- Chávez, L.; Álvarez, A. y Ramírez, R. (2012). APUNTES SOBRE ALGUNOS REGULADORES DEL CRECIMIENTO VEGETAL QUE PARTICIPAN EN LA RESPUESTA DE LAS PLANTAS FRENTE AL ESTRÉS ABIÓTICO. *Cultivos Tropicales*.
- Chen, M., Mishra, S., Heckathorn, S. A., Frantz, J. M., & Krause, C. (2014). Proteomic analysis of *Arabidopsis thaliana* leaves in response to acute boron deficiency and toxicity reveals effects on photosynthesis, carbohydrate metabolism, and protein synthesis. *Journal of Plant Physiology*. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.07.008>
- Cho, S. C., Chao, Y. Y., & Kao, C. H. (2012). Calcium deficiency increases Cd toxicity and Ca is required for heat-shock induced Cd tolerance in rice seedlings. *Journal of Plant Physiology*. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2012.02.005>
- Corpas, F. J. (2018). Calcium in plant peroxisomes. What for? *Plant Signaling & Behavior*. <https://doi.org/10.1080/15592324.2018.1449545>

- Danquah, A., de Zelicourt, A., Colcombet, J., & Hirt, H. (2014). The role of ABA and MAPK signaling pathways in plant abiotic stress responses. In *Biotechnology Advances*.
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.09.006>
- Dayod, M., Tyerman, S. D., Leigh, R. A., & Gilliam, M. (2010). Calcium storage in plants and the implications for calcium biofortification. In *Protoplasma*. <https://doi.org/10.1007/s00709-010-0182-0>
- Delgado, C., Pacheco, J., Cabrera, A., Batllori, E., Orellana, R., & Bautista, F. (2010). Quality of groundwater for irrigation in tropical karst environment: The case of Yucatán, Mexico. *Agricultural Water Management*.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.04.006>
- Dodd, A. N., Kudla, J., & Sanders, D. (2010). The language of calcium signaling. *Annual Review of Plant Biology*.
<https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-070109-104628>
- El-Shazoly, R. M., Metwally, A. A., & Hamada, A. M. (2019). Salicylic acid or thiamin increases tolerance to boron toxicity stress in wheat. *Journal of Plant Nutrition*. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1549670>
- El Habbasha, S. F., & Ibrahim, F. M. (2015). Calcium: Physiological function, deficiency and absorption. *International Journal of ChemTech Research*.
- Fang, K., Zhang, W., Xing, Y., Zhang, Q., Yang, L., Cao, Q., & Qin, L. (2016). Boron toxicity causes multiple effects on *Malus domestica* pollen tube growth. *Frontiers in Plant Science*, 7, 208.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00208>
- FAO. 2017. FAOSTAT. <http://faostat3.fao.org/> (consultado 23 de julio 2019)
- Ferreira, G. A., Hippler, F. W. R., Prado, L. A. dos S., Rima, J. A. H., Boaretto, R. M., Quaggio, J. A., Façanha, A. R., & Mattos-Jr, D. (2020). Boron modulates the plasma membrane H⁺ - ATPase activity affecting nutrient uptake of Citrus trees. *Annals of Applied Biology*, May, aab.12630.
<https://doi.org/10.1111/aab.12630>
- Flores, R. A., Rodrigues, R. A., da Cunha, P. P., Damin, V., Arruda, E. M., de Oliveira Abdala, K., & Donegá, M. C. (2018). Grain yield of *Phaseolus vulgaris* in a function of application of boron in soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162018005000701>
- Gao, Q., Xiong, T., Li, X., Chen, W., & Zhu, X. (2019). Calcium and calcium sensors in fruit development and ripening. In *Scientia Horticulturae*.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.04.069>
- Giladi, M., Tal, I., & Khananshvil, D. (2016). Structural features of ion transport

and allosteric regulation in Sodium-Calcium Exchanger (NCX) proteins. *Frontiers in Physiology*, 7, 30. <https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00030>

- GUERREIRO, R. M. J., CAMACHO, E. M., & VEIGA, P. D. Á. B. (2009). Estudio comparativo de la tolerancia al boro de dos variedades de pimiento (*Capsicum annum* L.). *UDO Agrícola*, 9(3), 509–516.
- Han, S., Tang, N., Jiang, H. X., Yang, L. T., Li, Y., & Chen, L. S. (2009). CO₂ assimilation, photosystem II photochemistry, carbohydrate metabolism and antioxidant system of citrus leaves in response to boron stress. *Plant Science*. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2008.10.004>
- He, L., Yu, L., Li, B., Du, N., & Guo, S. (2018). The effect of exogenous calcium on cucumber fruit quality, photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and fast chlorophyll fluorescence during the fruiting period under hypoxic stress. *BMC Plant Biology*. <https://doi.org/10.1186/s12870-018-1393-3>
- Herrera-Rodríguez, M., González-Fontes, A., Rexach, J., Camacho-Cristóbal, J., Maldonado, J., & Navarro-Gochicoa, M. (2010). Role of boron in vascular plants and response mechanisms to boron stresses. *Plant Stress*.
- Hua, T., Zhang, R., Sun, H., & Liu, C. (2020). Alleviation of boron toxicity in plants: Mechanisms and approaches. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1–41. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1807451>
- Irfan Qureshi, M., Israr, M., Abdin, M. Z., & Iqbal, M. (2005). Responses of *Artemisia annua* L. to lead and salt-induced oxidative stress. *Environmental and Experimental Botany*, 53(2), 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.03.014>
- Islam, M. N., & Kawasaki, M. (2015). Evaluation of calcium regulating roles of guttation and calcium oxalate crystals in leaf blades and petioles of hydroponically grown eddo. *Plant Production Science*. <https://doi.org/10.1626/pps.18.11>
- Jang, C. S., Chen, S. K., & Kuo, Y. M. (2012). Establishing an irrigation management plan of sustainable groundwater based on spatial variability of water quality and quantity. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.032>
- Jiang, J. F., Li, J. G., & Dong, Y. H. (2013). Effect of calcium nutrition on resistance of tomato against bacterial wilt induced by *Ralstonia solanacearum*. *European Journal of Plant Pathology*. <https://doi.org/10.1007/s10658-013-0186-7>
- Kölling, M., Kumari, P., & Bürstenbinder, K. (2019). Calcium- and calmodulin-

regulated microtubule-associated proteins as signal-integration hubs at the plasma membrane-cytoskeleton nexus. *Journal of Experimental Botany*, 70(2), 387–396. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery397>

- Kraft, K. H., Brown, C. H., Nabhan, G. P., Luedeling, E., De Jesús Luna Ruiz, J., D'Eeckenbrugge, G. C., Hijmans, R. J., & Gepts, P. (2014). Multiple lines of evidence for the origin of domesticated chili pepper, *Capsicum annum*, in Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. <https://doi.org/10.1073/pnas.1308933111>
- Kurunc, A., Aslan, G. E., Karaca, C., Tezcan, A., Turgut, K., Karhan, M., & Kaplan, B. (2020). Effects of salt source and irrigation water salinity on growth, yield and quality parameters of *Stevia rebaudiana* Bertoni. *Scientia Horticulturae*. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109458>
- Marschner, P. (2012). Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition. In *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition*. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9>
- Martín, R. E. M. (2014). Efectos del aporte de boro sobre el crecimiento radical en plántulas de *Arabidopsis thaliana*. (Tesis Doctoral) Universidad Pablo de Olavide, Sevilla, España, 136.
- Martínez, F. E., Sarmiento, J., Fischer, G., & Jiménez, F. (2009). Síntomas de deficiencia de macronutrientes y boro en plantas de uchuva (*Physalis peruviana* L.). *Agronomía Colombiana*.
- Metwally, A. M., Radi, A. A., El-Shazoly, R. M., & Hamada, A. M. (2018). The role of calcium, silicon and salicylic acid treatment in protection of canola plants against boron toxicity stress. *Journal of Plant Research*. <https://doi.org/10.1007/s10265-018-1008-y>
- Miwa, K., & Fujiwara, T. (2010). Boron transport in plants: Co-ordinated regulation of transporters. In *Annals of Botany*. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq044>
- Moreno-Echeverry, D., Quiroga, I. A., & Enrique Balaguera-López, H. (2016). El estrés por Boro afecta la fotosíntesis y el metabolismo de pigmentos en plantas. *Ciencias Hortícolas*. <https://doi.org/10.17584/rcch.2016v10i1.4189>
- Mühlbachová, G., Čermák, P., Vavera, R., Káš, M., Pechová, M., Marková, K., Kusá, H., Růžek, P., Hlušek, J., & Lošák, T. (2017). Boron availability and uptake under increasing phosphorus rates in a pot experiment. *Plant, Soil and Environment*, 63(11), 483–490. <https://doi.org/10.17221/480/2017-PSE>
- Nagy-Kovács, Z., Davidesz, J., Czihát-Mártonné, K., Till, G., Fleit, E., &

- Grisczek, T. (2019). Water quality changes during riverbank filtration in Budapest, Hungary. *Water (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/w11020302>
- Neef, M., Ecke, M., & Hampp, R. (2015). Real-time Recording of Cytosolic Calcium Levels in *Arabidopsis thaliana* Cell Cultures during Parabolic Flights. *Microgravity Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s12217-015-9461-x>
- Newton, A. C., Bootman, M. D., & Scott, J. (2016). Second messengers. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a005926>
- Ng, S., Ivanova, A., Duncan, O., Law, S. R., Van Aken, O., De Clercq, I., Wang, Y., Carrie, C., Xu, L., Kmiec, B., Walker, H., Van Breusegem, F., Whelan, J., & Giraud, E. (2013). A membrane-bound NAC transcription factor, ANAC017, mediates mitochondrial retrograde signaling in *Arabidopsis*. *Plant Cell*. <https://doi.org/10.1105/tpc.113.113985>
- Osakabe, Y., & Osakabe, K. (2012). Abiotic stress responses in plants. In *Abiotic Stress: New Research*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0634-1>
- Ozturk, M., Sakcali, S., Gucl, S., & Tombuloglu, H. (2010). Boron and plants. In *Plant Adaptation and Phytoremediation*. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9370-7_13
- Princi, M. P., Lupini, A., Araniti, F., Longo, C., Mauceri, A., Sunseri, F., & Abenavoli, M. R. (2015). Boron Toxicity and Tolerance in Plants: Recent Advances and Future Perspectives. In *Plant Metal Interaction: Emerging Remediation Techniques* (pp. 115–147). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803158-2.00005-9>
- Princi, M. P., Lupini, A., Longo, C., Miller, A. J., Sunseri, F., & Abenavoli, M. R. (2016). Long- and short-term effects of boron excess to root form and function in two tomato genotypes. *Plant Physiology and Biochemistry*, 109, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.08.023>
- Radi, A., A., M., A. M., El-Shazoly, R. M., & Hamada, A. M. (2014). Some metabolic responses of boron-stressed canola plants to external application of calcium, silicon and salicylic acid at vegetative growth stage. Some metabolic responses of boron-stressed canola plants to external application of calcium, silicon and sal. *The Egyptian Journal of Experimental Biology (Botany)*, 10(2), 143–154.
- Rahman, A., Mostofa, M. G., Nahar, K., Hasanuzzaman, M., & Fujita, M. (2016). Exogenous calcium alleviates cadmium-induced oxidative stress in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by regulating the antioxidant defense

- and glyoxalase systems: Calcium-induced cadmium stress tolerance in rice. *Revista Brasileira de Botanica*, 39(2), 393–407. <https://doi.org/10.1007/s40415-015-0240-0>
- Raimundi, D. L., Moreira, G. C., & Turri, L. T. (2013). Modos de aplicação de boro na cultura da soja. *Cultivando o Saber*, 6(cm), 112–121.
- Ranade-Malvi, U. (2011). Interaction of micronutrients with major nutrients with special reference to potassium. *Karnataka J. Agric. Sci*, 24(1), 106–109.
- Reyes, A. J., Álvarez-Herrera, J. G., & Fernández, J. P. (2013). Papel del calcio en la apertura y el cierre estomático y sus interacciones con solutos compatibles. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. <https://doi.org/10.17584/rcch.2013v7i1.2040>
- SAGARPA (2017). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. <http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/nayarit/boletines/Paginas/BNSAGENE052017.aspx>
- Salim, B., Abd El- Gawad, H., Abou El-Yazied, A., & 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. <https://doi.org/10.21608/ejoh.2019.6279.1087>
- Sarafi, E., Chatzissavvidis, C., & Therios, I. (2017a). Response of two pomegranate (*Punica granatum* L.) cultivars to six boron concentrations: Growth performance, nutrient status, gas exchange parameters, chlorophyll fluorescence, and proline and carbohydrate content. *Journal of Plant Nutrition*, 40(7), 983–994. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1262403>
- Sarafi, E., Chatzissavvidis, C., & Therios, I. (2017b). Response of two pomegranate (*Punica granatum* L.) cultivars to six boron concentrations: Growth performance, nutrient status, gas exchange parameters, chlorophyll fluorescence, and proline and carbohydrate content. *Journal of Plant Nutrition*. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1262403>
- Sarafi, E., Siomos, A., Tsouvaltzis, P., Chatzissavvidis, C., & Therios, I. (2017). Boron toxicity effects on grafted and non-grafted pepper (*Capsicum annuum*) plants. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017005000032>
- Sarafi, E., Siomos, A., Tsouvaltzis, P., Therios, I., & Chatzissavvidis, C. (2018a). Boron toxicity effects on the concentration of pigments, carbohydrates and nutrient elements in six non-grafted pepper cultivars

(*Capsicum annuum* L.). *Indian Journal of Plant Physiology*, 23(3), 474–485. <https://doi.org/10.1007/s40502-018-0388-2>

Sarafi, E., Siomos, A., Tsouvaltzis, P., Therios, I., & Chatzissavvidis, C. (2018b). The influence of boron on pepper plants nutritional status and nutrient efficiency. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162018005001903>

Sarkar, B., & Islam, A. (2019). Assessing the suitability of water for irrigation using major physical parameters and ion chemistry: a study of the Churni River, India. *Arabian Journal of Geosciences*. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4827-9>

Selahle, K. M., Sivakumar, D., Jifon, J., & Soundy, P. (2015). Postharvest responses of red and yellow sweet peppers grown under photo-selective nets. *Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.034>

Shams, M., Etemadi, N., Baninasab, B., Ramin, A. A., & Khoshgoftarmanesh, A. H. (2012). Effect of boron and calcium on growth and quality of “easy lover” cut rose. *Journal of Plant Nutrition*, 35(9), 1303–1313. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.684123>

SIAP- SAGARPA. 2016. http://nube.siap.gob.mx/cierre_agricola/ (consultado 15 de Agosto 2019)

SIAP (2017). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/232764/Chile_Pimient o_Mayo_2017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/232764/Chile_Pimient_o_Mayo_2017.pdf) (consultado 7 de octubre 2019)

Siddiqui, M. H., Al-Whaibi, M. H., Sakran, A. M., Ali, H. M., Basalah, M. O., Faisal, M., Alatar, A., & Al-Amri, A. A. (2013). Calcium-Induced Amelioration of Boron Toxicity in Radish. *Journal of Plant Growth Regulation*, 32(1), 61–71. <https://doi.org/10.1007/s00344-012-9276-6>

Simón-Grao, S., Nieves, M., Martínez-Nicolás, J. J., Alfosea-Simón, M., Cámara-Zapata, J. M., Fernández-Zapata, J. C., & García-Sánchez, F. (2019). Arbuscular mycorrhizal symbiosis improves tolerance of Carrizo citrange to excess boron supply by reducing leaf B concentration and toxicity in the leaves and roots. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.030>

Sotiropoulos, T. E., Therios, I. N., Dimassi, K. N., Bosabalidis, A., & Kofidis, G. (2002). Nutritional status, growth, CO₂ assimilation, and leaf anatomical responses in two kiwifruit species under boron toxicity. *Journal of Plant Nutrition*, 25(6), 1249-1261. <https://doi.org/10.1081/PLN-120004386>

Takano, J., Miwa, K., & Fujiwara, T. (2008). Boron transport mechanisms: collaboration of channels and transporters. In *Trends in Plant Science*.

<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2008.05.007>

- Tariq, M., & Mott, C. J. B. (2007a). Effect of boron on the behavior of nutrients in soil-plant systems - A review. *Asian Journal of Plant Sciences*, 6, 195–202. <https://doi.org/10.3923/ajps.2007.195.202>
- Tariq, M., & Mott, C. J. B. (2007b). The significance of boron in plant nutrition and environment - A review. *Journal of Agronomy*, 6(1), 1–10. <https://doi.org/10.3923/ja.2007.1.10>
- Thor, K. (2019). Calcium—nutrient and messenger. In *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00440>
- Tognetti, V. B., Mühlenbock, P., & van Breusegem, F. (2012). Stress homeostasis - the redox and auxin perspective. In *Plant, Cell and Environment*. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2011.02324.x>
- Trinidad, S. A., Álvarez, J. W. R., Recalde, C. S. B., Figueredo, J. C. K., & González, A. L. (2015). Fertilización foliar con boro en el cultivo de la soja. *Investigación Agraria*.
- Turan, M. A., Taban, N., & Taban, S. (2009). Effect of calcium on the alleviation of boron toxicity and localization of boron and calcium in cell wall of wheat. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 37(2), 99–103. <https://doi.org/10.15835/nbha3723241>
- Vera, M., Combatt, E. M., & Palencia, M. S. (2014). Estudio de la capacidad de retención de boro disponible en suelos mediante membranas funcionales con cadenas de polioles. *Temas Agrarios*. <https://doi.org/10.21897/rta.v19i1.728>
- White, P. J., & Broadley, M. R. (2003). Calcium in plants. In *Annals of Botany*. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg164>
- Yermiyahu, U., Ben-Gal, A., Keren, R., & Reid, R. J. (2008). Combined effect of salinity and excess boron on plant growth and yield. *Plant and Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9522-z>
- Zaman, M., Shahid, S. A., Heng, L., Zaman, M., Shahid, S. A., & Heng, L. (2018). Irrigation Water Quality. In *Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3_5
- Zhu, J. K. (2016). Abiotic Stress Signaling and Responses in Plants. In *Cell* (pp. 167(2), 313–324). <https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.08.029>