



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

FISIOLOGÍA VEGETAL

RESPUESTAS FISIOLÓGICAS, BIOQUÍMICAS Y NUTRIMENTALES DEL CHILE (*Capsicum annuum* L.) A LA APLICACIÓN DE CADMIO, TALIO Y VANADIO

MARÍA DE LA LUZ BUENDÍA VALVERDE

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTORA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO


2021

La presente tesis titulada: **Respuestas fisiológicas, bioquímicas y nutrimentales del chile (*Capsicum annuum* L.) a la aplicación de cadmio, talio y vanadio**, realizada por la alumna María de la Luz Buendía Valverde, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
FISIOLOGÍA VEGETAL

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA




Dra. Libia Iris Trejo Téllez

ASESOR



Dr. Serafín Cruz Izquierdo

ASESOR



Dr. Rodrigo Aníbal Mateos Nava

ASESOR



Dr. Fernando Carlos Gómez Merino

ASESOR



Dr. Tarsicio Corona Torres

Montecillo, Texcoco, Estado de México, noviembre de 2021

RESPUESTAS FISIOLÓGICAS, BIOQUÍMICAS Y NUTRIMENTALES DEL CHILE (*Capsicum annuum* L.) A LA APLICACIÓN DE CADMIO, TALIO Y VANADIO

María de la Luz Buendía Valverde, D. C.
Colegio de Postgraduados, 2021

RESUMEN

Se evaluaron de forma independiente en cuatro experimentos. En el primero, los efectos del cadmio (Cd), talio (Tl) y vanadio (V) en el estatus foliar de nutrimentos de plantas de chile Jalapeño, Poblano y Serrano tratadas durante 80 d, posteriormente se determinó la concentración de macro y micronutrimentos en el tejido foliar. Los tratamientos con Tl mostraron que la susceptibilidad fue Jalapeño>Serrano>Poblano la menos sensible, la susceptibilidad de Jalapeño se evidenció en las correlaciones negativas significativas de Ca y Mg, así como con las relaciones de concentración Ca:S y Mg:S. También en Jalapeño, la concentración de Tl se asoció de manera positiva con las relaciones de N:K, N:Ca, N:Mg, P:Ca y P:Mg. En Poblano, el Tl se correlacionó de manera significativa y positiva con la relación de concentración foliar Mg:S. En el segundo experimento, los tratamientos con Cd provocaron: alteración de la concentración de P en Jalapeño y Serrano; incremento en la concentración de K en Poblano, aumento en la concentración de S y Mn en las tres variedades; reducciones en la concentración de Ca, Mg y Cu en Jalapeño y la concentración de B y Zn en las tres variedades estudiadas; así mismo, se presentó acumulación de Cd en las hojas de las tres variedades tratadas con Cd. En el tercer experimento, el V estimuló la absorción de N, Fe, Mn en Jalapeño, Poblano y Serrano; de P, Ca, Cu en Poblano y Serrano; de K y Mg en Poblano; de S en Jalapeño y Poblano; y de Zn en Serrano. Finalmente, en un último experimento se evaluaron dieciséis variables de crecimiento, concentración de aminoácidos totales, concentración de azúcares solubles totales, concentración de clorofilas y carotenoides, concentración y contenido de macro y micronutrimentos en plántulas de chile Jalapeño y Serrano después de ser expuestas por 28 d a Cd, Tl y V, observando que las respuestas diferenciales entre las variedades se atribuyen principalmente a la plasticidad fenotípica de cada grupo evaluado con las distintas concentraciones de los metales. La sensibilidad de las variedades fue Poblano>Jalapeño>Serrano, mientras que la toxicidad de los metales ocurrió Tl>Cd>V, donde se destacan los efectos negativos que produce el Tl, y los efectos estimulantes que provoca el V en las plantas estudiadas.

Key words: cadmio, talio, vanádio, metal no esencial, toxicidad.

**PHYSIOLOGICAL, BIOCHEMICAL AND NUTRIMENTAL RESPONSES OF CHILE
(*Capsicum annuum L.*) TO THE APPLICATION OF CADMIUM, THALLIUM AND
VANADIUM**

María de la Luz Buendía Valverde, D. C.
Colegio de Postgraduados, 2021

ABSTRACT

They were independently evaluated in four experiments. In the first, the effects of cadmium (Cd), thallium (Tl) and vanadium (V) on the foliar status of nutrients in Jalapeño, Poblano and Serrano chili plants treated for 80 d, later the concentration of macro and micronutrients was determined in the leaf tissue. The treatments with Tl showed that the susceptibility was Jalapeño > Serrano > Poblano the least sensitive, the susceptibility of Jalapeño was evidenced in the significant negative correlations of Ca and Mg, as well as with the concentration relationships Ca: S and Mg: S. Also in Jalapeño, Tl concentration was positively associated with N: K, N: Ca, N: Mg, P: Ca and P: Mg ratios. In Poblano, Tl was significantly and positively correlated with the foliar concentration ratio Mg: S. In the second experiment, the treatments with Cd caused: alteration of the concentration of P in Jalapeño and Serrano; increase in the concentration of K in Poblano, increase in the concentration of S and Mn in the three varieties; reductions in the concentration of Ca, Mg and Cu in Jalapeño and the concentration of B and Zn in the three varieties studied; Likewise, there was accumulation of Cd in the leaves of the three varieties treated with Cd. In the third experiment, V stimulated the absorption of N, Fe, Mn in Jalapeño, Poblano and Serrano; of P, Ca, Cu in Poblano and Serrano; of K and Mg in Poblano; of S in Jalapeño and Poblano; and of Zn in Serrano. Finally, in a last experiment, sixteen growth variables were evaluated, concentration of total amino acids, concentration of total soluble sugars, concentration of chlorophylls and carotenoids, concentration and content of macro and micronutrients in Jalapeño and Serrano pepper seedlings after being exposed for 28 gives Cd, Tl and V, observing that the differential responses between the varieties are mainly attributed to the phenotypic plasticity of each group evaluated with the different concentrations of the metals. The sensitivity of the varieties was Poblano > Jalapeño > Serrano, while the toxicity of metals occurred Tl > Cd > V, where the negative effects that Tl produces, and the stimulating effects that V causes in the plants studied are highlighted.

Key words: cadmium, thallium, vanadium, non-essential metal, toxicity.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada durante la realización de mis estudios de doctorado. Número de **CVU: 714545**

Al Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, por brindarme la oportunidad de desarrollarme académicamente y fomentar mis conocimientos a través de sus catedráticos.

Al Posgrado de Fisiología Vegetal, por darme las herramientas necesarias y guiarme en el proceso.

A la Dra. Libia Iris Trejo Téllez por su apoyo como mi consejera, por haberme dado la oportunidad de continuar en el camino de la investigación, por guiar mi proyecto, pero, sobre todo, por su amistad ante dificultades personales.

Al Dr. Tarsicio Corona Torres que de manera cordial me brindó su apoyo como asesor y quien atentamente y con dedicación me ha enseñado técnicas de citogenética vegetal.

Al Dr. Fernando Carlos Gómez Merino por sus valiosas sugerencias, y por ayudarme a concluir este proyecto.

Al Dr. Rodrigo Aníbal Mateos Nava por sus valiosas aportaciones al documento de tesis, por su paciencia y amistad.

Al Dr. Serafín Cruz Izquierdo por haberme brindado su apoyo y fomentar mi participación en diversos eventos científicos.

Al equipo de trabajo del laboratorio de Nutrición Vegetal, a la Dra. Lupita y Don Wences, que amablemente, me apoyaron en el análisis químico de mi investigación.

Al equipo de trabajo del laboratorio de Citogenética, a la Ing. Irma y al Dr. Armando García por sus enseñanzas.

A mis compañeros, por la fortuna de haber coincidido.

A todas las personas que directa o indirectamente contribuyeron a la realización de la presente investigación, ¡Gracias!

DEDICATORIA

A mis padres:

Luz María Valverde Gálvez y Cayetano Buendía Jiménez

Por estar siempre conmigo.

A mis hijos:

Misael y Luis Alberto

Por ser la alegría y el motor de mi vida.

¡Gracias a todos!

Sinceramente

María de la Luz Buendía Valverde.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE CUADROS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
INTRODUCCIÓN	1
Metales no esenciales en plantas superiores	2
Biodisponibilidad, acceso y traslocación	2
Toxicidad y efectos de metales no esenciales	4
Mecanismos de tolerancia a metales no esenciales	5
CAPÍTULO I. ESTATUS FOLIAR DE NUTRIMENTOS EN TRES VARIEDADES DE CHILE TRATADAS CON TALIO	7
1.1. RESUMEN	7
1.2. INTRODUCCIÓN	8
1.3. MATERIAL Y MÉTODOS	9
1.3.1. Análisis estadístico	10
1.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	10
1.4.1. Concentración foliar de macronutrientes	10
1.4.2. Concentración foliar de micronutrientes	17
1.4.3. Relaciones macronutrientales	20
1.5. CONCLUSIONES	26
CAPÍTULO 2. ESTATUS NUTRIMENTAL DE TRES VARIEDADES DE CHILE TRATADAS CON CADMIO	27
2.1. RESUMEN	27
2.2. INTRODUCCIÓN	28
2.3. MATERIALES Y MÉTODOS	29
2.3.1. Ubicación del estudio y condiciones experimentales	29
2.3.2. Material vegetal	29
2.3.3. Manejo nutricional	29
2.3.4. Diseño de tratamientos y diseño experimental	30
2.3.5. Análisis foliar de nutrientes	30

2.3.6. Análisis estadístico.....	30
2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
2.4.1. Concentración foliar de macronutrientos.....	30
2.4.2. Concentración foliar de micronutrientos.....	36
2.4.3. Concentración foliar de Cd.....	41
2.4.4. Correlaciones significativas entre concentraciones foliares de Cd y de los nutrientos	42
2.5. CONCLUSIONES.....	43
CAPÍTULO 3. ESTATUS NUTRIMENTAL DE TRES VARIEDADES DE CHILE	
TRATADAS CON VANADIO.....	44
3.1. RESUMEN.....	44
3.2. INTRODUCCIÓN.....	45
3.3. MATERIAL Y MÉTODOS	47
3.3.1 Análisis estadístico.....	47
3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	47
3.4.1. Concentración foliar de macronutrientos.....	47
3.4.2. Concentración foliar de micronutrientos.....	53
3.5. CONCLUSIONES.....	57
CAPÍTULO 4. VARIABLES DE CRECIMIENTO EN PLÁNTULAS DE CHILE	
TRATADAS CON METALES	58
4.1. RESUMEN.....	58
4.2. INTRODUCCIÓN.....	59
4.3. MATERIAL Y MÉTODOS	60
4.3.1. Ubicación del estudio y condiciones experimentales	60
4.3.2. Material vegetal	60
4.3.3. Manejo nutricional y condiciones de crecimiento.....	60
4.3.4. Variables de crecimiento.....	60
4.3.5. Concentración de Aminoácidos totales en hojas.....	61
4.3.6. Concentración de azúcares solubles totales en hojas	61
4.3.7. Concentración de clorofilas y carotenoides en hojas.....	62
4.3.8. Análisis foliar de nutrientes	62

4.3.9. Análisis estadístico.....	62
4.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	63
4.4.1. Longitud de vástago	63
4.4.2. Longitud de raíz.....	64
4.4.3. Longitud total de plántula	64
4.4.4. Diámetro de tallo	65
4.4.5. Número total de hojas	65
4.4.6. Área foliar	65
4.4.7. Volumen radical.....	66
4.4.8. Botones florales.....	66
4.4.9. Biomasa fresca de hoja.....	67
4.4.10. Biomasa fresca de tallo.....	67
4.4.11. Biomasa fresca de raíz.....	67
4.4.12. Biomasa fresca total	68
4.4.13. Biomasa seca de hoja.....	69
4.4.14. Biomasa seca de tallo.....	69
4.4.15. Biomasa seca de raíz.....	69
4.4.16. Biomasa seca total.....	70
4.4.17. Concentración de aminoácidos totales en hojas	74
4.4.18. Concentración de azúcares solubles totales en hojas	74
4.4.19. Concentración de clorofilas y carotenoides en hojas.....	75
4.4.20. Concentración foliar de macro y micronutrientos	77
4.4.21. Contenido foliar de macro y micronutrientos	78
4.5. CONCLUSIONES.....	85
CONCLUSIONES GENERALES.....	86
LITERATURA CITADA	87

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.1. Relación de concentración nutrimental en hojas de chile Jalapeño tratado con Tl durante 80 d.	22
Cuadro 1.2. Relación de concentración nutrimental en hojas de chile Poblano tratado con talio (Tl) durante 80 d.	23
Cuadro 1.3. Relación de concentración nutrimental en hojas de chile Serrano tratado con talio (Tl) durante 80 d.	24
Cuadro 1.4. Correlaciones Pearson significativas entre la concentración de talio (Tl) en la solución nutritiva y las variables evaluadas en tres variedades de chile.....	25
Cuadro 4.1. Variables de crecimiento en plántulas de chile Jalapeño y Serrano tratadas con Cd durante 30 d.	71
Cuadro 4.2. Variables de crecimiento en plántulas de chile Jalapeño y Serrano tratadas con Tl durante 30 d.	72
Cuadro 4.3. Variables de crecimiento en plántulas de chile Jalapeño y Serrano tratadas con V durante 30 d.....	73
Cuadro 4.4. Concentración de clorofilas, relación clorofila a/b y carotenoides ($\mu\text{g g}^{-1}$ de biomasa fresca) de hojas de chile Jalapeño y Serrano expuestas a Cd por 30 d.....	76
Cuadro 4.5. Concentración de clorofilas, relación clorofila a/b y carotenoides ($\mu\text{g g}^{-1}$ de biomasa fresca) de hojas de chile Jalapeño y Serrano expuestas a Tl por 30 d.	77
Cuadro 4.6. Concentración de clorofilas, relación clorofila a/b y carotenoides ($\mu\text{g g}^{-1}$ de biomasa fresca) de hojas de chile Jalapeño y Serrano expuestas a V por 30 días.	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tabla periódica de los elementos	1
Figura 2. Ruta principal de absorción y transporte de metales en las plantas	4
Figura 1.1. Concentración foliar de nitrógeno (N) en tres variedades de chile tratadas con Tl durante 80 d.....	11
Figura 1.2. Concentración foliar de fósforo (P) en tres variedades de chile tratadas con Tl durante 80 d.....	12
Figura 1.3. Concentración foliar de potasio (K) en tres variedades de chile tratadas con Tl durante 80 d.....	13
Figura 1.4. Concentración foliar de calcio (Ca) en tres variedades de chile tratadas con Tl durante 80 d.....	14
Figura 1.5. Concentración foliar de magnesio (Mg) en tres variedades de chile tratadas con Tl durante 80 d.....	15
Figura 1.6. Concentración foliar de azufre (S) en tres variedades de chile tratadas con Tl durante 80 d.....	16
Figura 1.7. Concentración foliar de boro (B) en tres variedades de chile tratadas con Tl durante 80 d.....	17
Figura 1.8. Concentración foliar de cobre (Cu) en tres variedades de chile tratadas con Tl durante 80 d.....	18
Figura 1.9. Concentración foliar de hierro (Fe) en tres variedades de chile tratadas con Tl durante 80 d.....	19
Figura 1.10. Concentración foliar de manganeso (Mn) en tres variedades de chile tratadas con Tl durante 80 d.....	19
Figura 1. 11. Concentración foliar de zinc (Zn) en tres variedades de chile tratadas con Tl durante 80 d.....	20
Figura 2.1. Concentración foliar de nitrógeno (N) en tres variedades de chile tratadas con Cd durante 80 d.....	31

Figura 2.2. Concentración foliar de fósforo (P) en tres variedades de chile tratadas con Cd durante 80 d.....	32
Figura 2.3. Concentración foliar de potasio (K) en tres variedades de chile tratadas con Cd durante 80 d.....	33
Figura 2.4. Concentración foliar de calcio (Ca) en tres variedades de chile tratadas con Cd durante 80 d.....	34
Figura 2.5. Concentración foliar de magnesio (Mg) en tres variedades de chile tratadas con Cd durante 80 d.....	35
Figura 2.6. Concentración foliar de azufre (S) en tres variedades de chile tratadas con Cd durante 80 d.....	36
Figura 2.7. Concentración foliar de boro (B) en tres variedades de chile tratadas con Cd durante 80 d.....	37
Figura 2.8. Concentración foliar de cobre (Cu) en tres variedades de chile tratadas con Cd durante 80 d.....	38
Figura 2.9. Concentración foliar de hierro (Fe) en tres variedades de chile tratadas con Cd durante 80 d.....	39
Figura 2. 10. Concentración foliar de manganeso (Mn) en tres variedades de chile tratadas con Cd durante 80 d.....	40
Figura 2.11. Concentración foliar de zinc (Zn) en tres variedades de chile tratadas con Cd durante 80 d.....	41
Figura 2.12. Concentración foliar de cadmio (Cd) en tres variedades de chile tratadas con Cd durante 80 d.....	42
Figura 2.13. Coeficientes de correlación significativos entre la concentración foliar de Cd y la de nutrimentos en tres variedades de chile tratadas con Cd durante 80 d.....	43
Figura 3.1. Concentración foliar de nitrógeno (N) en tres variedades de chile tratadas con V durante 80 d.....	48
Figura 3.2. Concentración foliar de fósforo (P) en tres variedades de chile tratadas con V durante 80 d.....	49
Figura 3.3. Concentración foliar de potasio (K) en tres variedades de chile tratadas con V durante 80 d.....	50

Figura 3.4. Concentración foliar de calcio (Ca) en tres variedades de chile tratadas con V durante 80 d.....	51
Figura 3.5. Concentración foliar de magnesio (Mg) en tres variedades de chile tratadas con V durante 80 d.....	51
Figura 3.6. Concentración foliar de azufre (S) en tres variedades de chile tratadas con V durante 80 d.....	52
Figura 3.7. Concentración foliar de boro (B) en tres variedades de chile tratadas con V durante 80 d.....	53
Figura 3.8. Concentración foliar de cobre (Cu) en tres variedades de chile tratadas con V durante 80 d.....	54
Figura 3.9. Concentración foliar de hierro (Fe) en tres variedades de chile tratadas con V durante 80 d.....	55
Figura 3.10. Concentración foliar de manganeso (Mn) en tres variedades de chile tratadas con V durante 80 d.....	56
Figura 3.11. Concentración foliar de zinc (Zn) en tres variedades de chile tratadas con V durante 80 d.....	56
Figura 4.1. Aminoácidos totales en hojas de chile Jalapeño y Serrano tratadas con Cd, Tl y V durante 30 d.....	74
Figura 4.2. Azúcares totales en hojas de chile Jalapeño y Serrano tratadas con Cd, Tl y V durante 30 d.....	75
Figura 4.3. Concentración foliar de macronutrientes y micronutrientes de plántulas de chile tratadas con Cd por 30 d.....	79
Figura 4.4. Concentración foliar de macronutrientes y micronutrientes de plántulas de chile tratadas con Tl por 30 d.....	80
Figura 4.5. Concentración foliar de macronutrientes y micronutrientes de plántulas de chile Jalapeño y Serrano tratadas con V por 30 d.....	81
Figura 4.6. Contenido foliar de macronutrientes y micronutrientes de plántulas de chile Jalapeño y Serrano tratadas con Cd por 30 d.....	82
Figura 4.7. Contenido foliar de macronutrientes y micronutrientes de plántulas de chile Jalapeño y Serrano tratadas con Tl por 30 d.....	83

Figura 4.8. Contenido foliar de macronutrientes y micronutrientes de plántulas de Chile
Jalapeño y Serrano tratadas con V por 30 d..... 84

INTRODUCCIÓN

Los metales son elementos químicos que tienen la capacidad de conducir calor, resistencia eléctrica, maleabilidad, ductilidad y brillo, estas propiedades les da una posición específica en la tabla periódica, haciendo que el carácter metálico disminuya de izquierda a derecha y de abajo hacia arriba (**Figura 1**), lo anterior ha llevado a clasificarlos en: alcalinos, alcalino-térreos, de transición, metaloides y metales del bloque *p* (Appenroth, 2010; Alcántar *et al.*, 2016).

Metales alcalinos																			
1a																	2		
1 H	Metales alcalino térreos																2 He		
	1a											10a							
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne		
Metales de Transición																			
11 Na	12 Mg											Grupo Pb		13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
		IIIb	IVb	Vb	VIb	VIIb	VIIIb	IXb	Xb	XIb	XIIb								
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr		
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe		
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn		
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112	113	114	115	116				
Lantánidos		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			
Actínidos		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr			

Figura 1. Tabla periódica de los elementos. Metales y no metales (elementos del grupo del plomo en el lado derecho, muy relevante para la definición de “metal pesado”) (Tomado de Appenroth, 2010).

Dentro de los metales de transición se encuentran elementos como el cadmio (Cd) y el vanadio (V), éstos se caracterizan por tener un electrón desapareado en su último orbital, lo cual les permite aceptar o donar un electrón, éste puede transferirse al oxígeno (O₂) y formar especies reactivas de oxígeno (ERO) (Gupta *et al.*, 2019; Houri, 2020).

Por su parte, los elementos del bloque *p*, en ocasiones son definidos “metales pesados”, término utilizado para nombrar a metales que poseen alta densidad (de 5 a 7 g cm⁻³), aunque algunos autores sugieren que desde 3.5 g cm⁻³ pueden considerarse “pesados”. Ahora bien, en los últimos años se ha debatido a cerca del mal uso del término “metal pesado”, sugiriendo que debe tener en cuenta, por una parte, que su efecto siempre depende de la concentración y no de su densidad, y,

en segundo lugar, que algunos iones metálicos son necesarios en bajas concentraciones en el metabolismo de los organismos (Duffus, 2002; Appenroth, 2010).

En las últimas décadas, con el incremento de las actividades antropogénicas y el crecimiento de la población, se ha observado una excesiva dispersión de metales no esenciales al ambiente, lo que se ha convertido en problema de contaminación a nivel mundial, ya que su presencia en la atmósfera, en el suelo y en el agua, desencadena la absorción de estos iones metálicos en los organismos y causa problemas de bioacumulación en la cadena alimenticia, lo que pone en riesgo la seguridad alimentaria del hombre al limitar la productividad de los cultivos (Di Toppi & Gabbrielli, 1999; Singh *et al.*, 2016; Rai *et al.*, 2019).

En la actualidad, la información que se tiene de los efectos de metales no esenciales en plantas son controversiales, por ello es necesario llevar a cabo trabajos que permitan conocer cómo ocurren estos procesos en distintas especies, tal es el caso de hortalizas de consumo humano (Gupta *et al.*, 2019).

Metales no esenciales en plantas superiores

Biodisponibilidad, acceso y traslocación

La presencia de altas concentraciones de metales no esenciales en el suelo es la principal causa para su acumulación en plantas, este proceso está regulado por la biodisponibilidad del metal (cantidad de metal disponible para las plantas), la cual se encuentra modulada por la materia orgánica, el pH, el potencial redox, la temperatura y la concentración de otros elementos (Di Toppi & Gabbrielli, 1999; Khan *et al.*, 2015; Vila, 2018).

Es importante hacer notar que existen diferencias entre la capacidad de absorción de metales en plantas superiores, por ello se han clasificado de acuerdo con la cantidad de metal que la especie puede absorber, tal es el caso de las acumuladoras, hiperacumuladoras y exclusoras (Gupta *et al.*, 2019; Angulo-Bejarano *et al.*, 2021).

Aunque la absorción de metales no esenciales ocurre principalmente en la raíz, las plantas a través de su evolución han desarrollado estructuras absorbentes en sus órganos aéreos como hojas, tallos, flores y frutos, dónde los mecanismos de absorción son muy similares a los desarrollados en la raíz de la planta (González-Guerrero *et al.*, 2016), tal es el caso de la transferencia foliar, la cual

puede ocurrir a través de la cutícula y por los poros estomáticos y es una de las principales vías de acceso y acumulación de metales en plantas (Shahid *et al.*, 2017; Gupta *et al.*, 2019).

En el suelo, los metales no esenciales se encuentran formando parte de la solución del mismo, donde estar disponibles para las plantas, utilizan las mismas rutas de acceso a la raíz que los nutrientes esenciales, su adsorción en la superficie de la raíz ocurre en forma catiónica con la pared celular negativa debido a la presencia de celulosa, pectinas y glicoproteínas cuya función es intercambiar iones específicos (Arif *et al.*, 2016; Rai *et al.*, 2019). Además, las plantas han desarrollado estrategias para hacer más eficiente la absorción de metales, tal como la acidificación, la secreción de quelantes orgánicos y la expresión de transportadores de metales de alta afinidad (DalCorso *et al.*, 2014). Dentro de la raíz, los iones metálicos pueden seguir dos rutas: vía apoplasto (transporte pasivo por difusión), movimiento por medio del espacio del córtex; y vía simplasto (transporte activo por transportadores), desplazamiento a través de los plasmodesmos, atravesando el citoplasma de células vecinas (Alcántar *et al.*, 2016; González-Guerrero *et al.*, 2016).

Se ha determinado que iones de Cd acceden a través de difusión y son transportados por proteínas específicas de iones de hierro (Fe^{2+}) y zinc (Zn^{2+}) a través de la membrana plasmática; una vez en el citosol, el Cd puede ser transportado a otros organelos celulares como, el cloroplasto y la mitocondria, y, formar complejos con proteínas, finalmente, puede ser transportado hasta la vacuola de las células de la raíz, donde puede ser compartimentalizado o transportado como ion libre a través del xilema para distribuirse por toda la planta (Di Toppi & Gabbrielli, 1999; Khan *et al.*, 2015). De manera general, cuando los iones quedan atrapados en la raíz, es común encontrar concentraciones más altas del metal en este órgano en comparación con otros (Angulo-Bejarano *et al.*, 2021).

Los iones metálicos son transportados a través del xilema por la corriente de transpiración, alcanzando tejidos de órganos aéreos como las hojas, en donde pueden acumularse si no son redistribuidos por el floema a toda la planta (**Figura 2**) (DalCorso *et al.*, 2014; Gupta *et al.*, 2019).

De los transportadores más conocidos es el AtZIP2 localizado en la estela de la raíz de *Arabidopsis thaliana*, el cual transporta Zn^{2+} , y facilita su liberación hacia el xilema, permitiendo su distribución a otros órganos (Arif *et al.*, 2016; González-Guerrero *et al.*, 2016). Otros transportadores de metales son los ZIP, NRAMP, Yellow Stripe (YS) y COPT, los cuales

participan en los procesos de captación, transporte y secuestro de metales en el citosol; así mismo, las familias de proteínas ATPasas transportadoras de metales pesados (HMAs) y las ferroportinas (FPN) están involucradas en la salida de metales al exterior de la célula (DalCorso *et al.*, 2014).

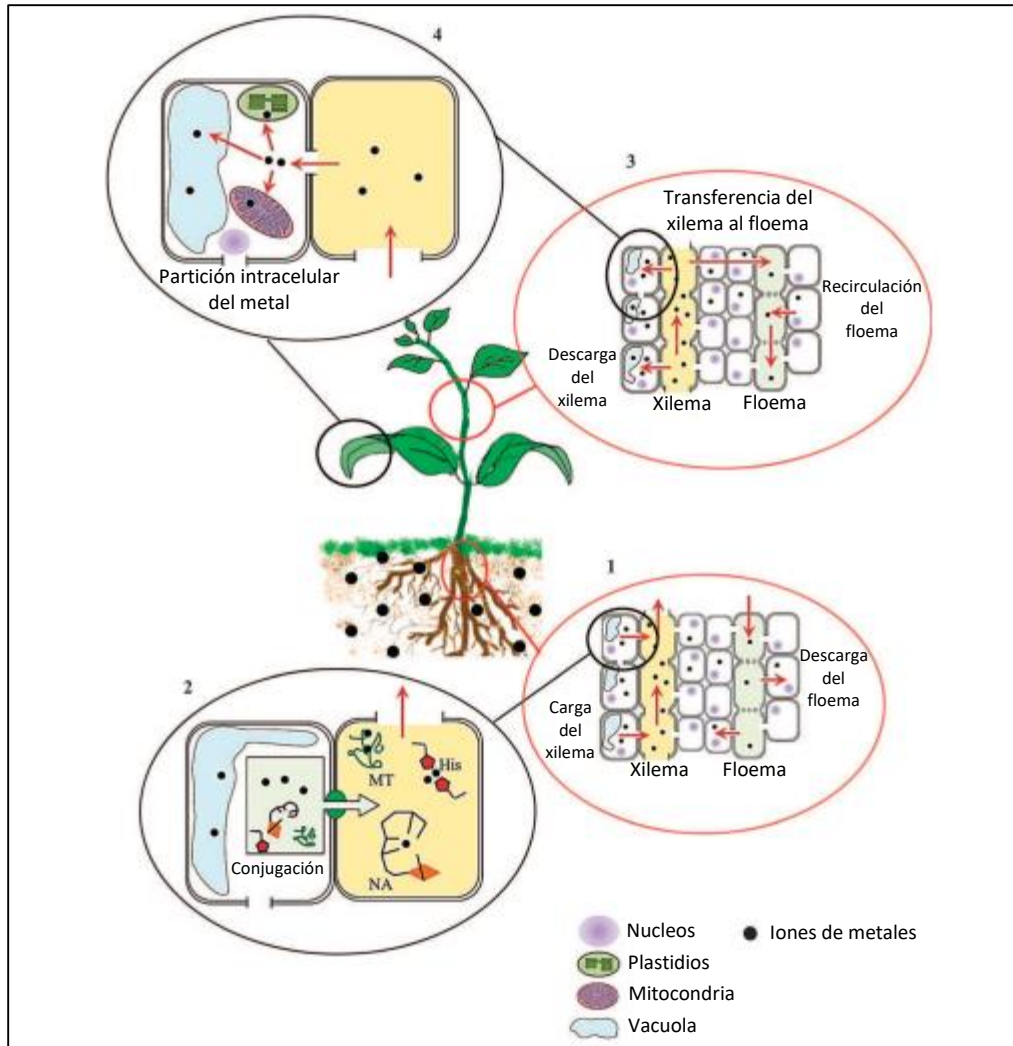


Figura 2. Ruta principal de absorción y transporte de metales en las plantas. Después de la absorción en la raíz, los iones metálicos llegan al xilema: 1) Como iones libres o en formas conjugadas; 2) Siguiendo la corriente de agua, los iones salen del xilema y van al brote; 3) En los tejidos de los brotes, los iones metálicos llegan a los organelos celulares; 4) Una pequeña parte de iones se puede transferir al floema y regresar a la raíz (Tomado de DalCorso *et al.*, 2014).

Toxicidad y efectos de metales no esenciales

La exposición a metales no esenciales en plantas superiores puede causar alteraciones a nivel fisiológico (fotosíntesis, clorosis, absorción de nutrientes), morfológico (reducción del

crecimiento, rizado de hojas), bioquímico (pérdida de la membrana) y molecular (inactivación de proteínas) (Jozefczak *et al.*, 2012).

Dentro de los efectos que provocan los metales no esenciales se encuentra la sustitución de nutrimentos esenciales debido a la competencia por los sitios de absorción y transporte, impactando directamente en el crecimiento y la reproducción de las plantas, lo que puede poner en riesgo la producción agroalimentaria (Singh *et al.*, 2016).

Ahora bien, quizá el principal problema que acarrearán los metales no esenciales en las plantas es que, al formar parte de la cadena alimenticia, su ingesta a través de hortalizas contaminadas con niveles superiores a los establecidos por diversas organizaciones, pone en riesgo la salud humana al provocar trastornos a nivel sistema nervioso central (discapacidad intelectual en niños y depresión en adultos), enfermedades renales y hepáticas, entre otras (USEPA, 2015; Gupta *et al.*, 2019).

Mecanismos de tolerancia a metales no esenciales

La evolución ha permitido que las plantas desarrollen estrategias para hacer frente al estrés abiótico producido por metales, entre las más importantes tenemos: la capacidad de reducir la absorción y entrada del metal; la compartimentación en la pared celular y la quelación en las vacuolas de la raíz; la activación del sistema antioxidante; la regulación de fitoquelatinas; y el cambio de expresión de proteínas que transportan metales (Angulo-Bejarano *et al.*, 2021).

Entre las anteriores, el daño oxidativo es quizá la principal respuesta de las plantas ante el estrés por metales, ya que la formación de ERO, como el superóxido ($O_2^{\cdot-}$), el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y el radical hidroxilo (HO^{\cdot}) alteran la homeostasis de la planta; por tanto, una defensa que las células vegetales han desarrollado es la activación del sistema antioxidante, del que destacamos a las enzimas superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), peroxidasa, reductasa, redoxina y otros metabolitos como el glutatión (GSH, γ -glu-cys-gly) y el ascorbato (AsA) cuya función es mantener el equilibrio redox para prevenir daño celular (Jozefczak *et al.*, 2012; Gupta *et al.*, 2019).

La quelación es otro de los mecanismos para contrarrestar la toxicidad de metales, aquí participan moléculas de GSH, fitoquelatinas (PCs) y metalotioneínas (MT), las cuales se unen a los metales para formar complejos y facilitar su transporte y secuestro (Dubey *et al.*, 2018).

En el caso específico del GSH, su forma reducida tiene la capacidad de regular la absorción de azufre en la raíz y al contener cisteína, su grupo tiol puede quelatar iones metálicos, o bien, donar un electrón reductor directamente a moléculas inestables de ERO, al donar este electrón se vuelve reactivo, sin embargo se une fácilmente a otra molécula de GSH reactiva y se forma GSSG (glutación en su forma oxidada), el cual por medio de la glutación reductasa (GR) y a expensas de NADPH vuelve a formar GSH (Jozefczak *et al.*, 2012).

Los complejos de PCs que se forman con metales, por ejemplo, los de Cd-PCs, han sido estudiados en plantas de *Nitzschia palea* expuestas a 0, 0.1 y 0.2 mg Cd L⁻¹, donde se ha confirmado que facilitan el transporte de iones de Cd del citosol hacia la vacuola para ser almacenado (Figueira *et al.*, 2014).

Por otra parte, las MT son proteínas ricas en cisteína que quelan metales formando complejos MT-metal, estas moléculas son el resultado de traducción de ARNm que se expresa en respuesta a estrés abiótico (De Araújo *et al.*, 2017).

Los avances científicos en las últimas décadas están permitiendo que ciencias como la metabolómica, la transcriptómica, la proteómica y la ionómica proyecten nueva información sobre la caracterización de metabolitos, factores de transcripción y proteínas involucradas en la tolerancia de metales pesados, para generar cultivos más tolerantes a metales no esenciales (Singh *et al.*, 2016).

CAPÍTULO I. ESTATUS FOLIAR DE NUTRIMENTOS EN TRES VARIEDADES DE CHILE TRATADAS CON TALIO

1.1.RESUMEN

Se evaluaron los efectos del talio (Tl) en la concentración foliar de macronutrientos (N, P, K, Ca, Mg y S) y micronutrientos (B, Cu, Fe, Mn y Zn) en tres variedades de chile (*Capsicum annuum* L.): Jalapeño, Poblano y Serrano. Plántulas de 60 d de las tres variedades fueron tratadas con Tl en dosis de 0, 6 y 12 nM en la solución nutritiva. Después de 80 d, cuando las plantas alcanzaron la madurez fisiológica, se determinó la concentración de macro y micronutrientos en tejido foliar. Con los datos obtenidos se realizó análisis de varianza, comparación de medias con LSD ($P \leq 0.05$) y análisis de correlación de Pearson entre las variables evaluadas y los tratamientos con Tl. Los resultados indican que las dosis de 6 y 12 nM Tl incrementaron la concentración foliar de P en Serrano y la de N en Poblano; respectivamente. Por otra parte, 6 nM Tl redujo significativamente la concentración foliar de K en las variedades Jalapeño y Serrano, la de Ca en Poblano y la de Mg en Serrano. En la variedad Jalapeño, ambas dosis de Tl redujeron la concentración foliar de Ca. La concentración de micronutrientos solo fue afectada en Mn al aplicar 12 nm Tl, donde se observaron incrementos significativos en las tres variedades. Destaca que en las tres variedades evaluadas, la adición de Tl incrementó las relaciones de concentración foliar N:K y N:Mg; en Poblano y Serrano el Tl aumentó la relación N:Mg; en Jalapeño y Serrano la relación P:K; y en Jalapeño y Poblano la relación N:Ca. Se registraron correlaciones negativas significativas entre el Tl con las concentraciones foliares de Ca y Mg, así como con las relaciones de concentración Ca:S y Mg:S en chile Jalapeño. También correlaciones significativas negativas se registraron en Poblano entre el Tl y las relaciones de concentración K:Ca y K:S. Por el contrario, la concentración de Tl en la solución nutritiva se relacionó de manera positiva con las relaciones de concentración foliar N:K, N:Ca, N:Mg, P:Ca y P:Mg en Jalapeño; con la concentración de N, las relaciones N:K, N:Mg, N:S y Mg:S en Poblano y con la relación Mg:S en Serrano. Se concluye que el Tl tuvo efectos diferenciales en el estatus de nutrientes entre variedades de chile, siendo Jalapeño la más susceptible a la presencia del Tl, seguido de Serrano y Poblano.

1.2. INTRODUCCIÓN

El talio (Tl) es un metal distribuido ampliamente en el planeta, y no se le han encontrado funciones biológicas específicas en ningún ser vivo analizado. Por el contrario, se encuentra en la lista de contaminantes ambientales de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA) debido a sus efectos tóxicos en diversos sistemas biológicos, incluyendo humanos, animales y plantas (Galván-Arzate & Santamaría, 1998; USEPA, 2015).

Estudios de toxicología ambiental han establecido que la liberación de Tl al ambiente puede ocurrir de manera natural y por actividades antropogénicas, principalmente por residuos industriales y mineros, lo que ha provocado que en las últimas décadas se incremente su concentración, por lo que se estima que cada año son expulsadas 5000 t de Tl a la atmósfera (Léonard & Gerber, 1997; Yu & Tsunoda, 2016). En la litósfera, las concentraciones de Tl van de 0.3 a 0.6 mg kg⁻¹; en rocas ígneas, de 0.05 a 1.7 mg kg⁻¹; y en suelos sus concentraciones están asociada a su origen y a los minerales del suelo (Fratini, 2005; USEPA, 2015). La presencia de Tl también se ha registrado en cuerpos de agua de diferentes regiones. En Polonia se hallaron concentraciones de 5 a 17 ng L⁻¹ en ríos y de 10 a 15 ng L⁻¹ en agua de mar; en el lago Ocrida (en la frontera de Macedonia y Albania), las concentraciones de Tl son de 0.5 µg L⁻¹; los ríos Huron y Raisin en Estados Unidos contienen 21 y 2621 ng L⁻¹ de Tl, respectivamente. Se recomienda que el agua para consumo humano no exceda 2 µg Tl L⁻¹ (USEPA, 2015; Yu & Tsunoda, 2016).

El Tl es incorporado al suelo por medio de las aguas residuales utilizadas para riego en terrenos de cultivo, al encontrarse disponible para las plantas en la solución del suelo en su forma iónica Tl(I) es absorbido y acumulado dentro de la planta, lo que representa un problema para el humano si es incorporado a la cadena alimenticia, ya que el consumo de hortalizas contaminadas con este metal podría poner en riesgo la salud (Rodríguez-Mercado & Altamirano-Lozano, 2013; Karbowska, 2016).

En mostaza blanca (*Sinapsis alba* L.) la toxicidad por Tl⁺ reduce la fotosíntesis, lo que resulta en alteraciones secundarias tales como el balance hídrico, homeostasis iónica, estrés oxidativo y clorosis (Mazur *et al.*, 2016). En particular, el desequilibrio nutrimental en plantas superiores puede desencadenar procesos bioquímicos que tienen consecuencias negativas en el crecimiento, en el rendimiento y en la calidad de las cosechas (Cvjetko *et al.*, 2010). Para conocer el efecto del

Tl en la nutrición de la planta, el diagnóstico nutrimental constituye una herramienta de suma importancia, dado que permite identificar deficiencias o toxicidades nutrimentales en diferentes etapas fenológicas de la planta y conocer sus efectos (Alcántar *et al.*, 2016).

En la literatura actual existen pocos estudios que hayan cuantificado concentraciones específicas de Tl en tejido vegetal, aunque se reporta que puede encontrarse en concentraciones menores a 0.1 mg kg⁻¹ en base seca (Kazantzis, 2000). Además, los efectos que este metal tiene en el estatus nutrimental en plantas superiores no han sido investigados. Por lo anterior, el objetivo central de este estudio fue evaluar el efecto que produce el Tl en la concentración foliar de macronutrientes en las variedades Jalapeño, Poblano y Serrano de Chile (*Capsicum annuum* L.), cultivadas en hidroponía bajo condiciones de invernadero. Dentro del género *Capsicum*, *Capsicum annuum* es una de las cinco especies domesticadas, la cual posee mayor diversidad genética respecto al tamaño, forma y color de fruto (Madejón *et al.*, 2007; Kazantzis, 2000). Esta hortaliza presenta gran importancia económica en Asia y América, donde China y México encabezan la producción y distribución mundial (Aguilar-Meléndez *et al.*, 2009).

1.3. MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se realizó bajo condiciones de invernadero con temperatura promedio diurnas y nocturnas de 32 °C y 15 °C, respectivamente; humedad relativa de 31% en el día y 87% en la noche; intensidad luminosa de 137 μmol m⁻² s⁻¹ con un fotoperiodo de 11.5 h.

Se produjeron plantas en almácigo a partir de semillas híbridas de tres variedades de *Capsicum annuum* L.: Jalapeño “Emperador” NUN 70030; Poblano “Capulín”, facilitado por el Dr. Higinio López Sánchez, Colegio de Postgraduados, Campus Puebla, México; y Serrano “Coloso”, proporcionada por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Las Huastecas-CIRNE.

Plántulas sanas de 60 d se trasplantaron en bolsas negras de polietileno con tezontle como sustrato, bajo un diseño experimental completamente al azar con seis repeticiones por tratamiento, irrigadas mediante solución nutritiva universal Steiner (Steiner, 1984), cuya composición química de macronutrientes en mol_c m⁻³ fue: 12 NO₃⁻, 1 H₂PO₄⁻, 7 SO₄²⁻, 7 K⁺, 9 Ca²⁺, 4 Mg²⁺. Las concentraciones de micronutrientes empleadas en mg L⁻¹ fueron: 5 Fe, 2.328 Mn, 0.466 Zn, 0.186 Cu, 0.432 B y 0.173 Mo. La solución nutritiva se formuló con reactivos grado analítico (JT

Baker; PA, USA). La conductividad eléctrica de la solución nutritiva fue de 2 dS m⁻¹ y el pH se ajustó a 5.5. El riego fue automatizado mediante un sistema por goteo en espagueti.

En la solución nutritiva de Steiner se adicionaron tres niveles de Tl: 0, 6 y 12 nM Tl a partir de acetato de talio (CH₃COOTl, CAS 563-68-5 Sigma Aldrich; MO, USA), y los tratamientos se suministraron durante 80 d.

Posterior a la fase de aplicación de tratamientos, se cosechó la parte aérea de las plantas y se separaron las hojas que fueron secadas en una estufa de aire forzado (Riossa, modelo HCF-125; Guadalajara, México) a 70 °C durante 48 h. Posteriormente las muestras fueron molidas (tamaño de partícula 2 mm) para el análisis de macronutrientes.

La concentración foliar de N se evaluó en el extracto resultante de la digestión ácida de tejido seco de hojas con una solución de C₇H₆O₃ en H₂SO₄ a una concentración de 3.3%, como es descrito en el método micro-Kjeldahl (Alcántar & Sandoval, 1999). Las concentraciones de P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn y Zn fueron determinadas mediante digestión ácida con HNO₃:HClO₄ (2:1, v:v), con el uso de un espectrofotómetro de emisión atómica de inducción atómica por plasma acoplado (ICP-OES 725-ES; Agilent; Santa Clara, CA, USA). Con los resultados de concentración obtenidos se estimaron las relaciones entre los macronutrientes.

1.3.1. Análisis estadístico

A partir de los datos obtenidos se realizaron análisis de varianza y pruebas de comparación de medias (LSD, $P \leq 0.05$). Las variables evaluadas se correlacionaron con las concentraciones de Tl suministradas en la solución nutritiva con la prueba de correlación de Pearson ($P \leq 0.05$) usando el software SAS (SAS, 2011).

1.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.4.1. Concentración foliar de macronutrientes

La concentración foliar de N en las variedades Jalapeño y Serrano no fue influenciada por los tratamientos con Tl con respecto al testigo (**Figura 1.1**). Además, la concentración foliar en Jalapeño se encuentra dentro del rango óptimo reportado por Johnson & Decotearu (1996) para esta variedad que es de 38 a 42 g kg⁻¹ materia seca; mientras que, las de Serrano se encuentran

debajo del rango de concentración óptima de N, que de acuerdo con [Cruz-Crespo et al. \(2014\)](#) esta debe oscilar entre 45 a 52 g kg⁻¹ materia seca.

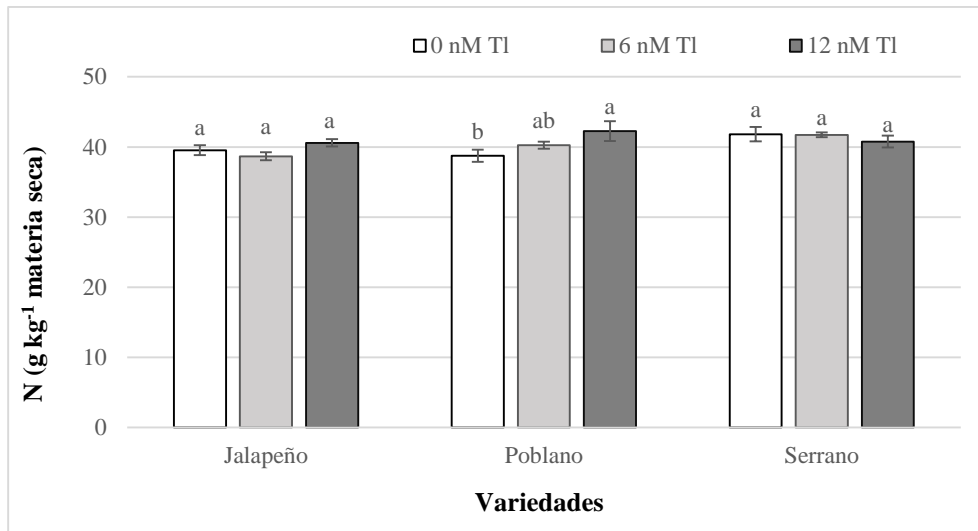


Figura 1.1. Concentración foliar de nitrógeno (N) en tres variedades de chile tratadas con TI durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

Contrario a lo observado en Jalapeño y Serrano, la concentración foliar de N en la variedad Poblano se relacionó de manera positiva con la de TI en la solución nutritiva; el tratamiento con 12 nM de TI superó en 10.6% la concentración de N registrada en el testigo. En general, las concentraciones de N en Poblano son superiores al rango de suficiencia reportado por [Carballar-Hernández et al. \(2018\)](#) que van de 21 a 34 mg kg⁻¹ de materia seca (**Figura 1.1**). Se sabe que el aumento en la concentración de N es un mecanismo de respuesta que utiliza la planta para contrarrestar la toxicidad del metal dentro de las células ([Kapusta & Godzik, 2013](#)). En álamo (*Populus deltoides* \times *P. nigra*) expuesto a toxicidad por Cd, el adecuado suministro de N provoca efectos positivos al aumentar el contenido de clorofila ([Zhang et al., 2014](#)).

De la misma manera que en N, las concentraciones foliares de P en Jalapeño y Poblano no presentan diferencias significativas entre los tratamientos con TI y se encuentran dentro de los rangos de suficiencia reportados por [Mills & Jones \(1996\)](#), que van de 2.2 a 7 g kg⁻¹ de materia seca (**Figura 1.2**).

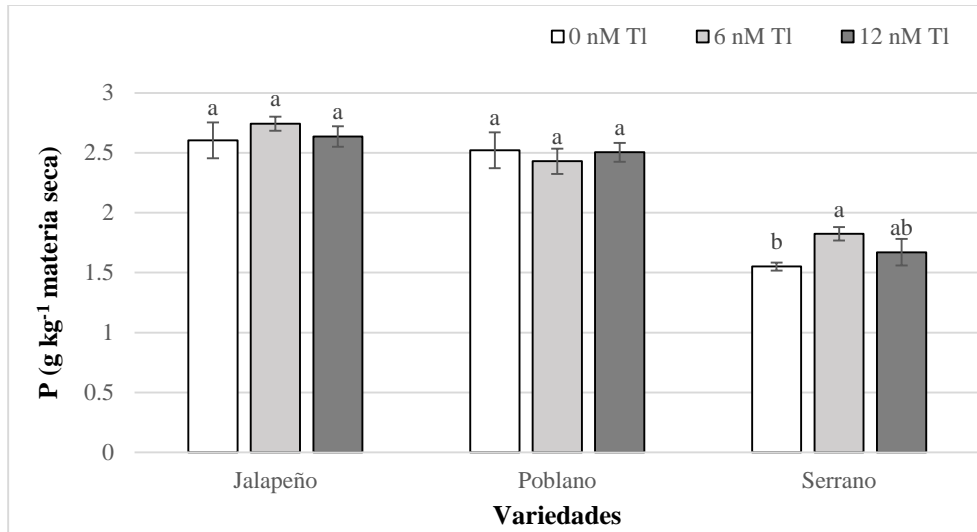


Figura 1.2. Concentración foliar de fósforo (P) en tres variedades de chile tratadas con TI durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

En la variedad Serrano, se presentó un incremento significativo en la concentración de P en el tratamiento de 6 nM TI, el cual aumentó 17.5% con respecto al testigo. Cabe señalar que estas concentraciones se encuentran por debajo de los rangos de suficiencia de 2.3 a 2.6 g kg⁻¹ establecidos por [Cruz-Crespo et al. \(2014\)](#).

El incremento en la concentración de P en chile Serrano bajo estrés por TI no ha sido documentado. Sin embargo, estudios con otros metales como el Cd han reportado que la presencia de Cd aumenta la concentración de macronutrientes como consecuencia de la alteración de la tasa de absorción y distribución de nutrientes dentro de la planta, como una estrategia para inhibir la acumulación del metal o aumentar la tolerancia ante el Cd, efecto que también se ha observado con elementos benéficos como el selenio (Se) ([Nazar et al., 2012](#)).

Las concentraciones foliares de K obtenidas en chile Serrano se encuentran dentro de los rangos de suficiencia de los 47.6 a 50.8 g kg⁻¹ de materia seca ([Cruz-Crespo et al., 2014](#)). En chile Poblano estas concentraciones se encuentran por encima de los rangos de suficiencia que oscilan entre los 4.6 a 16.9 g kg⁻¹ de materia seca reportados por [Carballar-Hernández et al. \(2018\)](#). En Jalapeño estas concentraciones también se encuentran por encima de lo reportado por [Mill & Jones \(1996\)](#), que fluctúan entre los 35 a 45 g kg⁻¹ de materia seca (**Figura 1.3**).

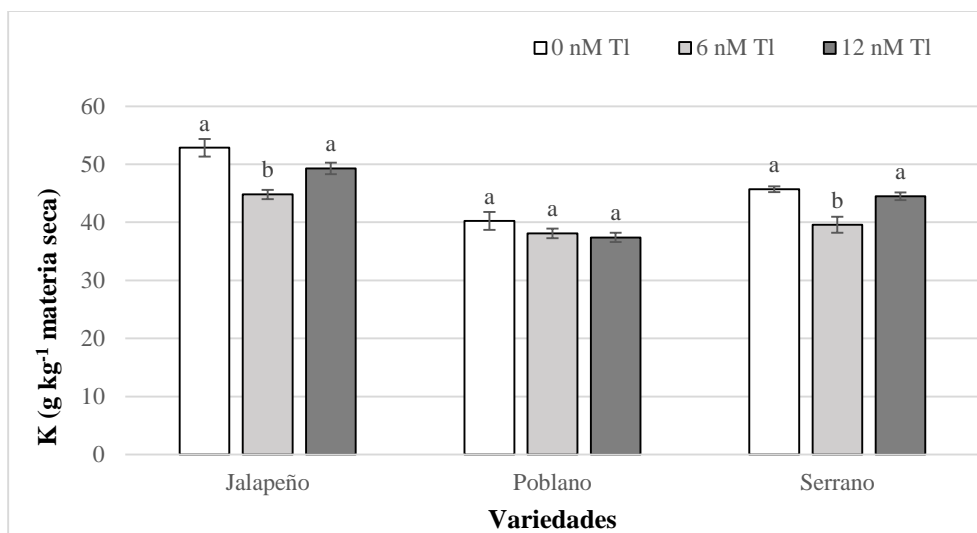


Figura 1.3. Concentración foliar de potasio (K) en tres variedades de chile tratadas con Tl durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

El Tl no afectó la concentración foliar de K en la variedad Poblano. Contrario a esto, en Jalapeño y Serrano el tratamiento de 6 nM Tl disminuyó la concentración de K en 15 y 13%, respectivamente (**Figura 1.3**). El mecanismo exacto de toxicidad del Tl no está claro, pero el más conocido está relacionado con la interferencia de procesos vitales dependientes de K, debido a que los iones de Tl imitan la acción biológica, el movimiento y la acumulación intracelular de los iones K, afectando así la producción de enzimas, la síntesis de aminoácidos y los mecanismos de transporte. En modelos biológicos animales, se ha documentado que el Tl interfiere en la actividad de la Na^+/K^+ -ATPasa, ya que se ha encontrado que los iones de Tl y K son univalentes con cargas y radios iónicos similares, Tl(I) (1.49 Å) y K^+ (1.33 Å), lo que provoca que las membranas celulares no tengan la capacidad de distinguir entre estos dos iones (Nriangu, 1998; Małuszyński, 2009; Viraraghavan & Srinivasan, 2011).

En las variedades Poblano y Jalapeño, las concentraciones foliares de Ca estuvieron dentro de los rangos de suficiencia reportados por Uchida (2000), los cuales van de 10 a 25 g kg^{-1} ; mientras que, las registradas en hojas de Serrano se encuentran por debajo de lo reportado por Cruz-Crespo *et al.* (2014), que van de los 24.1 a 29.9 g kg^{-1} de materia seca (**Figura 1.4**).

En cuanto a la concentración foliar de Ca, solo se observaron diferencias estadísticas entre tratamientos en las variedades Jalapeño y Poblano. En Jalapeño, las dosis de 6 y 12 nM Tl redujeron la concentración de Ca en 8 y 10%, respectivamente, mientras que en Serrano también

se observaron decrementos en la concentración de Ca en ambos tratamientos con TI. En Poblano, solo se presentó un decremento en la dosis de 6 nM TI, todo al compararlo con su testigo (**Figura 1.4**).

En plantas expuestas a metales como el Cd y el plomo (Pb) se han observado incrementos en la concentración de Ca, principalmente como un mecanismo de defensa para neutralizar la toxicidad de estos elementos dada la función como segundo mensajero ([Thévenod, 2009](#)). En tomate y berenjena, los tratamientos a bajas concentraciones de Cd (1.5 mg L⁻¹) y Pb (75 mg L⁻¹) tuvo efectos estimulantes en las plantas, incluyendo el incremento en las concentraciones de Ca, pero altas concentraciones de Cd (3.0 mg L⁻¹) y Pb (150 mg L⁻¹) ocasionaron efectos fitotóxicos, observándose que la concentración de Ca era inversamente proporcional a las concentraciones de Pb y Cd aplicadas ([Khan & Khan, 1993](#)).

Metales como el Cd y Pb atraviesan la membrana plasmática de las células mediante los mismos mecanismos de transporte que el Ca, canales iónicos que permiten la entrada de Ca²⁺ al citosol, provocando la sustitución del Ca²⁺ por estos elementos no esenciales. Dada la función crucial del Ca²⁺ como segundo mensajero, en plantas superiores es crucial su participación con proteínas como la calmodulina y calcineurina, importantes en la regulación de respuestas al estrés biótico y abiótico ([Marchetti, 2013](#)).

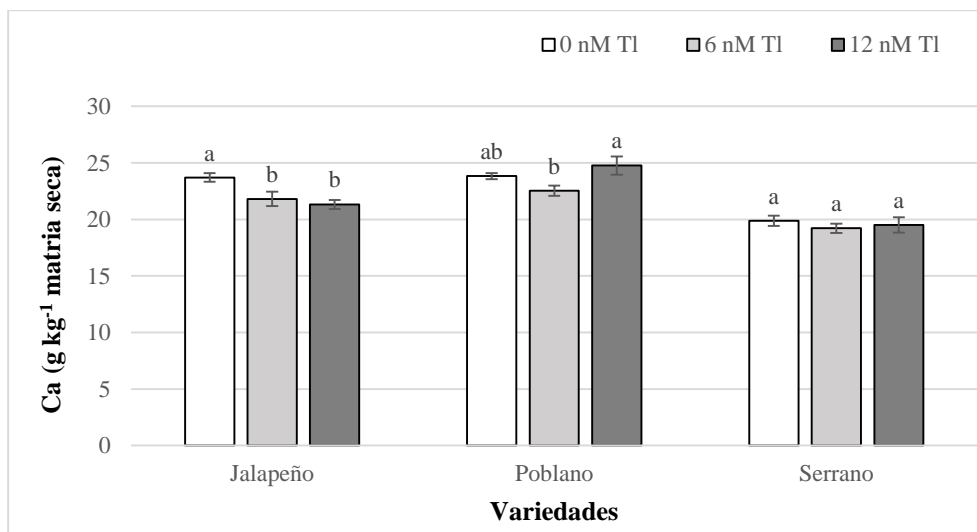


Figura 1.4. Concentración foliar de calcio (Ca) en tres variedades de chile tratadas con TI durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

Las concentraciones de Mg en hojas en las variedades Jalapeño y Poblano se encuentran dentro de los rangos de suficiencia reportados para plantas superiores. Concentraciones mayores a 15 g kg^{-1} pueden ser perjudiciales para las plantas, limitando el crecimiento e inhibiendo la fotosíntesis (Marschner, 2012); por otro lado, el nivel crítico de Mg en tejido foliar para la identificación temprana de una deficiencia es de 2.1 g kg^{-1} materia seca (Riga & Anza, 2003; Hauer-Jákli & Tränkner, 2019). La concentración foliar de Mg en Serrano oscila en lo señalado por Cruz-Crespo *et al.* (2014), que va de 11 a 12.8 g kg^{-1} de materia seca (Figura 1.5).

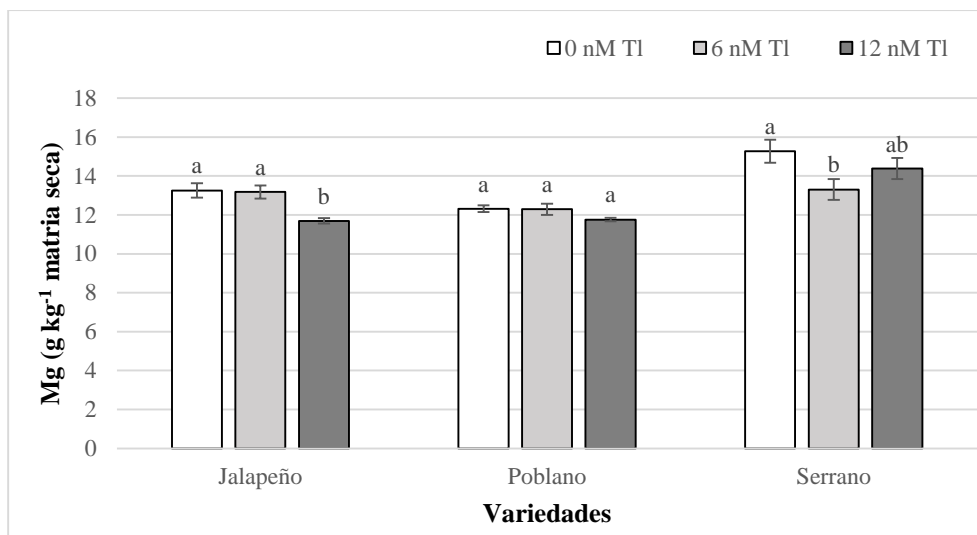


Figura 1.5. Concentración foliar de magnesio (Mg) en tres variedades de chile tratadas con Tl durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

La concentración foliar de Mg en la variedad Poblano no muestra diferencias significativas. En Jalapeño y Serrano esta concentración disminuye al aplicar 12 y 6 nM Tl, respectivamente, en comparación con los testigos (Figura 1.5).

Hasta el momento no hay reportes de concentraciones foliares de Mg en plantas tratadas con Tl. Investigaciones sobre deficiencia de Mg muestran que por debajo de los rangos de suficiencia aparecen síntomas visibles a nivel foliar: hojas amarillas a rojizas, necrosis intervenal y senescencia en hojas maduras (Tanoi & Kobayashi, 2015). La presencia de metales como el aluminio (Al) y Cd provocan en las plantas daño en las membranas celulares, alteran la absorción de nutrientes, disminuyen la fotosíntesis y la biosíntesis de muchos metabolitos (Rengel *et al.*, 2015). Además, el Mg como componente estructural de la molécula de clorofila, está asociado a numerosas enzimas, incluyendo ATPasas, ARN polimerasas, proteínas quinasas, fosfatasa,

glutación sintasa y carboxilasas; así mismo, el Mg es esencial para la estabilización de la membrana, y, por consiguiente, cuando existe deficiencia de Mg, se ven afectados mecanismos de protección antioxidante y la homeostasis celular en la planta (Hermans *et al.*, 2011).

Las concentraciones foliares de S no presentan diferencias significativas entre tratamientos en las tres variedades en estudio (Figura 1.6). Las concentraciones obtenidas por Azoifeifa & Moreira (2008) en Chile Jalapeño son superiores a 0.39 g kg^{-1} ; mientras que las concentraciones en Poblano se encuentran dentro de los rangos de suficiencia ($1 \text{ a } 5 \text{ g kg}^{-1}$) reportados para plantas superiores (Marschner, 2012). Finalmente, las concentraciones en Serrano se encuentran por debajo de lo reportado por Barker & Pilbeam (2007), que oscila de $3 \text{ a } 7 \text{ g kg}^{-1}$ de materia seca.

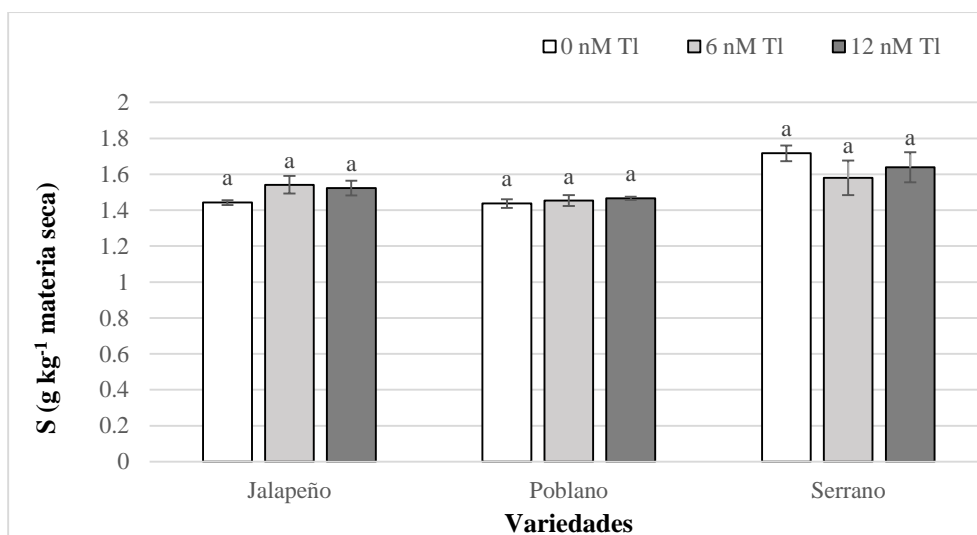


Figura 1.6. Concentración foliar de azufre (S) en tres variedades de Chile tratadas con TI durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

Mantener concentraciones de suficiencia de S es esencial en el desarrollo óptimo de las plantas, ya que, de no ser así, se disminuye la conductividad hidráulica, la apertura de estomas, la fotosíntesis neta, el área foliar, la concentración de clorofila en hojas y la síntesis de proteínas a consecuencia a la alteración de aminoácidos que contienen S, tal como la cisteína y la metionina (Wawrzynska *et al.*, 2015).

Los resultados obtenidos de concentración de macronutrientes indican que el TI tiene efectos diferenciales entre variedades. Si bien no existen antecedentes del efecto de TI en el estatus nutrimental en plantas superiores, se ha reportado con otros metales como el Cu, Ni y Cd afectan

la absorción y por tanto la concentración de nutrientes en las plantas (DalCorso *et al.*, 2014; Arif *et al.*, 2016).

1.4.2. Concentración foliar de micronutrientos

Las concentraciones foliares de B no presentan diferencias significativas con los tratamientos con TI (**Figura 1.7**), además, estas se encuentran por encima del rango de suficiencia reportados para plantas de Chile, las cuales van de 25 a 75 mg kg⁻¹ de materia seca (Uchida, 2000).

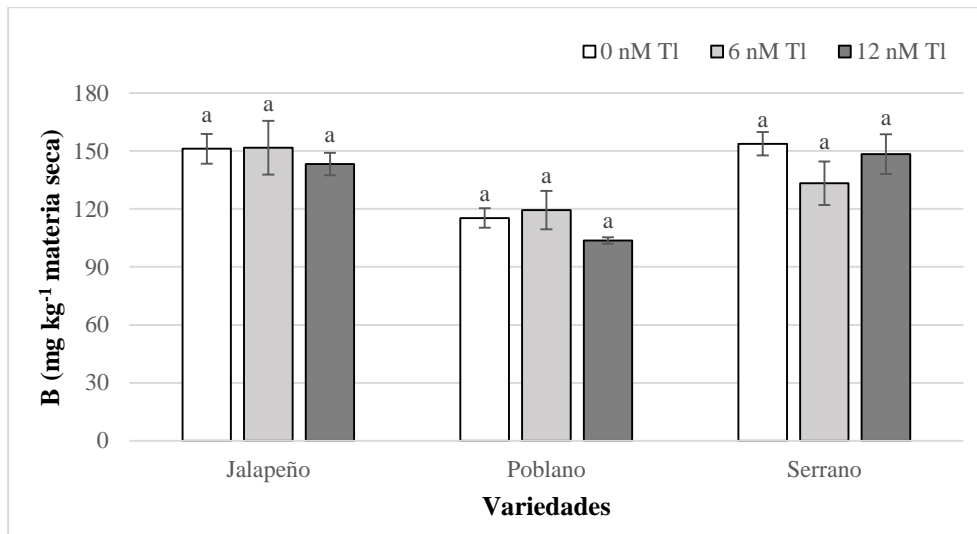


Figura 1.7. Concentración foliar de boro (B) en tres variedades de Chile tratadas con TI durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

Metales no esenciales como el Cd, alteran la concentración de B en plantas de tomate de la variedad Pusa Rubí cuando se exponen a 35 μ M Cd durante 7 días (Borges *et al.*, 2019). Por otra parte, incrementos en la concentración de B mejoran la tolerancia ante el estrés por salinidad, así mismo, como elemento esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, el B debe mantenerse en concentraciones adecuadas para obtener la productividad de los cultivos, ya que puede alterar: el metabolismo, el contenido de clorofila, la fotosíntesis y la división celular de las células de la raíz (Camacho-Cristóbal *et al.*, 2008).

Las concentraciones foliares de Cu no presentan diferencias significativas al suministrar TI en las variedades de estudio (**Figura 1.8**). La concentración en Jalapeño se encuentra por encima de la

de la concentración suficiente para un crecimiento adecuado de 6 mg kg^{-1}), mientras que Poblano y Serrano se encuentran debajo de ésta (Marschner, 2012).

El Cu puede actuar como cofactor enzimático, formar complejos estables con proteínas, participar en la señalización de hormonas, entre otros, su deficiencia reduce la fotosíntesis (afecta la transferencia de electrones en el PSI y II), la síntesis de carbohidratos, la fijación de CO_2 , además, altera la composición de lípidos y la composición química de la pared celular, aumentando la concentración de α -celulosa y provocando deformación foliar (DalCorso *et al.*, 2014).

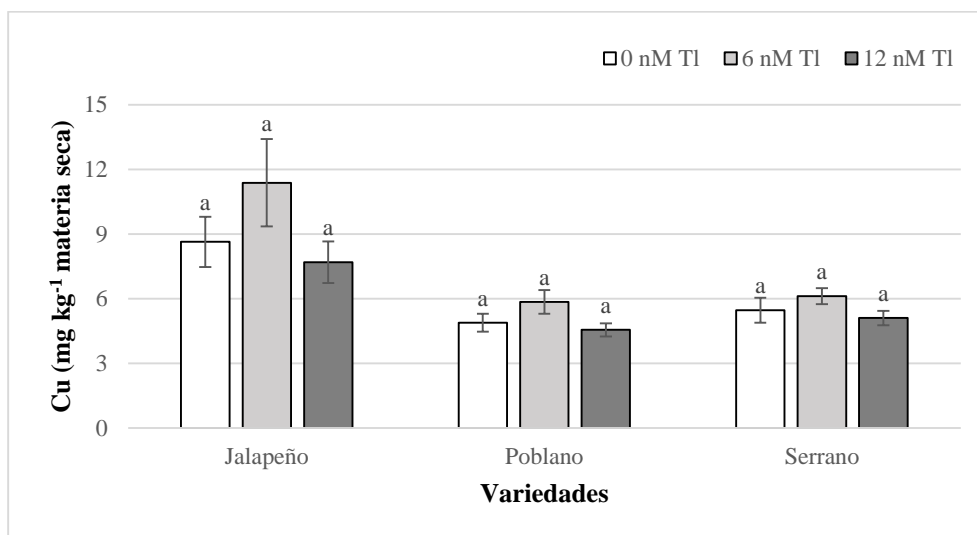


Figura 1.8. Concentración foliar de cobre (Cu) en tres variedades de chile tratadas con TI durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

Las concentraciones foliares de Fe no presentan cambios significativos al suministrar los tratamientos con TI (Figura 1.9). En la literatura, se reportan concentraciones de suficiencia de 60 a $300 \text{ mg Fe kg}^{-1}$ de materia seca (Uchida, 2000), rango donde se encuentran las obtenidas en este estudio.

En el suelo, el Fe tiene similitud química con metales no esenciales como el Ni y el Co, debido a esto, la clorosis en las hojas, característica de la deficiencia de Fe, puede presentarse ante la presencia y el exceso de otros metales. Las deficiencias de Fe pueden deberse en algunos casos a que, el transportador de hierro IRT1 también transporta Zn, Co, Ni, Cd y Mn. Al superar al Fe durante la absorción en la raíz, se promueven la deficiencia de Fe, lo que provoca un desequilibrio de otros metales, esto se ha observado con Cd y Zn (Lešková *et al.*, 2017).

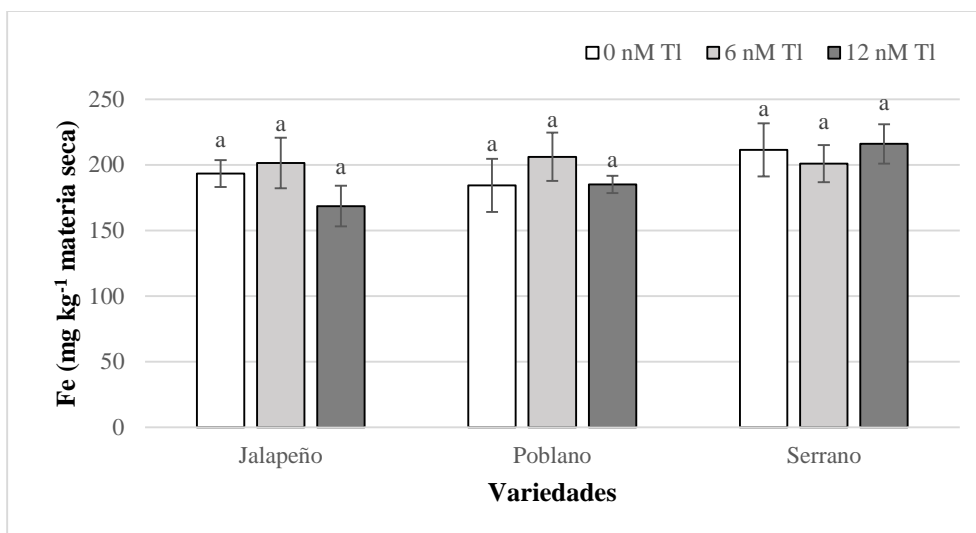


Figura 1.9. Concentración foliar de hierro (Fe) en tres variedades de chile tratadas con TI durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

Las concentraciones foliares de Mn solo fueron significativas en la concentración de 12 nM TI en las tres variedades (**Figura 1.10**). Por su parte, las concentraciones obtenidas se encuentran dentro del rango de suficiencia de 50 a 250 mg kg⁻¹ de materia seca (Uchida, 2000).

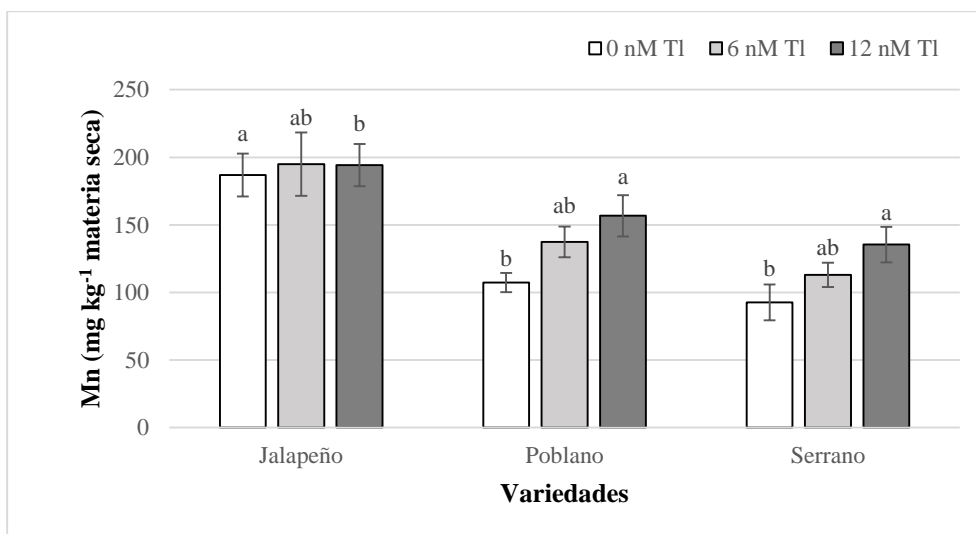


Figura 1.10. Concentración foliar de manganeso (Mn) en tres variedades de chile tratadas con TI durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

La deficiencia de Mn reduce el número de tilacoides, inhibe la fotosíntesis y como consecuencia, reduce el crecimiento y el desarrollo de las plantas, además, altera la fertilidad del polen, y la

producción de efectos fenólicos y lignina. La toxicidad de Mn provoca clorosis intervenal, pliegue de hojas, necrosis y daño oxidativo en proteínas, lípidos (DalCorso *et al.*, 2014).

Las concentraciones foliares de Zn no presentan cambios estadísticamente significativos al suministrar los tratamientos con TI (**Figura 1.11**). Las concentraciones obtenidas en este estudio se encuentran por encima de los 20 mg Zn kg⁻¹ de materia seca, establecida como la concentración de suficiencia en plantas superiores (Marschner, 2012).

Cuando existe deficiencia de Zn, se reduce la actividad de la anhidrasa carbónica y la fructosa-1,6-bifosfatasa, provocando que las plantas acumulen azúcares y almidón, además, disminuye el nivel de giberelinas y auxinas, lo que retrasa el crecimiento y produce hojas pequeñas. Así mismo, provoca clorosis, necrosis foliar, reducción de la longitud de brotes y aumenta la permeabilidad de la membrana. La falta de Zn está asociada a la deficiencia de Fe, por el contrario, su exceso provoca deficiencia de Mg y Fe (Dalcorso *et al.*, 2014).

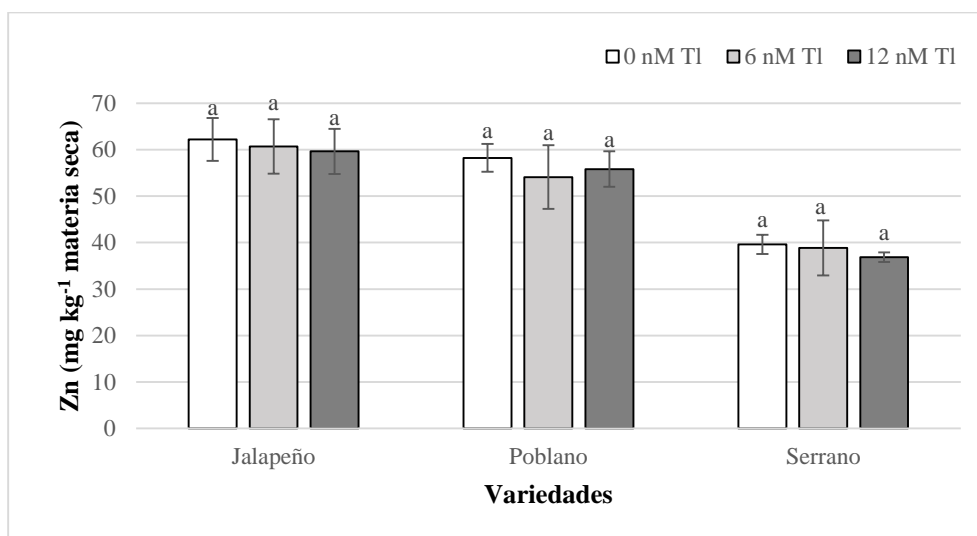


Figura 1. 11. Concentración foliar de zinc (Zn) en tres variedades de chile tratadas con TI durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

1.4.3. Relaciones macronutrimientales

La interacción entre nutrientes en tejido vegetal es de gran importancia, su relación es una valiosa herramienta de diagnóstico que nos ayuda a conocer y mantener concentraciones óptimas, debido a que un desequilibrio nutricional puede alterar la homeostasis celular y limitar el rendimiento de los cultivos (Sinclair *et al.*, 1997; Sardans *et al.*, 2017).

La relación entre concentraciones nutrimentales foliares para las variedades Jalapeño, Poblano y Serrano se presentan en los **Cuadros 1.1, 1.2 y 1.3**, respectivamente. En la variedad Jalapeño se observaron diferencias significativas entre tratamientos en las relaciones N:K, N:Ca, N:Mg, P:K, P:Ca, P:Mg y K:Mg. En éstas, se observaron incrementos atribuibles a la presencia de TI en la solución nutritiva; es decir, en plantas tratadas con 6 nM TI, la concentración de N respecto a la de K, fue mayor que en plantas testigo. Esta misma tendencia se observó para la concentración de K respecto a la de Mg. Asimismo, dosis de 12 nM TI propiciaron una mayor proporción de concentración de N respecto a Ca y Mg, de P respecto a Ca y Mg, de K respecto a Mg y de Ca respecto a Mg, en comparación con lo registrado en plantas testigo. Por el contrario, el TI reduce las relaciones de concentración K:S, Ca:S, y Mg:S; respecto a plantas testigo (**Cuadro 1.1**).

En Poblano, dosis de 6 nM TI incrementaron la relación de concentración entre N y Ca, respecto al testigo; mientras que, la dosis 12 nM TI incrementaron las relaciones de concentración N:K, N:Mg, N:S, Ca:Mg y Mg:S. Se observó también en esta variedad que la presencia de TI redujo las proporciones de concentración K:Ca, K:S y Ca:S (**Cuadro 1.2**).

De manera general se observó en Serrano, que las relaciones de concentraciones estimadas entre nutrimentos no fueron reducidas por el TI: por el contrario, dosis de 6 nM TI incrementaron las relaciones P:K, P:Ca, P:Mg, P:S y Ca:Mg. La dosis alta de TI (12 nM TI) incrementó la relación Mg:S (**Cuadro 1.3**).

La concentración de TI en la solución nutritiva fue correlacionada mediante el coeficiente de correlación de Pearson con las concentraciones foliares de macronutrimentos, así como de las relaciones de concentración entre macronutrimentos. Los resultados significativos de este análisis son presentados en el **Cuadro 1.4**.

Las variedades Jalapeño y Serrano presentaron una interacción positiva y significativa entre la concentración de TI en la solución nutritiva y las relaciones de concentración foliar N:K y N:Mg (**Cuadro 1.4**). Lo anterior, podría sugerir una competencia por sitios de absorción entre los dos pares de iones, ya que estos elementos pueden asociarse de manera sinérgica o antagónica en la planta, en este caso antagónica (Mazur *et al.*, 2016; Kam *et al.*, 2019). La interacción entre nutrimentos se relaciona directamente con absorción de metales presentes en la solución del suelo, lo cual depende de los mecanismos internos de cada especie o variedad estudiada (Smical *et al.*,

2008). Ésta puede ser la razón por la que las variedades aquí estudiadas no presentan las mismas respuestas a la aplicación de Tl.

Cuadro 1.1. Relación de concentración nutrimental en hojas de chile Jalapeño tratado con Tl durante 80 d.

Tl (nM)	N:P	N:K	N:Ca	N:Mg	N:S
0	15.30±0.61a	0.75±0.01c	1.67±0.01c	2.99±0.04b	27.41±0.26a
6	14.11±0.26a	0.86±0.01a	1.78±0.03b	2.94±0.04b	25.14±0.47b
12	15.43±0.31a	0.82±0.01b	1.90±0.02a	3.47±0.03a	26.68±0.48a
Tl (nM)	P:K		P:Ca	P:Mg	P:S
0	0.05±0.0c		0.11±0.0b	0.20±0.01b	1.80±0.09a
6	0.06±0.0a		0.13±0.0a	0.21±0.00b	1.78±0.03a
12	0.05±0.0b		0.12±0.0a	0.23±0.01a	1.73±0.02a
Tl (nM)	K:Ca		K:Mg	K:S	
0	2.23±0.05a		3.99±0.07b	36.61±0.71a	
6	2.06±0.02b		3.40±0.06c	29.11±0.54c	
12	2.31±0.01a		4.22±0.06a	32.38±0.58b	
Tl (nM)	Ca:Mg			Ca:S	
0	1.79±0.02a			16.43±0.18a	
6	1.66±0.03b			14.16±0.21b	
12	1.82±0.03a			14.01±0.28b	
Tl (nM)	Mg:S				
0	9.18±0.19a				
6	8.56±0.09b				
12	7.68±0.13c				

Medias ± DE con letras distintas en cada variable indican diferencias significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

Por otra parte, también existe una correlación significativa entre la concentración de Tl en la solución nutritiva y la relación de concentración foliar Mg:S en las tres variedades. Sin embargo, en Jalapeño la correlación es negativa (**Cuadro 1.4**). Los cambios en la concentración de Mg en la planta provocan alteraciones nutrimentales debido a que al ser un macronutriente, participa como activador de muchas enzimas en diversas reacciones químicas dentro de la célula (Cai *et al.*, 2012). Este mismo resultado se ha presentado en trigo en fase de plántula expuesto a 1 mg L⁻¹ Cd,

encontrando que las que crecieron en presencia de Cd aumentaron su concentración nutrimental de N, P, K y Mn, y disminuyeron en Mo, respuestas posiblemente atribuidas a la diferencia genotípica de las plantas y a su capacidad de tolerancia al Cd (Zhang *et al.*, 2002).

Cuadro 1.2. Relación de concentración nutrimental en hojas de chile Poblano tratado con talio (Tl) durante 80 d.

Tl (nM)	N:P	N:K	N:Ca	N:Mg	N:S
0	15.48±1.16a	0.97±0.05 c	1.63±0.05 b	3.15±0.04 b	26.97±0.38b
6	16.63±1.08a	1.06±0.02 b	1.79±0.04 a	3.28±0.04 b	27.71±0.30ab
12	16.89±0.79a	1.13±0.05 a	1.71±0.06 ab	3.59±0.11 a	28.82±0.82 a
Tl (nM)	P:K		P:Ca	P:Mg	P:S
0	0.06±0.0 a		0.11±0.1 a	0.20±0.01 a	1.75±0.08 a
6	0.06±0.0 a		0.11±0.0 a	0.20±0.00 a	1.67±0.04 a
12	0.07±0.0 a		0.10±0.0 a	0.21±0.01 a	1.71±0.04 a
Tl (nM)	K:Ca		K:Mg	K:S	
0	1.69±0.05 a		3.26±0.09 a	27.97±0.65 a	
6	1.69±0.00 a		3.10±0.03 a	26.22±0.21 b	
12	1.51±0.03 b		3.18±0.05 a	25.51±0.42 b	
Tl (nM)	Ca:Mg		Ca:S		
0	1.93±0.01 b		16.59±0.12 a		
6	1.83±0.02 b		15.51±0.11 b		
12	2.11±0.06 a		16.89±0.44 a		
Tl (nM)	Mg:S				
0	10.46±0.65 c				
6	14.46±0.65 b				
12	18.46±0.65 a				

Medias ± DE con letras distintas en cada variable indican diferencias significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

Cuadro 1.3. Relación de concentración nutrimental en hojas de chile Serrano tratado con talio (Tl) durante 80 d.

Tl (nM)	N:P	N:K	N:Ca	N:Mg	N:S
0	26.96±0.17 a	0.92±0.02 b	2.10±0.03 a	2.74±0.06 b	24.36±0.03 a
6	22.94±0.53 b	1.06±0.03 a	2.17±0.03 a	3.15±0.10 a	26.66±1.38 a
12	24.64±1.09 b	0.92±0.01 b	2.09±0.03 a	2.84±0.06 b	25.00±0.85 a
Tl (nM)	P:K		P:Ca	P:Mg	P:S
0	0.03±0.0 b		0.08±0.0 c	0.10±0.00 c	0.90±0.01 c
6	0.05±0.0 a		0.09±0.0 a	0.14±0.00 a	1.16±0.04 a
12	0.04±0.0 b		0.09±0.0 b	0.12±0.00 b	1.02±0.02 b
Tl (nM)	K:Ca		K:Mg	K:S	
0	2.30±0.03 a		3.00±0.08 a	26.64±0.50 a	
6	2.06±0.06 b		2.98±0.08 a	25.21±0.98 a	
12	2.28±0.05 a		3.10±0.07 a	27.29±0.98 a	
Tl (nM)	Ca:Mg			Ca:S	
0	1.30±0.02 b			11.59±0.19 a	
6	1.45±0.03 a			12.25±0.50 a	
12	1.36±0.02 b			11.94±0.31 a	
Tl (nM)	Mg:S				
0	10.46±0.65 c				
6	14.46±0.65 b				
12	18.46±0.65 a				

Medias ± DE con letras distintas en cada variable indican diferencias significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

En el presente estudio se observaron respuestas diferenciales entre variedades al tratamiento con Tl. El estatus nutrimental fue afectado por el Tl en el orden siguiente Jalapeño > Serrano > Poblano. De manera coincidente, [Buendía-Valverde et al. \(2018\)](#) reportaron que al tratar semillas de Jalapeño, Serrano y Poblano con 25 µM de Tl, registraron decrementos en germinación de 7.7, 7.5 y 5.3%, respectivamente.

Cuadro 1.4. Correlaciones Pearson significativas entre la concentración de talio (Tl) en la solución nutritiva y las variables evaluadas en tres variedades de Chile.

Jalapeño		Serrano		Poblano	
Variable comparada	Concentración de Tl	Variable comparada	Concentración de Tl	Variable comparada	Concentración de Tl
Ca	-0.7322 0.0068 *	N	0.6331 0.0271 *	Mg:S	0.9461 <.0001 *
Mg	-0.7172 0.0087 *	N:K	0.8636 0.0003 *		
N:K	0.6191 0.0318 *	N:Mg	0.8112 0.0014 *		
N:Ca	0.9349 <.0001 *	N:S	0.6192 0.0318 *		
N:Mg	0.7990 0.0018 *	K:Ca	-0.7104 0.0096 *		
P:Ca	0.6092 0.0355 *	K:S	-0.7682 0.0035 *		
P:Mg	0.7914 0.0022 *	Mg:S	0.9461 <.0001 *		
Ca:S	-0.8412 0.0006 *				
Mg:S	-0.92257 <.0001 *				

*Diferencias significativas ($P \leq 0.05$).

Las plantas generalmente presentan sensibilidad ante la presencia de metales no esenciales, pero a bajas concentraciones podrían estimular un apropiado crecimiento y desarrollo (Arif *et al.*, 2016). En el presente estudio, se utilizaron concentraciones bajas de Tl, probablemente por ello se encontró variación relativamente baja en las concentraciones foliares de macronutrientos.

Finalmente, al considerar que el Tl es un elemento no esencial en la nutrición de la planta, y que produce efectos diferenciales entre las variedades evaluadas, se puede inferir que este elemento interfiere con la absorción de nutrientes probablemente al afectar la permeabilidad de la membrana plasmática. Sin embargo, es necesario realizar más estudios que permitan explorar los mecanismos que altera este elemento dentro de la planta.

1.5. CONCLUSIONES

Se concluye que el Tl tuvo efectos diferenciales en el estatus de nutrimentos entre variedades de chile, siendo Jalapeño la más susceptible y Poblano la menos sensible al Tl. La susceptibilidad de la variedad Jalapeño al Tl se evidenció en las correlaciones negativas significativas entre este metal con las concentraciones foliares de Ca y Mg, así como con las relaciones de concentración Ca:S y Mg:S. Así también en Jalapeño, la concentración de Tl en la solución nutritiva se relacionó de manera positiva con las relaciones de concentración foliar N:K, N:Ca, N:Mg, P:Ca y P:Mg. Por el contrario, en Poblano, el Tl solo correlacionó de manera significativa y positiva con la relación de concentración foliar Mg:S.

CAPÍTULO 2. ESTATUS NUTRIMENTAL DE TRES VARIEDADES DE CHILE TRATADAS CON CADMIO

2.1. RESUMEN

El cadmio (Cd) es un metal de transición ampliamente distribuido en la naturaleza, su dispersión en el ambiente implica procesos naturales y antropogénicos. Altas concentraciones de Cd en plantas superiores pueden provocar clorosis y desequilibrio nutricional; no obstante, se ha reportado que a bajas concentraciones tiene efectos positivos en algunas especies vegetales. Por tanto, se afirma que el Cd tiene efectos horméticos. En este contexto, se investigó el efecto que provoca el Cd (0, 5 y 10 μM) en la concentración foliar de macro y micronutrientes de tres variedades de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano). Las plantas fueron establecidas en bolsas con tezontle como sustrato bajo condiciones de invernadero y con seis repeticiones por tratamiento. Después de 80 días de tratamiento se determinaron en hojas las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn y Cd con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza y las medias se compararon mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Las dosis de Cd evaluadas no influenciaron las concentraciones foliares de N y Fe en las tres variedades de estudio; produjeron efectos diferenciales en la concentración de P en Jalapeño y Serrano; incrementaron la concentración de K en Poblano; aumentaron la concentración de S y Mn en las tres variedades; disminuyeron las concentraciones de Ca, Mg y Cu en Jalapeño; y disminuyeron la concentración de B y Zn en las tres variedades. Por otro lado, la concentración foliar de Cd en las tres variedades de chile estudiadas se relacionó de manera positiva con la concentración de Cd en la solución nutritiva. Asimismo, en las tres variedades destacan las correlaciones positivas altas entre la concentración foliar de Cd y las de S y Mn; así como las negativas altas y muy altas entre la concentración de Cd y la de Zn en hojas. Se concluye que el Cd alteró las concentraciones foliares: incrementó P en Jalapeño y Serrano, K en Poblano, S y Mn en las tres variedades; redujo el Ca, Mg y Cu en Jalapeño, y, B y Zn en las tres variedades; finalmente, el Cd se bioacumuló en las hojas de las tres variedades tratadas con Cd.

2.2. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el aumento en la concentración de elementos metálicos en el aire, el agua y el suelo con impactos negativos en organismos diversos, representa un riesgo para la seguridad alimentaria (EPA, 1999; Seshadri *et al.*, 2016).

El cadmio (Cd) es un metal de transición no esencial para las plantas, sus principales emisiones al ambiente son provocadas por las actividades antropogénicas, cómo la manufactura minera, metalurgia y fabricación de baterías (Soler & Rovira, 1996; Roberts, 2014). Éste llega a los campos agrícolas al ser precipitado en aguas de riego contaminadas y por el uso constante de fertilizantes fosfatados; a pesar de que su disponibilidad está controlada por el pH, la capacidad de intercambio catiónico, la materia orgánica, la presencia de óxidos de Al, Fe y Mn, y la competencia a través de transportadores de Ca^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} y Zn^{2+} , es fácilmente absorbido por las plantas, lo cual representa riesgo para la salud al acumularse en hortalizas destinadas al consumo humano (Seshadri *et al.*, 2016; Morikawa, 2017; Zhang *et al.*, 2020).

El caso más representativo de contaminación por Cd ocurrió en Japón, donde por décadas se vertieron desechos mineros en el río Jinzu, ocasionando la acumulación de metales en suelos de cultivo irrigados con estas aguas, lo que provocó la intoxicación de personas de pueblos vecinos que se alimentaban principalmente de arroz. Los síntomas de intoxicación registrados fueron el dolor de articulaciones, la debilidad de huesos y la falla renal, mismos que fueron nombrados cómo enfermedad de *tai-tai* (Kasuya *et al.*, 1992; Gomah *et al.*, 2018).

En plantas superiores, concentraciones tóxicas de Cd alteran la homeostasis de las plantas desencadenando efectos negativos principalmente a nivel fisiológico y en la productividad, esto ocurre porque el Cd presenta una fuerte afinidad por los grupos sulfhidrilo y fosfato de las proteínas, lo que inhibe diversas funciones que involucran estas moléculas (Houri *et al.*, 2020).

Asimismo, la presencia excesiva de metales cómo el Cd en el suelo provoca alteraciones en la germinación, el crecimiento de las plantas, disminución de la apertura de estomas, inhibición de la fotosíntesis, desequilibrio nutrimental y clorosis (White & Brown, 2010; Buendía-Valverde *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2020).

Por otra parte, se han reportado efectos positivos en algunas plantas expuestas a bajas concentraciones de Cd, presentado incrementos en la longitud de brotes, raíces y en el contenido de pigmentos fotosintéticos, lo que sugiere que el Cd tiene curvas dosis-respuesta de estimulación a dosis bajas, es decir que tiene un efecto hormético, esto sugiere que algunas especies poseen mecanismos más eficientes de tolerancia a Cd (Carvalho *et al.*, 2020).

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del tratamiento con 0, 5 y 10 μM Cd en la concentración foliar de macro y micronutrientes, así como de Cd, en las variedades Jalapeño, Poblano y Serrano de *Capsicum annuum* L. cultivadas en hidroponía.

2.3. MATERIALES Y MÉTODOS

2.3.1. Ubicación del estudio y condiciones experimentales

El experimento se llevó a cabo en un invernadero del Colegio de Postgraduados, Texcoco, Estado de México, donde se mantuvieron temperaturas promedio día/noche de $32^{\circ}\text{C}/15^{\circ}\text{C}$, con intensidad luminosa de $137 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, con un fotoperiodo de 11.5 h y una humedad relativa de 31% en el día y de 87% en la noche.

2.3.2. Material vegetal

Se utilizaron plántulas sanas de tres variedades híbridas de *Capsicum annuum* L.: Jalapeño “Emperador” NUN 70030, Poblano “Capulín” y Serrano “Coloso”.

2.3.3. Manejo nutrimental

Plántulas de 60 d de las tres variedades fueron trasplantadas en bolsas negras con tezontle como sustrato. Las plantas fueron irrigadas con solución nutritiva universal Steiner (Steiner, 1984), cuya composición química de macronutrientes en $\text{mol}_e \text{m}^{-3}$ fue: 12NO_3^- , $1 \text{H}_2\text{PO}_4^-$, 7SO_4^{2-} , 7K^+ , 9Ca^{2+} , 4Mg^{2+} . Las concentraciones de micronutrientes empleadas en mg L^{-1} fueron: 5.000 Fe, 2.328 Mn, 0.466 Zn, 0.186 Cu, 0.432 B y 0.173 Mo. La solución nutritiva fue formulada con reactivos grado analítico (JT Baker; PA, USA). La conductividad eléctrica de la solución nutritiva fue de 2dS m^{-1} y se ajustó el pH a 5.5. El riego fue automatizado mediante un sistema por goteo en espagueti, que consistió en 8 riegos de 120 mL, distribuidos durante el día para cada una de las plantas.

2.3.4. Diseño de tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos evaluados de Cd fueron 0, 5 y 10 μM a partir de cloruro de cadmio (CdCl_2 , CAS 10108-64-2 Sigma Aldrich; MO, USA), que fueron suministrados en la solución nutritiva antes descrita. Cada tratamiento tuvo seis repeticiones, mismas que se distribuyeron en un diseño completamente al azar.

2.3.5. Análisis foliar de nutrimentos

Después de 80 d del inicio de tratamientos, las plantas fueron cosechadas en la etapa de madurez fisiológica. Las hojas se secaron a 70 °C en una estufa de aire forzado (Riossa, modelo HCF-125; Guadalajara, México), se molieron a tamaño de partícula (2 mm) tomando una muestra para el análisis químico. La concentración foliar de N se evaluó con el método micro-Kjeldahl en el extracto claro resultante de la digestión ácida de tejido seco con una solución de $\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_3$ en H_2SO_4 a una concentración de 3.3% (Alcántar & Sandoval, 1999). Las concentraciones de P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn y Cd se determinaron en el extracto resultante de la digestión ácida con $\text{HNO}_3:\text{HClO}_4$ (2:1, v:v), con un espectrofotómetro de emisión atómica por plasma acoplado (ICP-OES 725-ES; Agilent; Santa Clara, CA, USA).

2.3.6. Análisis estadístico

A partir de los resultados obtenidos se realizó un análisis de varianza y pruebas de comparación de medias (LSD, $P \leq 0.05$). Las variables evaluadas se correlacionaron con las concentraciones de Cd suministradas en la solución nutritiva con la prueba de correlación de Pearson ($P \leq 0.05$) usando el software SAS (SAS, 2011).

2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Altas concentraciones de Cd son perjudiciales para las plantas debido a que este metal no esencial tiene la capacidad de interferir con los sistemas de absorción de nutrimentos a través de la alteración de la permeabilidad de la membrana plasmática. Al ser absorbido y acumulado en tejidos y compartimentos celulares, puede inhibir la función de biomoléculas como proteínas y enzimas (Brune & Dietz, 1995; Jiang *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2020).

2.4.1. Concentración foliar de macronutrimentos

El N es un macronutriente que forma parte de biomoléculas esenciales incluidas: proteínas, ácidos nucleicos, clorofilas, entre otros, promueve el crecimiento y desarrollo fisiológico de raíces, tallos, hojas y frutos, e induce la absorción y utilización de nutrientes como el K y P. Su deficiencia reduce el crecimiento, provoca clorosis y manchas rojas y moradas en las hojas (Leghari *et al.*, 2016). En este estudio la concentración foliar de N no presentó diferencias estadísticas entre tratamientos en las tres variedades evaluadas (**Figura 2.1**), y se encuentran dentro del rango óptimo de suficiencia de 35 a 50 g kg⁻¹ de materia seca (Mills & Jones, 1996). No obstante, se ha investigado el efecto del Cd en frijol cultivado en hidroponía, donde los tratamientos con 100 μM Cd disminuyeron la actividad de la enzima nitrato reductasa, y afectaron la tasa de absorción de nitrato, por una parte, debido a la disminución en el potencial de la membrana plasmática provocado por la inhibición de la bomba H⁺-ATPasa para iones Cd²⁺, y por otra, por la modificación de la permeabilidad de la membrana plasmática de las células de la raíz (Gouia *et al.*, 2000).

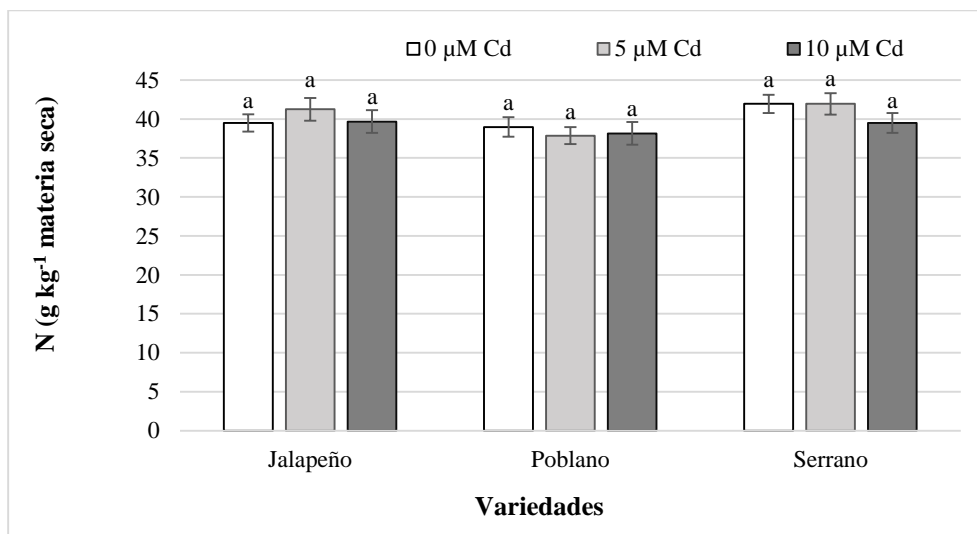


Figura 2.1. Concentración foliar de nitrógeno (N) en tres variedades de chile tratadas con Cd durante 80 d. Medias ± DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

La concentración de P en las variedades Jalapeño y Poblano se encuentran dentro del rango de suficiencia de 2.2 a 7 g kg⁻¹ reportado por Mills & Jones (1996), mientras que en la variedad Serrano las concentraciones se encuentran por debajo de éste. La dosis 5 μM Cd redujo la concentración foliar de P en la variedad Jalapeño en 22%; mientras que, en la variedad Serrano la incrementó en 20%, en ambos casos respecto a los testigos (**Figura 2.2**).

Aumentos en la concentración de P se reportaron en plantas de mostaza india (*Brassica juncea*) tratadas con 10 a 90 mg Cd kg⁻¹, siendo éstos exponenciales de acuerdo con el incremento de la concentración de Cd (Jiang *et al.*, 2004). Igualmente, se reporta un aumento en la concentración de P en brotes de tomate (*S. lycopersicum* var. *esculentum*, Calabash Rouge) después de 7 d de exposición a 35 µM Cd (Gouia *et al.*, 2000). Asimismo, en plantas de Arabidopsis (*Arabidopsis thaliana*) se presentaron incrementos en la concentración de P al aplicar tratamientos de 5 a 40 µM Cd (Lešková *et al.*, 2017). Contrario a lo anterior, se reporta una reducción en la concentración de P en plantas de cebada [*Hordeum vulgare* (cv. Gerbel)] cultivadas en hidroponía y tratadas con 10 µM Cd (Brune & Dietz, 1995).

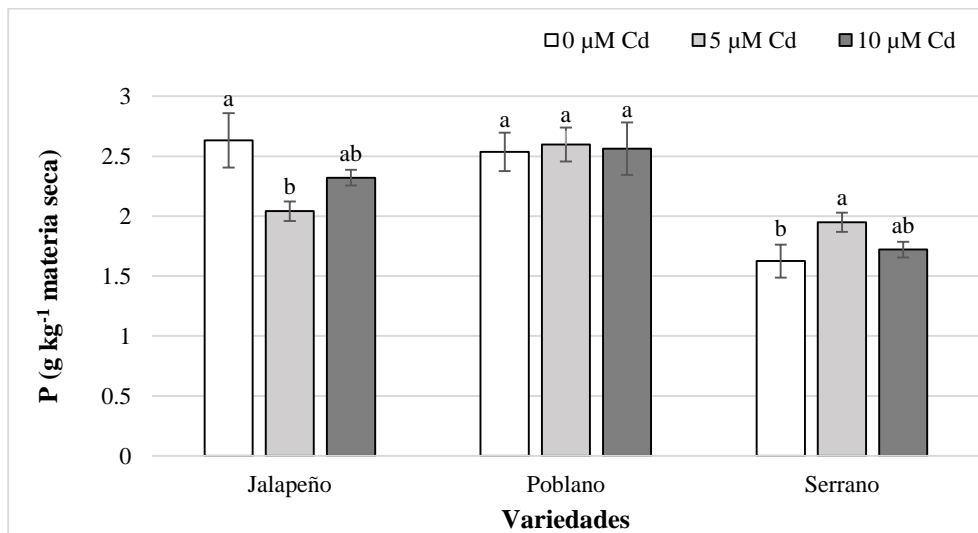


Figura 2.2. Concentración foliar de fósforo (P) en tres variedades de chile tratadas con Cd durante 80 d. Medias ± DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

La concentración foliar de K en las variedades estudiadas se encuentran dentro del rango óptimo (40 a 60 g kg⁻¹ de materia seca, Uchida, 2000) en plantas de chile. En Poblano, la dosis de 5 µM Cd incrementó 15.8% con respecto al testigo (Figura 2.3). Éstos aumentos se han presentado en plantas de Arabidopsis (*Arabidopsis thaliana*) expuestas de 5 a 40 µM Cd (Lešková *et al.*, 2017); así también en mostaza india, los tratamientos de 10 a 190 mg kg⁻¹ provocaron incrementos que se atribuyen a cambios en la membrana plasmática de las células de la raíz (Jiang *et al.*, 2004). En la membrana celular, los canales iónicos de K⁺ se abren y cierran en respuesta a señales ambientales y cambios en el potencial eléctrico y son determinantes para el transporte de K hacia los compartimentos celulares (Reddy, 2006). Por otro lado, plantas de tomate mostraron mayor

concentración de K cuando se expusieron a 35 μM Cd durante 7 días, esta elevación parece estar asociada a procesos energéticos, transporte de metabolitos, activación de enzimas y señalización hormonal que la planta desarrolla para hacer frente al estrés causado por el Cd (Borges *et al.*, 2019). Contrario a estos aumentos, Brune & Dietz (1995) reportan descensos en la concentración de K en plantas de cebada [*Hordeum vulgare* (cv. Gerbel)] cultivadas en hidroponía con 10 μM Cd. Además, halófitas también exhibieron disminuciones significativas de K en dos especies expuestas a Cd: *Mesembryanthemum crystallinum* (50 a 300 μM Cd) y *Sesuvium portulacastrum* (200 y 300 μM Cd); concentraciones deficientes de K afectan la turgencia, elasticidad de la pared celular y tamaño celular, factores que conducen a la deshidratación (Reddy, 2006; Ghnaya *et al.*, 2005).

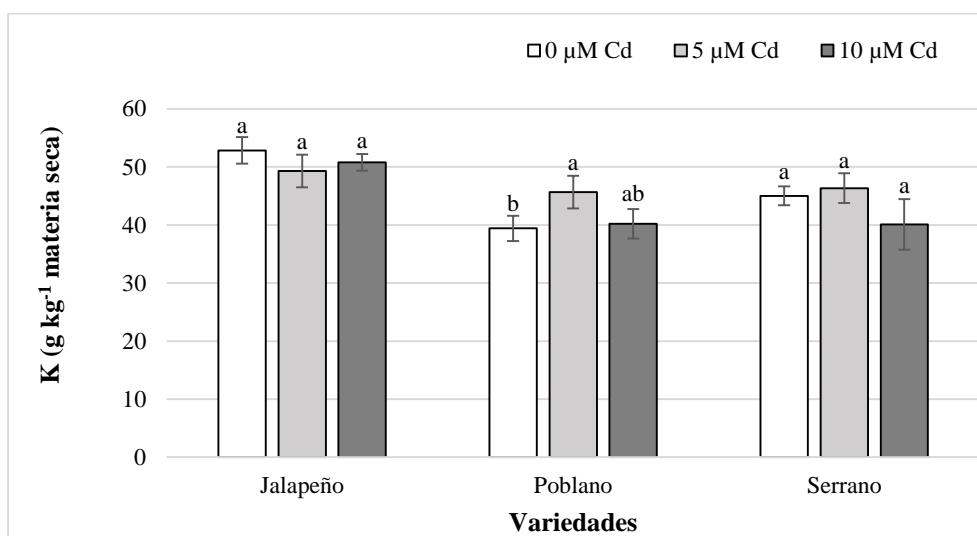


Figura 2.3. Concentración foliar de potasio (K) en tres variedades de chile tratadas con Cd durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

La concentración foliar de Ca de las variedades estudiadas se encuentra dentro del rango óptimo reportado para plantas de chile por Uchida (2000), que va de 10 a 25 g kg^{-1} de materia seca. No obstante, en la variedad Jalapeño los tratamientos con 5 y 10 μM Cd redujeron la concentración en 12 y 8 % respectivamente, en comparación con el testigo (Figura 2.4). Estas disminuciones se han registrado en plantas de *Arabidopsis*, donde reducciones del 14 y 34% se presentaron al aplicar 20 y 40 μM Cd, respectivamente (Lešková *et al.*, 2017).

De igual forma, en plantas de cebada la administración de 10 μM Cd mostró descensos en la concentración de Ca, esto ocurre porque metales como el Cd provocan competencia entre

nutrientes esenciales y alteran el metabolismo de la planta a través del daño a biomoléculas como proteínas, además, este efecto también está relacionado con la alteración en los procesos de absorción, ya que el Ca tiene un papel primordial de ligando en las células de la raíz (Brune & Dietz, 1995). Así mismo, plantas de mostaza india presentan disminuciones en la concentración de Ca al suministrar de 110 a 190 mg Cd kg⁻¹; sin embargo, al aplicar de 70 a 110 mg Cd kg⁻¹ la concentración de Ca aumenta (Jiang *et al.*, 2004). De igual manera, en plantas halófitas expuestas a Cd: *Sesuvium portulacastrum* (50 y 200 μM), y *Mesembryanthemum crystallinum* (50 a 300 μM), se presenta mayor concentración de Ca en comparación con las plantas no tratadas con Cd (Ghnaya *et al.*, 2005).

Se ha documentado que el Ca tiene una función clave en la pared y membrana celular, es decir, su interacción es esencial para mantener su integridad; no obstante, ante la presencia de Cd, aumentos de la concentración de Ca se establecen como un probable mecanismo de la planta para contrarrestar los efectos tóxicos del Cd, mientras que las disminuciones de Ca se proponen como un síntoma de daño en el sistema de defensa (Jiang *et al.*, 2004).

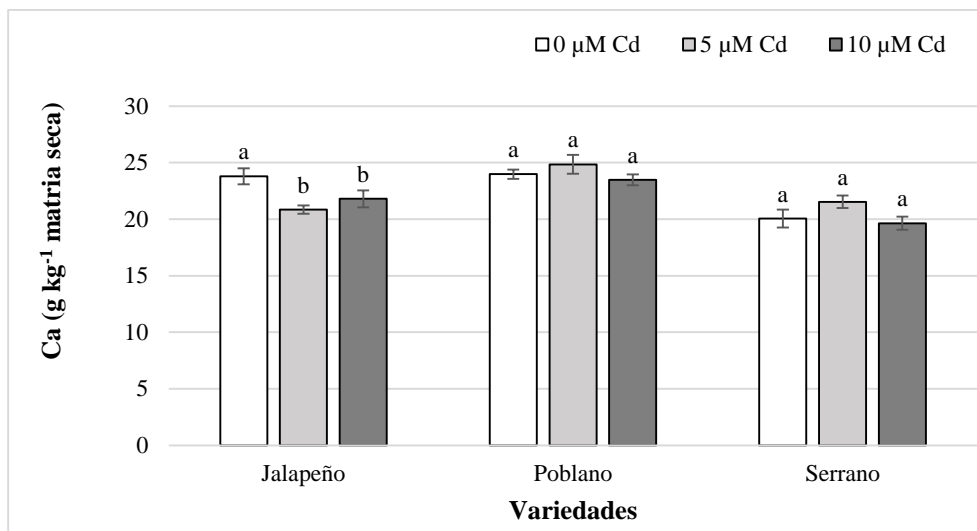


Figura 2.4. Concentración foliar de calcio (Ca) en tres variedades de chile tratadas con Cd durante 80 d. Medias ± DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

La concentración foliar de Mg en las variedades de estudio se encuentra por encima del rango de suficiencia reportado por Uchida (2000) para plantas de chile (3 a 10 g kg⁻¹ de materia seca). Incrementos en la concentración de Mg han sido reportados en plantas de mostaza india tratadas con 10 a 190 mg Cd kg⁻¹ (Jiang *et al.*, (2004); plantas de *Arabidopsis* expuestas de 5 a 20 μM Cd

(Lešková *et al.*, 2017); cultivares de tomate tratados con 35 μM Cd donde los aumentos de la concentración de Mg son una desventaja, ya que disminuyen la biomasa de las plantas (Borges *et al.*, 2019).

Por otra parte, las reducciones del 23 y 17% en la concentración de Mg observadas en los tratamientos con 5 y 10 μM Cd en chile Jalapeño (Figura 2.5), concuerdan con los descensos del 6.49% reportados en plantas de cebada tratadas con 10 μM Cd (Brune & Dietz, 1995). Estos resultados refuerzan la idea de que bajas concentraciones de Mg tanto en vástago como en raíz se presentan en genotipos tolerantes a Cd; cabe señalar que el mecanismo favorecedor o dañino del Mg en plantas cultivadas en presencia de Cd aún no son contundentes (Borges *et al.*, 2019).

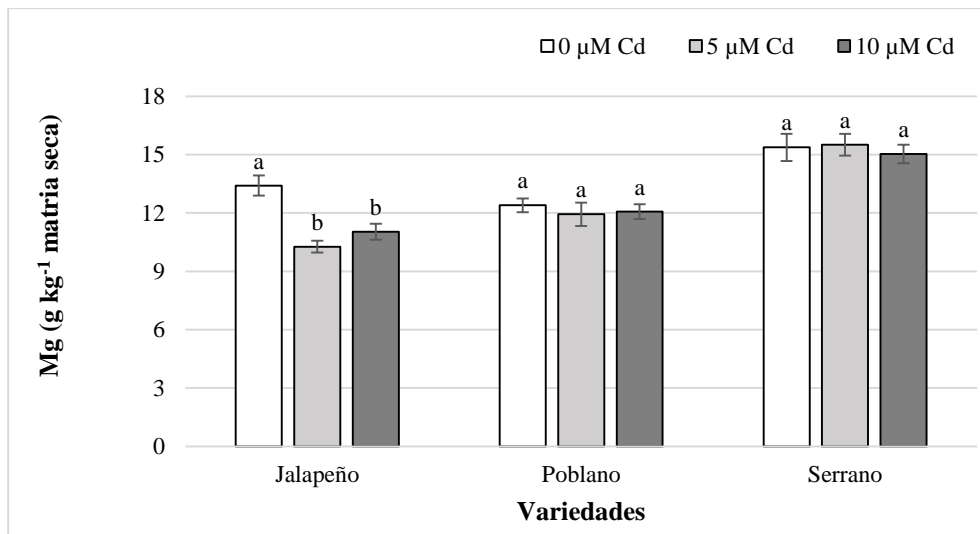


Figura 2.5. Concentración foliar de magnesio (Mg) en tres variedades de chile tratadas con Cd durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

La concentración foliar de S en las variedades estudiadas se encuentra dentro del rango de 1 a 10 g kg^{-1} de peso seco reportado para un crecimiento y desarrollo óptimo en plantas por Matraszek *et al.* (2016). Por su parte, el tratamiento con 10 μM Cd incrementó significativamente la concentración foliar de S en 27, 18 y 24% en las variedades Jalapeño, Poblano y Serrano respectivamente, en comparación con los testigos (Figura 2.6). Estos resultados coinciden con Borges *et al.* (2019), quienes encontraron incrementos en la concentración de S en brotes de plantas de tomate expuestas a 35 μM Cd, de igual manera, este efecto se repitió en plantas de *Arabidopsis* expuestas de 5 a 40 μM Cd (Lešková *et al.*, 2017).

Se ha establecido que altas concentraciones de S en las plantas tratadas con Cd reducen la absorción de nutrimentos esenciales como el N; por otro lado, se ha supuesto que el exceso de S en hojas de plantas expuestas a Cd es un mecanismo para traslocar y secuestrar el Cd en las vacuolas (Lu *et al.*, 2019). Es necesario destacar la interacción que posee el Cd al unirse al S, por ello su gran afinidad a los grupos sulfhidrilo de las proteínas, importantes en la regulación de la homeostasis dentro de la célula (Przedpełska-Wąsowicz *et al.*, 2012).

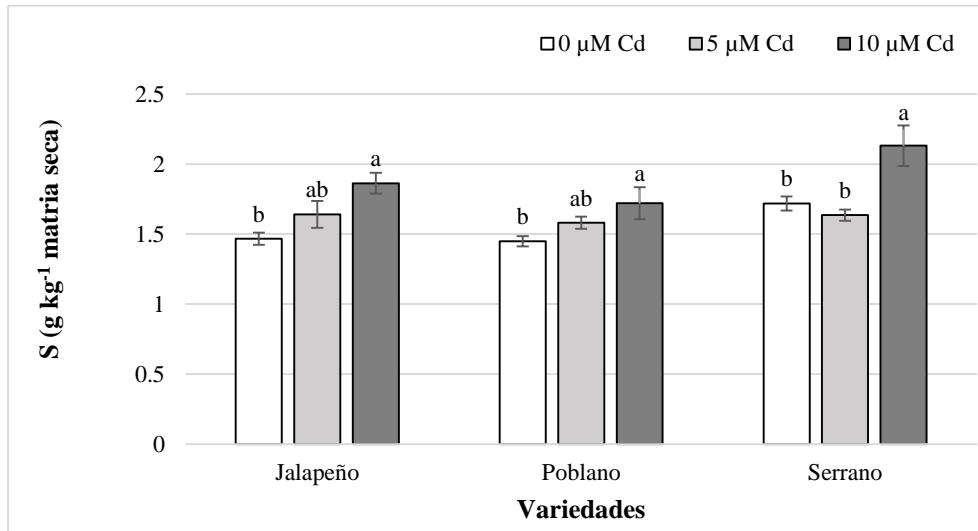


Figura 2.6. Concentración foliar de azufre (S) en tres variedades de chile tratadas con Cd durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

2.4.2. Concentración foliar de micronutrimentos

Las concentraciones foliares de B en las tres variedades de estudio se encuentran por encima del rango de suficiencia de 25 a 75 mg kg⁻¹ reportado en cultivares de chile por Uchida (2000). Por otra parte, al llevar a cabo el análisis entre tratamientos, encontramos que el Cd disminuyó la concentración foliar de B en las tres variedades de chile, con respecto a su testigo, causando una reducción de 27% con 5 μM en Jalapeño, 32 y 18% con 5 y 10 μM en Poblano, y de 23 y 15% con 5 y 10 μM en serrano (Figura 2.7). Los resultados aquí obtenidos concuerdan con Brune & Dietz (1995), quienes reportan que plantas de cebada cultivadas en hidroponía con 10 μM Cd presentan reducción en la concentración foliar de B. Por el contrario, se han citado incrementos en la concentración de B en plantas de tomate expuestas a 35 μM Cd por 7 d, con acumulación de B en sus brotes (Borges *et al.*, 2019). Por otra parte, Carvalho *et al.* (2019), encontraron que la tolerancia a Cd en plantas de tomate está regulada por el equilibrio de nutrimentos esenciales como el B, Mg

y Mn, quienes tienen un papel primordial en la toxicidad del Cd, siendo la acumulación foliar de B un posible mecanismo de tolerancia para reducirla, sobre todo en presencia de incrementos de Mn, respuestas que concuerdan con nuestro estudio.

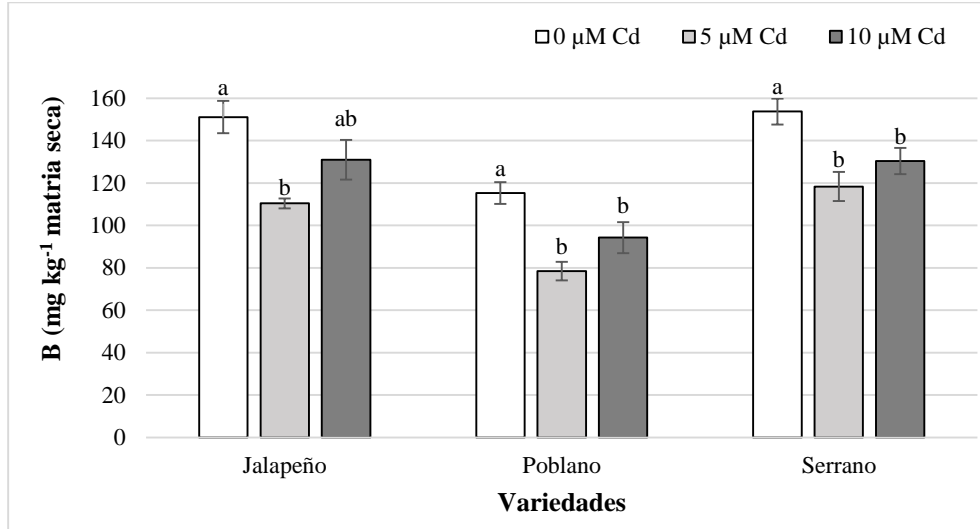


Figura 2.7. Concentración foliar de boro (B) en tres variedades de chile tratadas con Cd durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

Con excepción del testigo en Jalapeño, la concentración foliar de Cu en las variedades de chile en estudio se encuentra por debajo de los 6 mg kg^{-1} de materia seca, nivel de suficiencia para un crecimiento adecuado en plantas superiores (Marschner, 2012). Por otra parte, solo en Jalapeño se presentaron diferencias estadísticas, observándose que las dosis 5 y $10 \mu\text{M Cd}$ redujeron la concentración de Cu en 64.4 y 43.1% con respecto al testigo (Figura 2.8). Estas disminuciones se han presentado en hojas maduras de plantas de tomate expuestas de 20 y $100 \mu\text{M Cd}$ (Hédiji *et al.*, 2015); en plántulas de papa tratadas de 50 a $200 \mu\text{M Cd}$ en hidroponía (Gonçalves *et al.*, 2009); y en plantas de tomate expuestas a $35 \mu\text{M Cd}$ (Borges *et al.*, 2019).

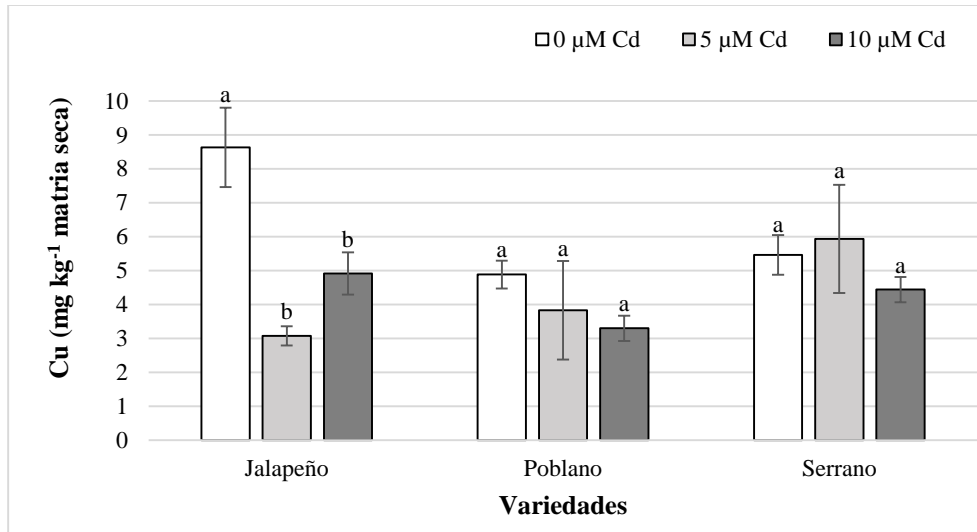


Figura 2.8. Concentración foliar de cobre (Cu) en tres variedades de chile tratadas con Cd durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

Las concentraciones foliares de Fe registradas en este estudio se encuentran dentro del rango de suficiencia de 60 a 300 mg kg⁻¹ reportado para plantas de chile (Uchida, 2000) y no fueron afectadas por los tratamientos con Cd (Figura 2.9). Contrario a lo anterior, se han reportado aumentos en la concentración de Fe en brotes de mostaza india al aplicar de 10 a 190 mg Cd kg⁻¹ (Jiang *et al.*, 2004). También se han reportado incrementos en la concentración foliar de Fe en plantas de cebada expuestas a 10 μM Cd (Brune & Dietz, 1995), y en plantas de tomate tratadas con 35 μM Cd después de 7 d de exposición (Borges *et al.*, 2019). Por el contrario, la administración de 5 a 40 μM Cd en plantas de *Arabidopsis* provocó un descenso significativo en la concentración de Fe (Lešková *et al.*, 2017).

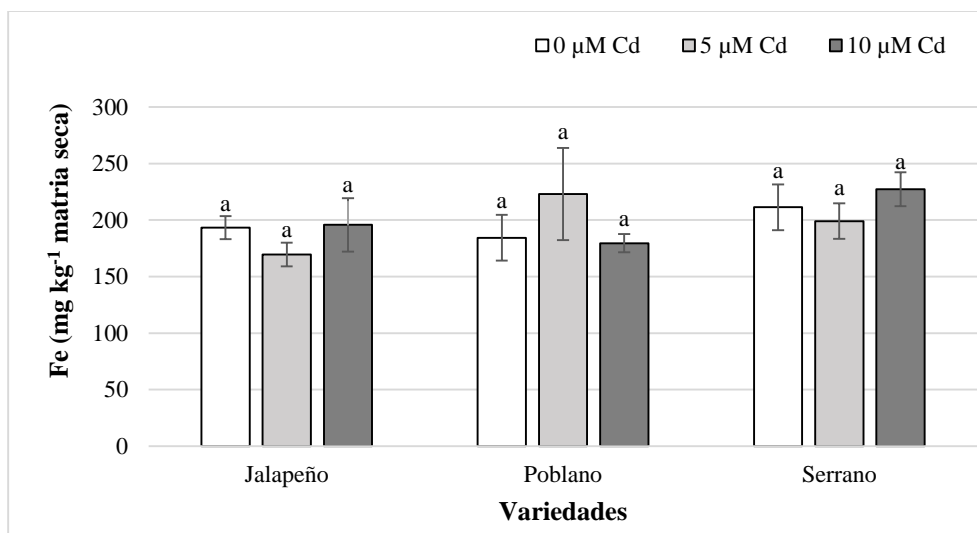


Figura 2.9. Concentración foliar de hierro (Fe) en tres variedades de chile tratadas con Cd durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

La concentración foliar de Mn en las variedades de estudio se encuentran dentro del rango de suficiencia de 50 a 250 mg kg⁻¹ reportado para plantas de chile por [Uchida \(2000\)](#). Se presentaron incrementos en la concentración de Mn en hojas de 55, 96 y 89% en las variedades Jalapeño, Poblano y Serrano respectivamente, al aplicar 10 μM Cd, y del 98% en Serrano al aplicar 5 μM Cd (**Figura 2.10**). Estos incrementos concuerdan con lo reportado en cultivares comerciales de tomate var. *esculentum* Calabash Rouge, tratados con 35 μM Cd, donde se establece que el exceso de Mn en hojas eleva el grado de toxicidad en las plantas ante el suministro de Cd ([Borges et al., 2019](#)). De manera contraria, se reportan disminuciones en la concentración de Mn en hojas de cebada cultivada en hidroponía con tratamientos de 10 μM Cd ([Brune & Dietz, 1995](#)), y en *Arabidopsis* expuestas a 20 y 40 μM Cd ([Lešková et al., 2017](#)).

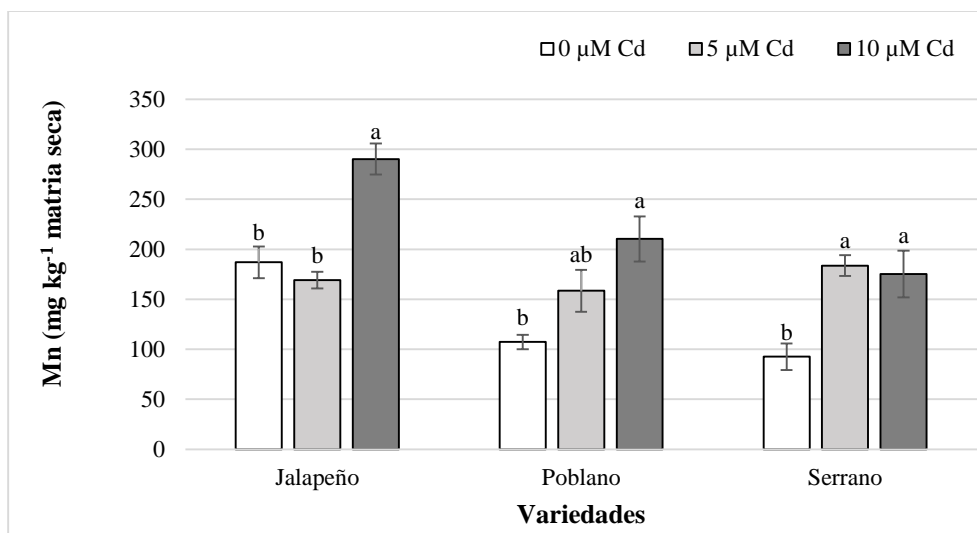


Figura 2. 10. Concentración foliar de manganeso (Mn) en tres variedades de chile tratadas con Cd durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

La concentración foliar de Zn en las variedades de estudio es mayor al del nivel de suficiencia (20 mg kg^{-1}) reportado para un óptimo crecimiento en plantas superiores (Marschner, 2012). Sin embargo, los tratamientos con 5 y $10 \text{ } \mu\text{M}$ Cd provocaron una reducción significativa de Zn en las tres variedades de chile (Figura 2.11). Estas disminuciones se han reportado en diversas plantas: en tomate Pusa Ruby tratadas con $35 \text{ } \mu\text{M}$ Cd por 7 d (Borges *et al.*, 2019); en *Arabidopsis* expuestas a $40 \text{ } \mu\text{M}$ Cd (Lešková *et al.*, 2017); en cebada con aplicación de $10 \text{ } \mu\text{M}$ Cd cultivadas en hidroponía (Brune & Dietz, 1995). En brotes de mostaza india se observaron respuestas duales, dependientes de la concentración de Cd; el tratamiento con 110 a $190 \text{ mg Cd kg}^{-1}$ reduce la concentración de Zn, mientras que, la concentración de 10 a $110 \text{ mg Cd kg}^{-1}$ aumentó la acumulación de Zn (Jiang *et al.*, 2004). En plántulas de papa el suministro de 50 a $200 \text{ } \mu\text{M}$ Cd no produjo efecto en la concentración de Zn (Gonçalves *et al.*, 2009). El Cd y el Zn comparten el estado de oxidación +2 y un radio atómico similar, debido a esto, se ha planteado que existe una competencia por los sitios de acceso y movilización entre estos dos metales, ya que se ha observado que plantas de *Arabidopsis halleri* sometidas a concentraciones altas de $225 \text{ } \mu\text{M}$ Cd presentan descensos en la concentración de Zn; no obstante, se ha sugerido que estas alteraciones nutrimentales también son mediadas por mecanismos homeostáticos, donde la formación de complejos estables entre el Cd y proteínas ricas en cisteína como las metalotioneínas y fitoquelatinas, ayudan a desintoxicar y mantener estable la concentración de iones metálicos en ecotipos sensibles a Cd (Przedpeńska-Wąsowicz *et al.*, 2012; Seshadri *et al.*, 2016).

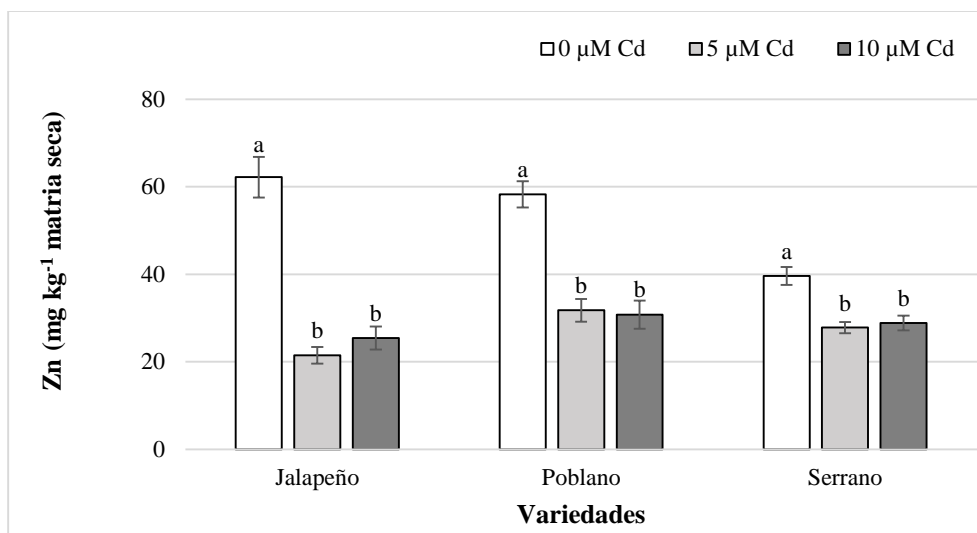


Figura 2.11. Concentración foliar de zinc (Zn) en tres variedades de chile tratadas con Cd durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

2.4.3. Concentración foliar de Cd

Por otro lado, la concentración foliar de Cd en las variedades de chile tratadas con Cd se encuentra en el rango de 10 a 95 mg Cd kg⁻¹ de peso seco, el cual es considerado tóxico para plantas (Matraszek *et al.*, 2016); sin embargo, no se presentaron síntomas visibles de fitotoxicidad. La concentración foliar de Cd se relacionó de manera positiva con la concentración de Cd adicionada a la solución nutritiva como se observa en la **Figura 2.12**. Las mayores concentraciones de Cd se registraron en Poblano (23.09 y 38.33 mg kg⁻¹ materia seca con 5 y 10 μM Cd, respectivamente); mientras que, las menores en Serrano (12 y 24.08 mg kg⁻¹ materia seca con 5 y 10 μM Cd, respectivamente). En plantas de mostaza india tratadas con Cd en un rango de 10 a 190 mg Cd kg⁻¹, la concentración de Cd registró una concentración máxima de 160 mg Cd kg⁻¹ de peso seco en los brotes (Jiang *et al.*, 2004). De manera semejante, plantas de cebada expuestas a 10 μM Cd presentaron un aumento en la concentración foliar de 0.27 μmol Cd g⁻¹ con respecto al testigo (Brune & Dietz, 1995). Asimismo, se reportan concentraciones de 200, 238 y 280 μg Cd g⁻¹ en plantas de *Arabidopsis* tratadas con 5, 20 y 40 μM Cd, respectivamente (Lešková *et al.*, 2017). Cabe señalar que plantas expuestas a Cd desarrollan un mecanismo homeostático que limita la traslocación de Cd hacia las hojas, lo cual representa una ventaja para proteger el aparato fotosintético (Borges *et al.*, 2019).

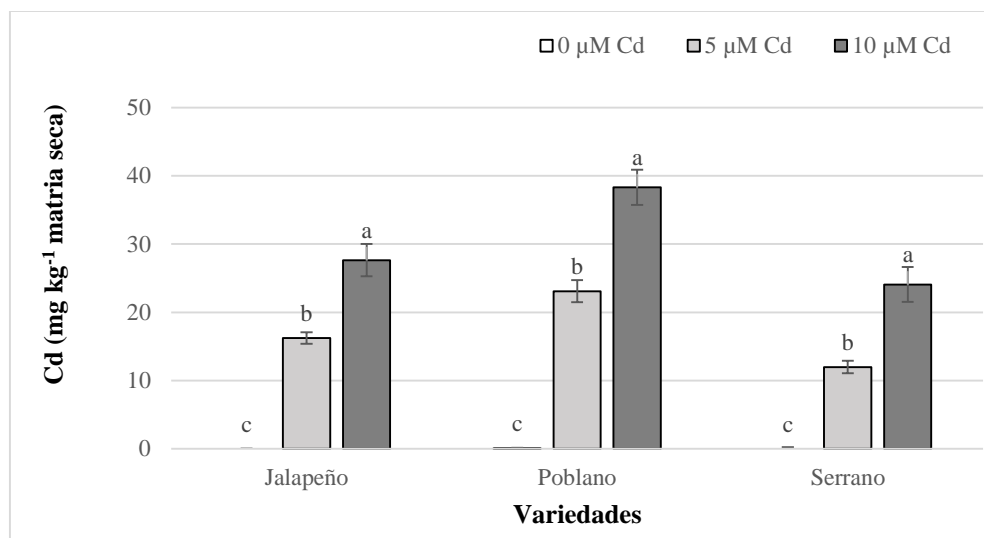


Figura 2.12. Concentración foliar de cadmio (Cd) en tres variedades de chile tratadas con Cd durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

2.4.4. Correlaciones significativas entre concentraciones foliares de Cd y de los nutrimentos

En la **Figura 2.13** se presentan las correlaciones significativas entre las concentraciones de Cd y las de nutrimentos en hojas. En las tres variedades, las concentraciones foliares de S y Mn muestran una correlación positiva alta con la concentración foliar de Cd. Asimismo, en las tres variedades se registraron correlaciones negativas, altas en Jalapeño y Serrano y muy altas en Poblano, entre la concentración foliar de Cd y la de Zn. Por otro lado, solo en la variedad Jalapeño se tuvo una correlación negativa alta entre las concentraciones foliares de Cd y la de Mg; así como correlación negativa moderada entre las concentraciones de Cd y las de Cu. Entre las concentraciones de Cd y las de B en hojas, se observaron correlaciones negativas moderadas en las variedades Poblano y Serrano.

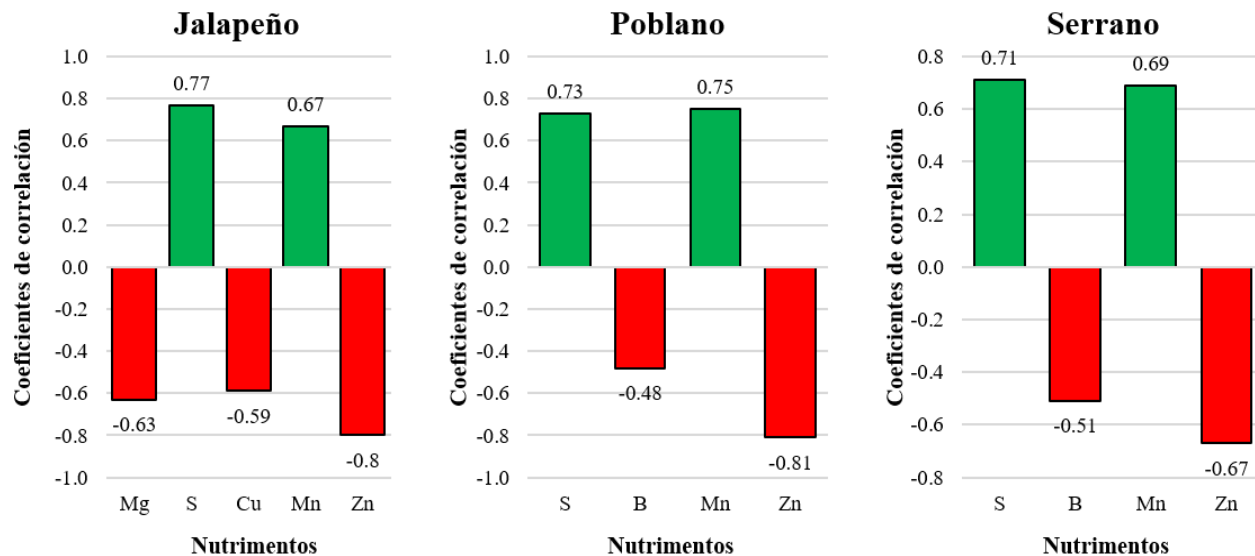


Figura 2.13. Coeficientes de correlación significativos entre la concentración foliar de Cd y la de nutrimentos en tres variedades de chile tratadas con Cd.

2.5. CONCLUSIONES

El mecanismo por el cual el Cd afecta la captación y translocación de nutrimentos en las plantas aún no es claro; sin embargo, las variedades de chile utilizadas mostraron ser un modelo ideal para estudiar la alteración nutrimental que causa este metal no esencial. Los tratamientos con Cd provocaron efectos diferenciales en la concentración de macro y micronutrimentos en Jalapeño, Poblano y Serrano. Destacamos que el Cd alteró la concentración de P en Jalapeño y Serrano, incrementó la concentración de K en Poblano, estimuló la concentración de S y Mn en las tres variedades; mientras que, causó reducciones en la concentración de Ca, Mg y Cu en Jalapeño y en la concentración de B y Zn en las tres variedades estudiadas. Finalmente, el Cd se bioacumula en las hojas de las tres variedades tratadas con Cd.

CAPÍTULO 3. ESTATUS NUTRIMENTAL DE TRES VARIEDADES DE CHILE TRATADAS CON VANADIO

3.1. RESUMEN

El vanadio (V) es un metal de transición que en los últimos años ha sido considerado un elemento benéfico con alto potencial en plantas. Su uso como bioestimulante en la nutrición vegetal es reciente por parte de algunos grupos de investigadores, y aunque sus resultados aún se encuentran en discusión, se ha determinado que pequeñas concentraciones de V pueden inducir efectos positivos en diversos procesos fisiológicos en las plantas. Sin embargo, los resultados dependen del tiempo, método de aplicación y la cantidad de V. Por lo anterior, se evaluaron los efectos del V en la concentración foliar de macronutrientes (N, P, Ca, K, Mg, S) y micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn y Zn) en tres variedades de *Capsicum annuum* L. (Jalapeño, Poblano y Serrano), añadiendo 0, 0.75 y 1.5 μM V a la solución nutritiva por 80 d, al término de la fase vegetativa se determinó la concentración de nutrientes en el tejido foliar. Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza y una comparación de medias con LSD ($P \leq 0.05$). Se encontró que el V provoca efectos diferenciales en la concentración foliar de macro y micro nutrientes en plantas de chile, estimulando la absorción de N, Fe y Mn en Jalapeño, Poblano y Serrano; de P, Ca y Cu en Poblano y Serrano; de K y Mg en Poblano; de S en Jalapeño y Poblano; y de Zn en Serrano. Concluimos que la tolerancia adaptativa que presentaron las plantas de chile ante la aplicación del V nos sugiere mecanismos homeostáticos eficientes que permiten avanzar en el estudio del V como bioestimulante, sin embargo, es necesario llevar a cabo más estudios que nos permitan precisar su utilización en diferentes cultivos.

3.2. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la demanda de productos agrícolas, el cambio climático y la contaminación, han llevado a buscar nuevas alternativas para satisfacer las necesidades alimenticias de la población, una opción ante estos desafíos es el uso de bioestimulantes, los cuales mejoran la absorción de nutrimentos, estimulan el desarrollo, optimizan la eficiencia de los cultivos y la tolerancia al estrés biótico y abiótico (Van Oosten *et al.*, 2017; Yakhin *et al.*, 2017).

Dentro de los bioestimulantes inorgánicos encontramos a elementos benéficos como el aluminio (Al), cobalto (Co), sodio (Na), selenio (Se) y silicio (Si), debido a que a bajas concentraciones mejoran la productividad de las plantas; sin embargo, otros elementos incluidos el rubidio (Rb), el cerio (Ce), el yodo (I), el lantano (La), el titanio (Ti) y el vanadio (V) también poseen estas propiedades, por lo que diversos autores los consideran elementos benéficos (Pilon-Smits *et al.*, 2009; Du Jardin, 2015; Gómez-Merino *et al.*, 2015).

Por su parte, el V es un metal de transición del grupo 5B, de número atómico 23, punto de fusión de 1910 °C, punto de ebullición de 3407 °C, densidad relativa de 6.11 g cm⁻³, un peso atómico de 50.95 g mol⁻¹, radio atómico de 1.92 Å y estados de oxidación +2, +3, +4 y +5, lo cual le permite formar diversos compuestos (WHO, 1988). Fue descubierto en 1801 por el mineralogista español Andrés Manuel del Río en Zimapán, estado de Hidalgo, México, el cual llamó “eritronio” (del griego *eritro*, rojo), a pesar de ello, en 1830 fue redescubierto por Nils Gabriel Sefström; finalmente, en 1931 Friedrich Wöhler reafirmó que el V de Sefström era el mismo eritronio de Del Río (Baran, 2017).

El V es relativamente abundante en nuestro planeta, ocupando la quinta posición en la corteza terrestre, puede hallarse en depósitos de agua como ríos, lagos y océanos, donde los sedimentos pueden alcanzar 100 mg V g⁻¹. En agua para consumo humano no deben exceder los 5 µg L⁻¹. Sin embargo, ambos niveles pueden variar de acuerdo a las diferencias geográficas, las fuentes naturales y los efluentes industriales (WHO, 1988; Del Carpio *et al.*, 2018).

La primera evidencia de la presencia de V en plantas la aportó en 1888 el químico y naturalista alemán Edmund Oscar Von Lippmann, el cual halló vanadita en desechos carbonizados de remolacha azucarera (Rehder, 2008).

Durante mucho tiempo, el V fue un elemento poco estudiado, antes de la década de los 50's se señalaba que era tóxico, aún a bajas concentraciones para las plantas, ya que reducía el crecimiento (Olness *et al.*, 2000); no obstante, Arnon & Wessel (1953), indicaron que el V es un elemento esencial para las plantas.

En mamíferos e invertebrados marinos, el V participa en la absorción y la degradación de carbohidratos y lípidos, además, es centro activo en la estructura de algunas enzimas (haloperoxidasas), y tiene una estrecha interferencia con aminoácidos incluidos la cisteína, histidina y glicina, así como de sales fosfatos, oxalato y citrato (Contreras-Cadena *et al.*, 2014; Del Carpio *et al.*, 2018).

Aunque no se conoce la función específica del V sobre diversas enzimas, en estudios en plasma humano se sabe que puede bloquear la actividad de las ATPasas, ribonucleasas y fosfatasas, probablemente por esto, muchos estudios están enfocados en el desarrollo de nuevos fármacos que imitan la actividad de la insulina, por otra parte, algunos complejos de V también presentan propiedades antivirales, antifúngicas, anticancerígenas y antiobesidad (Baran, 2017; Semiz, 2021).

En el suelo, el V posee una fuerte afinidad por la materia orgánica y arcillas a las que se une cuando se presentan pH bajos, además, puede unirse a elementos como el Fe, Al, Mn, Cu, Zn, Pb y Ca, donde las formas más frecuentes son los vanadatos (VO_4^{-3}), éstos entran a la planta a través de los canales aniónicos que utiliza el fosfato (PO_4^{-3}), esto ocurre debido a su similitud; mientras que, el catión vanadilo (VO^{+2}) ingresa a la célula por difusión pasiva (Aihemaiti *et al.*, 2020).

En plantas se ha observado que el V se acumula de forma decreciente en raíces, hoja y tallo; mientras que, a nivel celular ocurre en pared celular, citoplasma, núcleo, mitocondrias y cloroplastos (Aihemaiti *et al.*, 2020). Entre las alteraciones que causa en la planta se han citado la clorosis y reducción de la longitud de planta (Anke, 2004).

Por lo que se refiere a los efectos benéficos, se ha reportado que cantidades traza de V en tejido vegetal (2 ng g^{-1} de materia seca), estimulan el crecimiento de lechuga y el tomate (Wang & Liu, 1999); mientras que, concentraciones bajas de V aceleran la germinación en arroz (Zhao *et al.*, 2007). En semillas de chile Jalapeño y Serrano, las dosis 25 y 50 μM V, estimulan el índice de germinación e incrementan la longitud de radícula; asimismo, estimulan la longitud de vástago en plántulas de chile Jalapeño y Poblano (Buendía-Valverde *et al.*, 2018).

Actualmente existen pocos estudios sobre el efecto del V en el estatus nutrimental de plantas de chile; por lo anterior, que el objetivo de esta investigación fue determinar el efecto que produce el V en la concentración foliar de macro y micro nutrimentos en plantas de chile (*Capsicum annuum* L.) de Poblano, Jalapeño y Serrano.

3.3. MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en el Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo, en Texcoco, Estado de México, a una altitud de 2250 m, 19° 29' LN y 98° 54' LW, en un invernadero de estructura metálica y cubierta de polietileno. Se utilizaron plantas sanas de *Capsicum annuum* L. de 60 d de crecimiento de las variedades: Jalapeño “Emperador” NUN 70030, Poblano “Capulín” y Serrano “Coloso”, las cuales fueron sembradas en bolsas de plástico con tezontle como sustrato y distribuidas completamente al azar con seis repeticiones, irrigadas por un sistema de riego por goteo con solución nutritiva Steiner (Steiner, 1984) adicionada con 0, 0.75 y 1.5 μM V, suministrado en metavanadato de amonio (NH_4VO_3 CAS 7803-55-6 Sigma Aldrich; MO, USA) durante 80 d. Después del tratamiento, se llevó a cabo el corte de la planta, separando el tallo de la hoja, el material vegetal fue secado a 72 °C en una estufa de aire forzado (Riossa 76 modelo HCF-125d; Monterrey, N. L., México) por 48 h.

El material vegetal se molió, se llevó a cabo la concentración de N por el método Semi-micro Kjeldhal, del extracto resultante de la digestión ácida con ácido sulfúrico-salicílico se destiló y se tituló con H_2SO_4 0.05 N. Para determinar la concentración de P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn y Cd el material vegetal se digestó con ácido perclórico y ácido nítrico siguiendo la metodología descrita por Alcántar & Sandoval (1999), empleando un espectrofotómetro de emisión atómica por plasma acoplado (ICP-OES 725-ES; Agilent; Santa Clara, CA, USA).

3.3.1 Análisis estadístico

A partir de los datos obtenidos se realizaron análisis de varianza y pruebas de comparación de medias (LSD, $P \leq 0.05$) para cada variedad usando software SAS (SAS, 2011).

3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.4.1. Concentración foliar de macronutrimentos

La concentración obtenida para N en las tres variedades de chile se encuentra dentro del rango óptimo reportado por [Johnson & Decotearu \(1996\)](#) que va de 38 a 42 g kg⁻¹ materia seca.

Las variedades Jalapeño y Serrano presentan incrementos en la concentración foliar de N con respecto al testigo, sin embargo, éstos no son significativos. Por otra parte, en Poblano los tratamientos con 0.75 µM V provocaron un incremento del 16% con respecto al testigo (**Figura 3.1**). Concentraciones menores a 2 mg V L⁻¹ mejoran la absorción y asimilación de nitrógeno, esto se debe a que el V es cofactor de la enzima nitrogenasa (V-nitrogenasa), la cual es responsable de la fijación biológica del N, favoreciendo así el crecimiento de las plantas, no obstante, el exceso de V puede inhibir la nitrato reductasa, responsable del incremento de N ante la presencia de V ([Hu et al., 2012](#); [García-Jiménez et al., 2018](#); [Aihemaiti et al., 2020](#)). Además, el V presenta un papel esencial para algunas especies de bacterias y hongos fijadoras de nitrógeno ([Anke, 2004](#)).

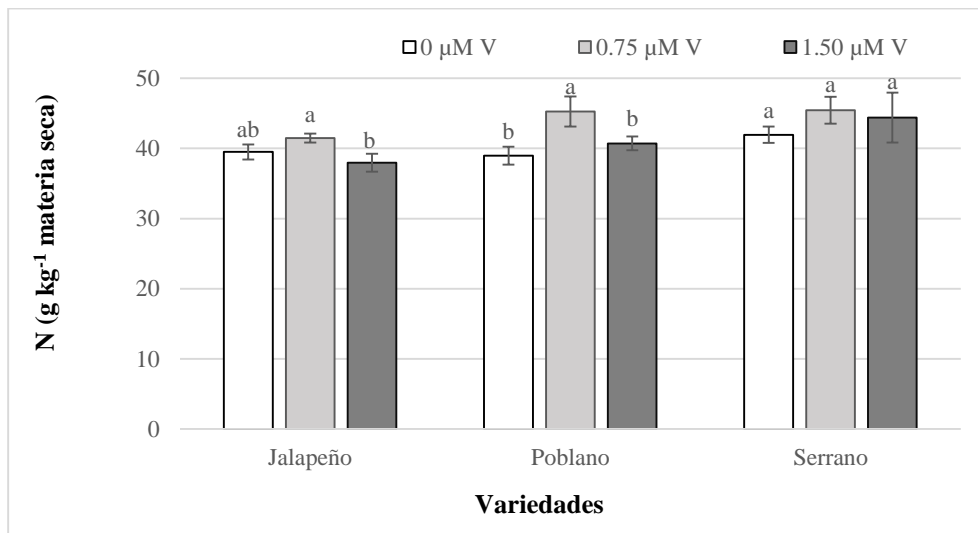


Figura 3.1. Concentración foliar de nitrógeno (N) en tres variedades de chile tratadas con V durante 80 d. Medias ± DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

Las concentraciones de P en el presente estudio se encuentran dentro del rango de suficiencia de 2.2 a 7 g kg⁻¹ de materia seca, establecido en plantas superiores ([Mills y Jones, 1996](#)) (**Figura 3.2**). Además, éstas concentraciones no presentan diferencias estadísticas en ninguna de las variedades evaluadas. Contrario a lo obtenido, disminuciones en la concentración de P se han presentado en plantas de *Arabidopsis* (*Arabidopsis thaliana*) expuestas a metales no esenciales de 50 a 110 µM Co y de 100 a 150 µM Ni ([Lešková et al., 2017](#)).

Aihemaiti *et al.* (2020) señalan que, en el suelo, la presencia de fósforo afecta la movilidad del V, al causar competencia por los sitios de absorción entre los iones vanadato y fosfato, además, el V puede inhibir a la actividad de diversas enzimas tal como la adenosín trifosfatasa (ATPasa) de la membrana plasmática en las plantas.

Por su parte, Contreras-Cadena *et al.* (2014) informan que el anión vanadato (VO_4^{-3}) es absorbido de la misma forma que el anión fosfato (PO_4^{-3}), debido a que tienen semejanza estructural y electrónica. Se ha sugerido en plantas y humanos, que los vanadatos ingresan por canales iónicos para fosfato y como vanadilo a través de la difusión pasiva (Aihemaiti *et al.*, 2020).

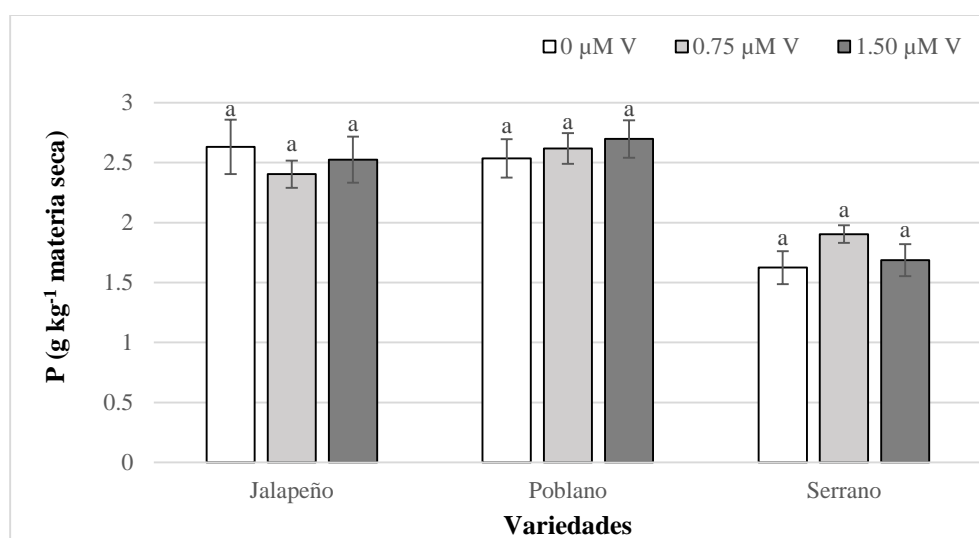


Figura 3.2. Concentración foliar de fósforo (P) en tres variedades de chile tratadas con V durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

La concentración foliar de K en la variedad Jalapeño se encuentran por encima de lo establecido para plantas de chile, mientras que las de Poblano y Serrano se encuentran dentro del rango de suficiencia reportado por Mill y Jones (1996), el cual oscila de 35 a 45 g kg^{-1} de materia seca. De acuerdo con las concentraciones obtenidas, la dosis 0.75 $\mu\text{M V}$ estimula la absorción de K en la variedad Poblano (Figura 3.3). Por el contrario, plantas de Arabidopsis (*Arabidopsis thaliana*) expuestas de 50 a 110 $\mu\text{M Co}$ y 150 $\mu\text{M Ni}$ presentaron reducciones en la concentración foliar de K (Lešková *et al.*, 2017).

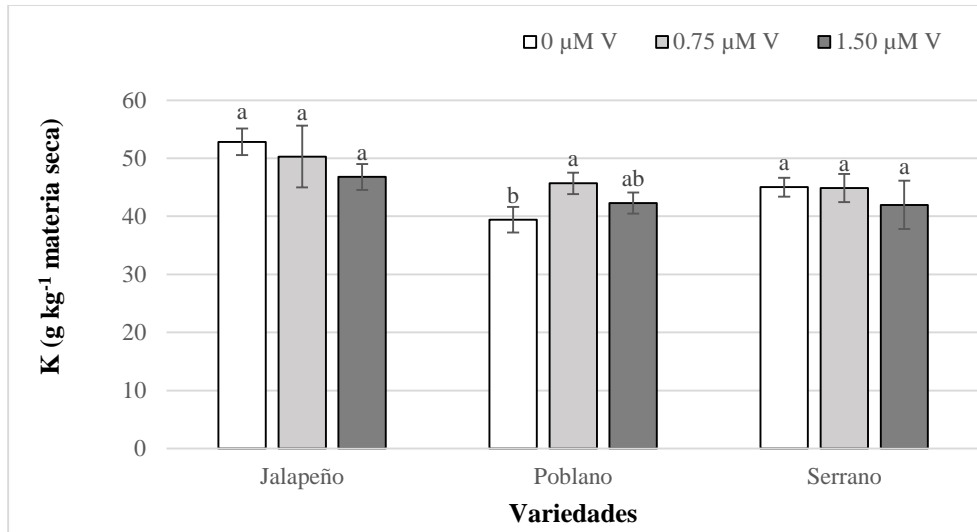


Figura 3.3. Concentración foliar de potasio (K) en tres variedades de chile tratadas con V durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

El rango de suficiencia foliar de Ca en chile oscila de los 10 a los 25 g kg⁻¹ (Uchida, 2000). En este estudio, las concentraciones de Ca obtenidas en hojas de chile Jalapeño, Poblano y Serrano se encuentran dentro de éste.

El V no tuvo efectos en la concentración foliar de Ca en Jalapeño. En Poblano el tratamiento de 0.75 μM V incrementó la concentración de Ca en 12% respecto al testigo. En Serrano, se observaron diferencias estadísticas entre las dosis de V, donde la más alta (1.5 μM) causó un detrimento en la concentración de Ca de 17%, respecto a la dosis baja (0.75 μM) (Figura 3.4). De la misma manera, en plántulas de sorgo (*Sorghum bicolor* L.) se reporta que concentraciones de 0.1 mM V reducen significativamente la absorción de Ca⁺² en raíces (Wang & Liu, 1999). Asimismo, tratamientos de 5 a 40 mg V L⁻¹ reducen significativamente la concentración de Ca en plantas de menta poleo (*Mentha pulegium* L.) cultivadas en invernadero (Ioannidou *et al.*, 2015).

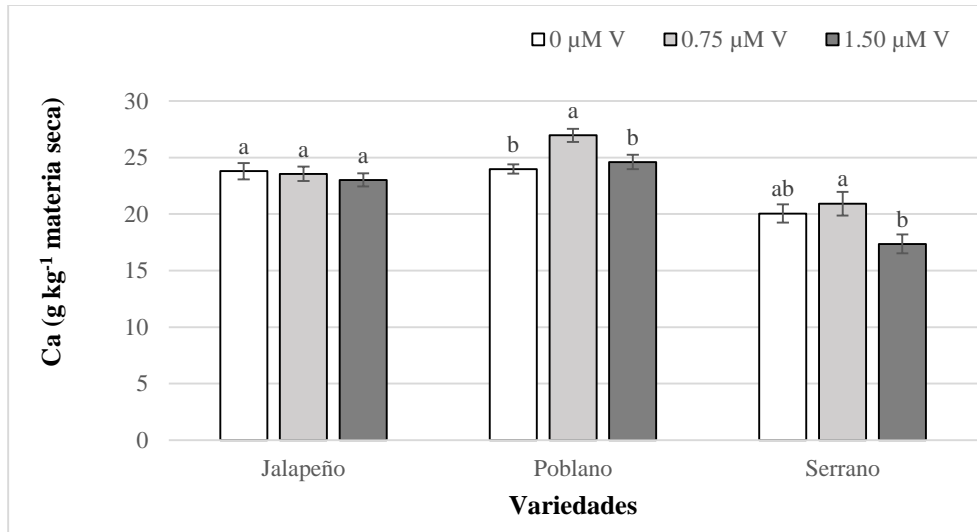


Figura 3.4. Concentración foliar de calcio (Ca) en tres variedades de chile tratadas con V durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

Las concentraciones foliares de Mg en las tres variedades de chile se encuentran por encima del rango reportado por Marschner (2012), que va de 1.5 a 3.5 g kg⁻¹. De acuerdo con las concentraciones obtenidas en este estudio, se encontró que el tratamiento con 0.75 μM V provoca una disminución en la concentración foliar de Mg del 13% en la variedad Jalapeño (Figura 3.5).

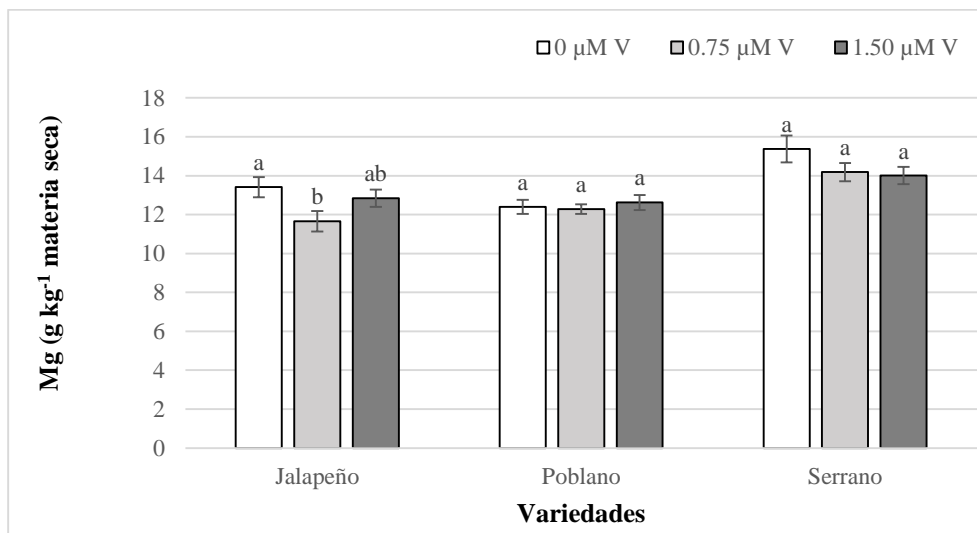


Figura 3.5. Concentración foliar de magnesio (Mg) en tres variedades de chile tratadas con V durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

El Mg tiene un papel principal en la estabilización de diversas macromoléculas como los ácidos nucleicos, proteínas y enzimas como las H⁺-ATPasas, quinasas y polimerasas. En conjunto con el

K, es regulador del equilibrio iónico en las células y de la turgencia celular, se considera que el 75% de Mg foliar participa en la síntesis de proteínas, mientras que el 20% de Mg total se asocia a pigmentos de clorofila (Guo *et al.*, 2016). La deficiencia de Mg en plántulas de arroz (*Oryza sativa*) cultivadas en hidroponía, provocó una disminución de la transpiración, senescencia, acumulación de almidón, clorosis y disminución en el transporte de nutrientes (Kobayashi *et al.*, 2013). Por su parte Guo *et al.* (2016), reportan que cuando existe insuficiencia de Mg se inhibe el crecimiento raíces y brotes, se acelera el envejecimiento y se reduce la productividad de la planta. El síntoma visual característico son las hojas cloróticas y manchas necróticas causadas por alteraciones en la cadena transportadora de electrones del PSII al PSI, el daño foto-oxidativo en la molécula de clorofila y en la membrana lipídica del cloroplasto.

La concentración de S no presenta diferencias estadísticas en ninguna de las variedades estudiadas (Jalapeño, Poblano y Serrano); no obstante, se observan tendencias crecientes no significativas en la variedad Poblano, de 11 y 10 % con 0.75 y 1.50 μM V (Figura 3.6). Las concentraciones de S encontradas en este estudio se encuentran por debajo del rango reportado por Díaz-Pérez (2013), en un estudio con cuatro variedades de *Capsicum annum* L., el cual va de 4.9 a 5.2 g kg^{-1} .

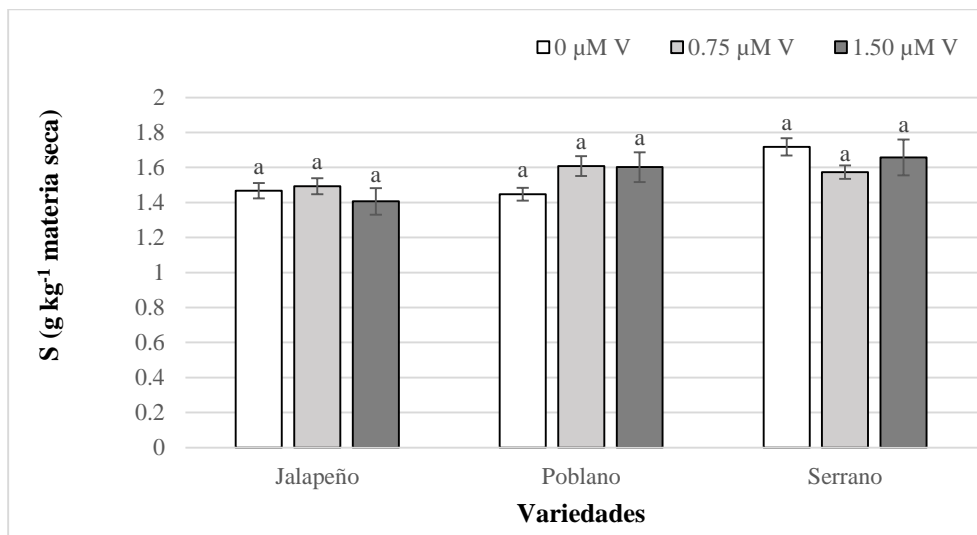


Figura 3.6. Concentración foliar de azufre (S) en tres variedades de chile tratadas con V durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

Las alteraciones visuales que caracterizan la deficiencia de S en plantas es la presencia de hojas amarillas y color púrpura, mientras que a nivel fisiológico se puede presentar bajos rendimientos, mala calidad de semillas y alteraciones en biomoléculas como los lípidos y proteínas (Etienne *et*

al., 2018). Por otra parte, [Kopriva et al. \(2019\)](#), señalan que la presencia del átomo de S como unidad común en el sulfato es de gran importancia en la nutrición y ciclo de vida de las plantas, debido a que su participación en diversas moléculas como péptidos y metabolitos implicados en la mitigación el estrés biótico y abiótico.

3.4.2. Concentración foliar de micronutrientos

Boro

En la variedad Poblano, la dosis 0.75 μM V redujo en 14% la concentración foliar de B con respecto al testigo (**Figura 3.7**). Se ha establecido que las concentraciones foliares de B de deficiencia y de toxicidad son muy cercanas; debido a esto, se pueden presentar diversas alteraciones metabólicas, fisiológicas y celulares, debido a que el B posee un papel importante en procesos de protección y permeabilidad de la membrana plasmática ([Nejad & Etesami, 2020](#)).

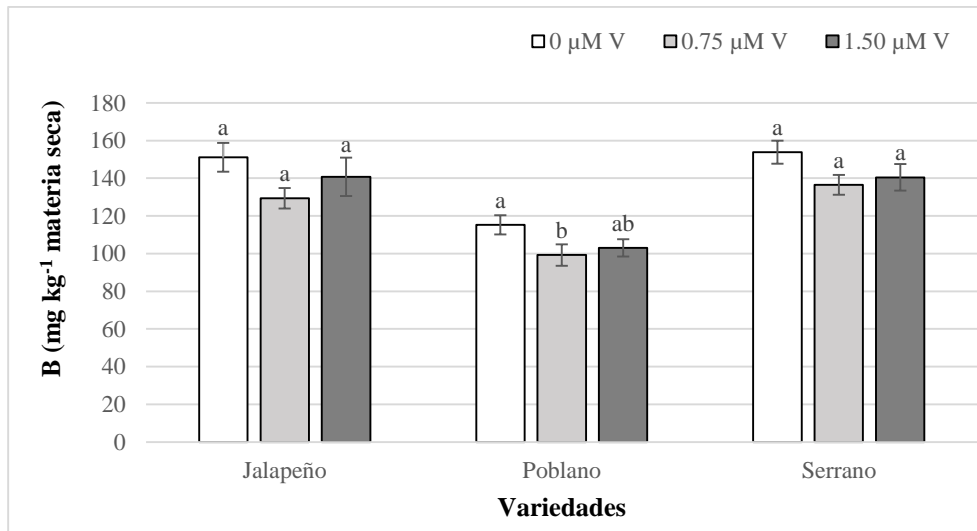


Figura 3.7. Concentración foliar de boro (B) en tres variedades de chile tratadas con V durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

En este estudio, las concentraciones de B se encuentran por encima de los 100 $\mu\text{g g}^{-1}$ (**Figura 3.7**). Se ha sugerido que niveles por debajo de los 15 $\mu\text{g g}^{-1}$ de materia seca son insuficientes en plantas superiores debido a que se requieren una concentración de B entre los 20 a 100 $\mu\text{g g}^{-1}$ para llevar a cabo un adecuado desarrollo ([Gupta et al., 1985](#)).

Cobre

De acuerdo con los tratamientos con V, encontramos que la concentración de Cu no presenta diferencias estadísticamente significativas en ninguna de las variedades estudiadas por efecto de los tratamientos con V (**Figura 3.8**). Esto coincide con [García-Jiménez et al. \(2018\)](#), quienes reportan que las concentraciones de 5 y 10 μM V, no afectan la concentración foliar de Cu en plantas de chile (*Capsicum annuum* L.).

Por otro lado, la concentración de Cu en la variedad Jalapeño se encuentra a nivel óptimo, mientras que en Poblano y Serrano se encuentran por debajo del rango de suficiencia establecido para este elemento, que es de 6 mg kg^{-1} , concentración necesaria para un adecuado crecimiento en plantas superiores ([Marschner, 2012](#)). Por otro lado, [Yruela \(2005\)](#) indica que la concentración media de Cu en tejidos vegetales debe ser de 10 mg kg^{-1} , mantener los niveles óptimos de Cu es importante para no alterar el crecimiento y desarrollo de las plantas, dado que, altas concentraciones provocan toxicidad.

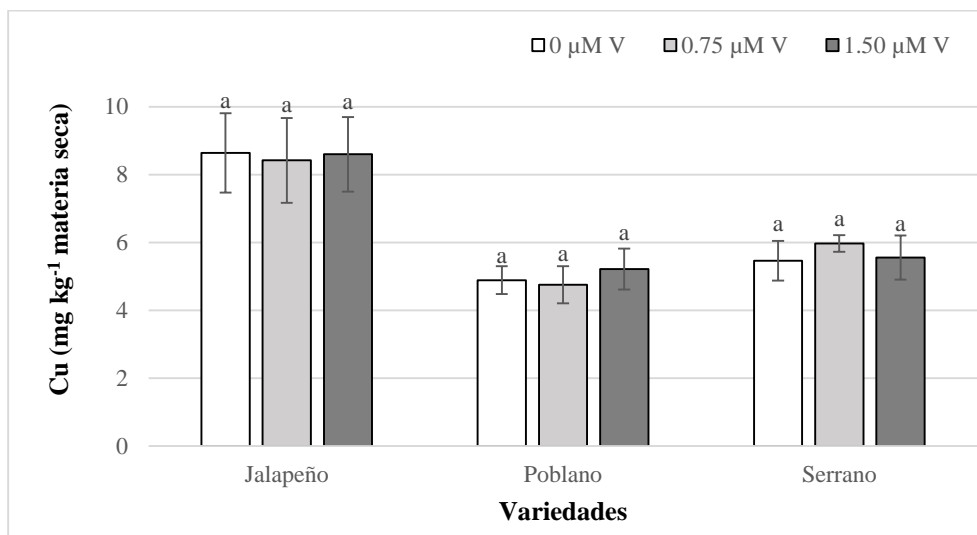


Figura 3.8. Concentración foliar de cobre (Cu) en tres variedades de chile tratadas con V durante 80 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

Hierro

Las concentraciones foliares de Fe en las tres variedades estudiadas se encuentran dentro del rango de suficiencia reportado por [Uchida \(2000\)](#) para plantas de chile, el cual van de los 60 a los 300 mg kg^{-1} . Además, los tratamientos aplicados no tuvieron efecto en la concentración de Fe en las tres variedades estudiadas (**Figura 3.9**). [Aihemaiti et al. \(2020\)](#), sugieren que bajas

concentraciones de V estimulan la absorción y asimilación de elementos esenciales como el N. Asimismo, concentraciones de 5 y 20 mg V L⁻¹ incrementaron la concentración de Fe en plantas de menta poleo (Ioannidou *et al.*, 2015). De la misma manera, la aplicación de 15 μM V incrementa la concentración foliar de Fe en plantas de pimiento cultivadas en hidroponía (García-Jiménez *et al.*, 2017).

La presencia de metales no esenciales puede afectar la concentración óptima de nutrimentos en la planta, en el caso del Fe, la absorción en la raíz ocurre por el transportador de Fe IRT1, pero a su vez, esta proteína puede transportar otros metales como el Zn, Co, Ni, Cd y Mn, lo que provoca una desequilibrada absorción de Fe. Por el contrario, la deficiencia de Fe provoca clorosis en las hojas, y este síntoma también es característico de exceso de metales (Lešková *et al.*, 2017).

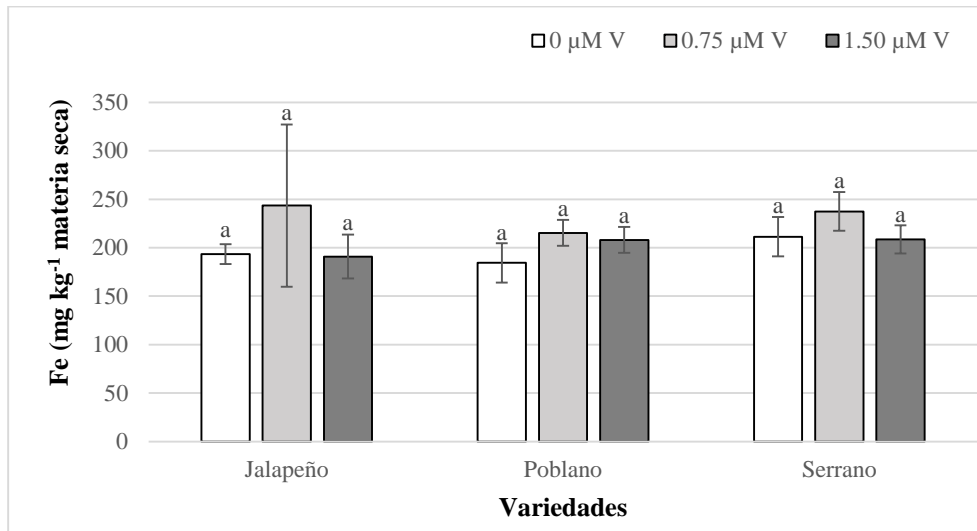


Figura 3.9. Concentración foliar de hierro (Fe) en tres variedades de chile tratadas con V durante 80 d. Medias ± DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

Manganeso

El rango de suficiencia para Mn en plantas de chile oscila de 50 a 250 mg kg⁻¹ (Uchida, 2000). Todas las concentraciones registradas se encuentran por debajo de ésta, siendo significativa en la variedad Serrano al aplicar 0.75 μM V (Figura 3.10). Este incremento de Mn se ha presentado en plantas de menta Poleo tratadas con 5 mg V L⁻¹ y cultivadas en invernadero; no obstante, en éste mismo estudio, dosis mayores (de 10 a 40 mg V L⁻¹) disminuyen la concentración de Mn (Ioannidou *et al.*, 2015).

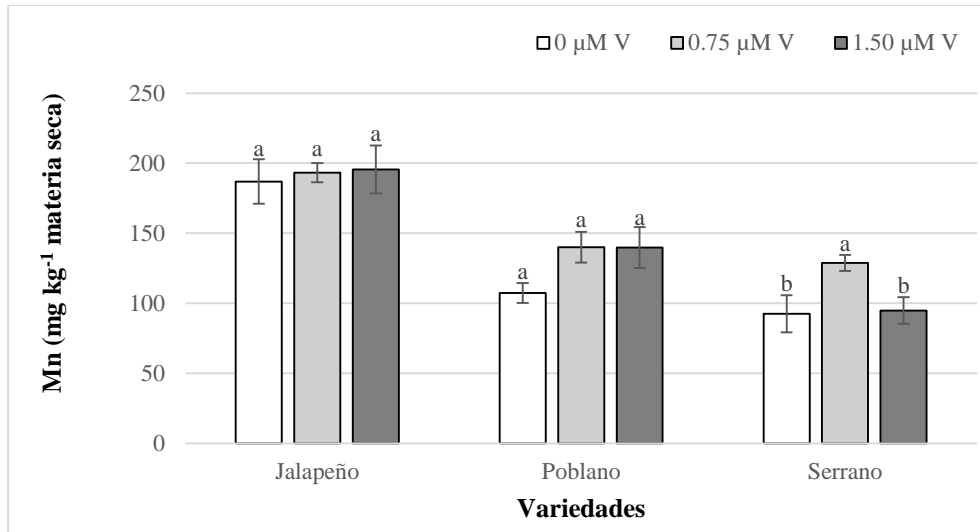


Figura 3.10. Concentración foliar de manganeso (Mn) en tres variedades de chile tratadas con V durante 80 d. Medias ± DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

Zinc

Las concentraciones foliares de Zn registradas en las variedades de chile son mayores a la reportado por Marschner (2012), que es de 20 mg kg⁻¹ en plantas superiores. Asimismo, el V no tuvo efectos en la concentración foliar de Zn en este estudio (**Figura 3.11**).

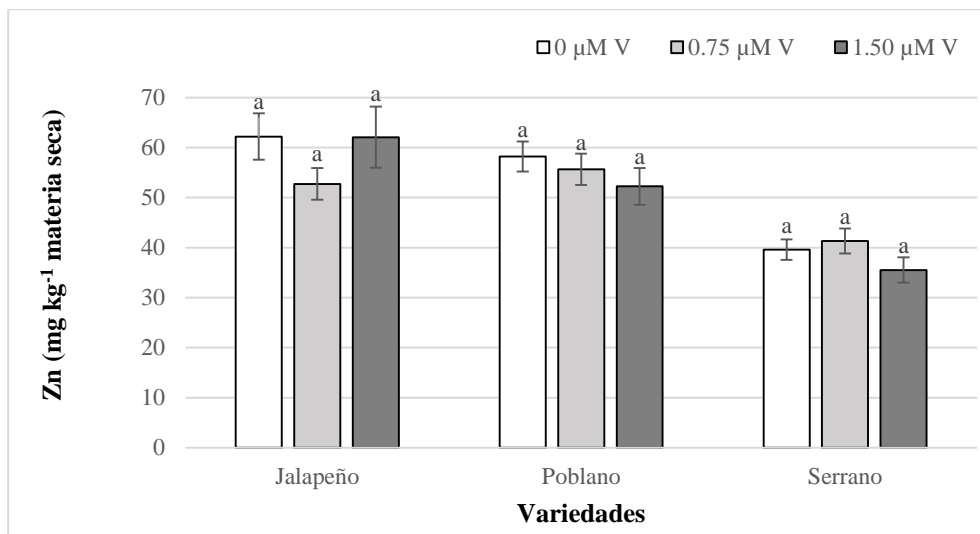


Figura 3.11. Concentración foliar de zinc (Zn) en tres variedades de chile tratadas con V durante 80 d. Medias ± DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

En plantas de menta Polio concentraciones de 5 mg V L⁻¹ incrementaron ligeramente la concentración de Zn, mientras que los tratamientos de 10 a 40 mg V L⁻¹ disminuyeron la concentración de Zn con respecto a su testigo (Ioannidou *et al.*, 2015).

3.5. CONCLUSIONES

El V produce diferentes efectos en la concentración foliar de macro y micronutrientes en plantas de chile Jalapeño, Poblano y Serrano. Las diferencias son atribuidas a las variedades de chile y las concentraciones evaluadas. Las concentraciones de V evaluadas no provocaron síntomas visuales de toxicidad en las plantas de chile; por el contrario, estimularon la absorción de N, Fe, Mn en Jalapeño, Poblano y Serrano; de P, Ca, Cu en Poblano y Serrano; de K y Mg en Poblano; de S en Jalapeño y Poblano; y de Zn en Serrano. Finalmente, la tolerancia adaptativa que presentaron las plantas de chile ante la aplicación del V nos sugiere mecanismos homeostáticos eficientes que permiten avanzar en el estudio del V como bioestimulante, sin embargo, es necesario llevar a cabo más estudios que nos permitan precisar su utilización en diferentes cultivos.

CAPÍTULO 4. VARIABLES DE CRECIMIENTO EN PLÁNTULAS DE CHILE TRATADAS CON METALES

4.1. RESUMEN

Concentraciones superiores a los valores establecidos de metales en tejidos vegetales, alteran el desarrollo óptimo de las plantas. El papel de algunos elementos no esenciales, no es claro, ya que se han discutido sus efectos positivos a bajas concentraciones. El objetivo de este estudio fue evaluar los efectos de tres metales: Cd, Tl y V, en parámetros de crecimiento en dos variedades de *Capsicum annuum* L. Plántulas sanas de chile Jalapeño y Serrano fueron establecidas en recipientes con solución universal Steiner, la cual se oxigenó cada 3 h por 15 min, después de dos semanas de aclimatación, se establecieron seis experimentos independientes, uno por cada variedad y por cada metal. Las concentraciones de Cd evaluadas fueron 0, 5 y 15 μM ; las de Tl 0, 0.5 y 1.5 μM ; y las de V 0, 1 y 3 μM ; mismas que fueron adicionadas a la solución nutritiva. Después de 28 d de tratamiento, las plántulas fueron cosechadas y separadas en hojas, tallos y raíces. Se determinó individualmente para cada plántula: la longitud de planta y de raíz, diámetro de tallo, número de hojas, área foliar, pesos fresco y seco de hojas, tallo y raíz. Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza (ANOVA, $P \leq 0.05$), los valores significativos se sometieron a la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). En las variedades, el diámetro de tallo, la longitud de vástago, la longitud total de plántula, el área foliar y las biomásas fresca y seca (raíz, tallo, hoja y total) se redujeron con la aplicación de Cd y Tl, pero se incrementaron con el tratamiento con V. La longitud de raíz se incrementó con la aplicación Cd y Tl en Serrano. El volumen radical se redujo con el suministro de Tl. Se concluye que el Cd, Tl y V provocan efectos diferenciales en el crecimiento y desarrollo de las plantas de chile, atribuyendo las variaciones a la plasticidad fenotípica de cada variedad ante los distintos tratamientos, encontrando que la sensibilidad ocurre Jalapeño>Serrano; y que la toxicidad de los metales sucede Tl>Cd>V, donde se destacan los efectos estimulantes que presentaron los tratamientos con V.

4.2. INTRODUCCIÓN

Para que las plantas desarrollen su ciclo de vida óptimo, requieren de nutrimentos; asimismo pueden absorber los llamados elementos benéficos, que, utilizados en pequeñas cantidades pueden tener efectos positivos en el crecimiento y mejorar la absorción de nutrimentos tal es el caso del aluminio (Al), cobalto (Co), sodio (Na), selenio (Se) y silicio (Si) (DalCorso *et al.*, 2014; Du Jardin, 2015; Gómez-Merino *et al.*, 2015). Sin embargo, las plantas tienen también acceso a metales no esenciales, como el cadmio (Cd), el talio (Tl) y el vanadio (V), cuya función biológica no ha sido establecida, o se encuentra aún en discusión (Järup, 2003; Tóth *et al.*, 2016; Rai *et al.*, 2019).

Un problema creciente en las últimas décadas, en términos de contaminación ambiental, es el incremento de metales al medio, lo que ocasiona alteraciones en los organismos que entran en contacto con ellos (Jaishankar *et al.*, 2014).

Los suelos de cultivo, donde se siembran gran número de hortalizas, pueden contener altas concentraciones de metales no esenciales, lo cual significa un riesgo a la cadena trófica, debido a que estos elementos generalmente poseen tiempos de vida largos y, por tanto, pueden acumularse en los organismos (Tóth *et al.*, 2016; Gupta *et al.*, 2019).

Tanto altas como bajas concentraciones de metales no esenciales pueden ser perjudiciales para las plantas y producir efectos negativos en las diversas etapas del desarrollo, tal como la germinación y el crecimiento vegetativo de la plántula (Khan, *et al.*, 2015; Buendía-Valverde *et al.*, 2018; Rai *et al.*, 2019). Por otra parte, en los últimos años se ha debatido el papel de algunos elementos no esenciales como el V, ya que se ha observado que a bajas concentraciones producen efectos positivos en el desarrollo de las plantas, tales como crecimiento, floración, concentración de clorofilas, aminoácidos y nutrientes (Arnon & Wessel, 1953; García-Jiménez *et al.*, 2021; Del Carpio *et al.*, 2018).

Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar los efectos de tres metales no esenciales (Cd, Tl y V) en parámetros de crecimiento en plántulas de tres variedades de chile (*Capsicum annuum* L.).

4.3. MATERIAL Y MÉTODOS

4.3.1. Ubicación del estudio y condiciones experimentales

El experimento se llevó a cabo bajo condiciones de invernadero, ubicado en el del Colegio de Postgraduados, Texcoco, Estado de México, donde se mantuvieron temperaturas promedio día/noche de 32 °C/15 °C, con intensidad luminosa de 137 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, con un fotoperiodo de 11.5 h y una humedad relativa de 31% en el día y 87% en la noche.

4.3.2. Material vegetal

Se utilizaron plántulas sanas de tres variedades híbridas de *Capsicum annuum* L.: Jalapeño “Emperador” NUN 70030 y Serrano “Coloso”.

4.3.3. Manejo nutrimental y condiciones de crecimiento

Plántulas de 60 d de las tres variedades fueron establecidas en cajas de plástico de 4 L con tapas y orificios, usando hule espuma como soporte físico para las plantas, donde las raíces quedaron sumergidas en solución universal Steiner al 35% (Steiner, 1984), formulada con reactivos grado analítico (JT Baker; PA, USA), con conductividad eléctrica de 2 dS m^{-1} y ajustando el pH a 5.5 ± 0.2 diariamente mediante valoración con solución 0.1 M de HCl y NaOH. El agua evaporada y transpirada se repuso con agua destilada acidulada y la solución nutritiva se renovó cada 7 d. La solución se oxigenó cada 3 h por 15 min con una bomba de aire. Después de dos semanas de aclimatación, se establecieron tres experimentos independientes con los metales Cd, Tl y V con las concentraciones que se describen a continuación:

Cadmio: 0, 5 y 15 μM , empleando como fuente $\text{CdCl}_2 \text{H}_2\text{O}$.

Talio: 0, 0.5 y 1.5 μM a partir de $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2\text{Tl H}_2\text{O}$.

Vanadio: 0, 1 y 3 μM utilizando NH_4VO_3 .

Después de 4 semanas de exposición con los metales, las plántulas fueron sacadas de los recipientes y enjuagadas para realizar los análisis a continuación descritos.

4.3.4. Variables de crecimiento

Las plantas fueron separadas en hojas, tallos y raíces, se determinó individualmente para cada plántula:

Longitud de vástago y de raíz, con una regla graduada de metal; diámetro de tallo, con un vernier digital de 200 mm (Truper[®], Stain-Less Steel); se determinó el número total de hojas y el área foliar empleando un integrador de área foliar (LI-300, LI-COR; Lincoln, NE, EEUU), así mismo, se estimó el volumen radical por el principio de Arquímedes y se contó el número de botones florales.

Las hojas, tallo y raíz fueron pesadas para obtener los pesos de biomasa fresca, posteriormente fueron introducidas en una estufa de aire forzado (Riossa, HCF-125D; Guadalajara, Jalisco, México) durante 48 h a 72 °C; después del secado, se determinaron los pesos de biomasa seca para cada órgano. Los pesos se tomaron por medio del uso de una balanza analítica (Adventur Pro AV213C, Ohaus; Parsippany, NJ, EEUU).

4.3.5. Concentración de Aminoácidos totales en hojas

Se realizó la cuantificación por el método de la ninhidrina (Moore & Stein, 1954), de la triple extracción con etanol se tomó una alícuota de 250 µL, la cual se mezcló con 250 µL de la solución amortiguadora de citrato de sodio-ácido ascórbico y 500 µL de solución de ninhidrina en un tubo de reacción, la muestra se incubó a 95°C por 20 min, posteriormente se enfrió a temperatura ambiente. Cada una de las muestras procesadas se leyeron a 570 nm en el espectrofotómetro Jenway 6715 UV/Vis. Se preparó una curva de calibración con solución madre de leucina y etanol.

4.3.6. Concentración de azúcares solubles totales en hojas

La extracción se realizó en 0.5 g de hojas frescas con 50 mL de etanol al 80% a ebullición constante sobre una placa de calentamiento, se evaporó la muestra con agitación eventual, hasta obtener alrededor de 20 mL, se enfrió la muestra a temperatura ambiente, se filtró y aforó a 20 mL con etanol al 80%. De la solución predigestada se tomó 1 mL en un matraz de 25 mL, se evapora la muestra a baño de agua hasta secar la muestra. A la muestra deshidratada se agregan 20 mL de agua destilada, se agitó y se tomó 1 mL de la solución en un tubo de ensayo, se colocó en hielo, se añadieron 2 mL de agua destilada y 6 mL de solución de antrona con ácido sulfúrico, después de la reacción se coloca el tubo en ebullición a baño de agua por 3 min. Al enfriarse la muestra, se

toma 1 mL en una celda y se leyó a 620 nm en un espectrofotómetro (Jenway 6715 UV/Vis). Se realizó una curva estándar de sacarosa.

4.3.7. Concentración de clorofilas y carotenoides en hojas

A 0.5 g de hojas frescas y molidas se le adicionaron 10 mL de acetona al 80%, la muestra se homogenizó y centrifugó a 10 000 rpm durante 15 min a 4 °C, se separó el sobrenadante, se tomó 100 µL y se mezclaron con 900 µL de acetona al 80%, la mezcla se transfirió a celdas y se leyeron en espectrofotómetro Jenway 6715 UV/Vis a tres absorbancias (663.2, 646.8 y 470 nm). Se realizaron cuatro repeticiones por muestra. Finalmente, se determinó clorofila *a*, *b*, y carotenoides de acuerdo [Sumanta et. \(2014\)](#), con las siguientes ecuaciones:

- $Cha = 12.25A_{663.2} - 2.79A_{646.8}$
- $Chb = 21.5A_{646.8} - 5.1A_{663.2}$
- $Cx + c = (1000A_{470} - 1.82C_a - 85.02C_b)/198$

A=absorbancia, Cha=Clorofila *a*, Chb=clorofila *b*, Cx+c= Carotenoides

El contenido total de clorofila se obtuvo con la suma de clorofila *a* y *b*.

4.3.8. Análisis foliar de nutrimentos

Las hojas fueron secadas dentro de una estufa de aire forzado (Riossa modelo HCF-125D; Monterrey, N. L., México) durante 48 h a 72 °C, después del secado, las muestras se molieron y se prepararon tres repeticiones por tratamiento para el análisis.

La concentración y contenido de N se determinó utilizando el método Semi-micro Kjeldhal, del extracto resultante de la digestión mezcla de ácido sulfúrico-salicílico se destiló y se tituló con H₂SO₄ 0.05N. Las concentraciones y contenido de P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn, B, Cd, Tl y V se realizó mediante la digestión ácida con ácido perclórico y ácido nítrico HNO₃:HClO₄ (2:1, v:v), siguiendo la metodología descrita por ([Alcántar & Sandoval, 1999](#)), usando un espectrofotómetro de inducción atómica por plasma acoplado (ICP-OES 725-ES; Agilent; Santa Clara, CA, USA).

4.3.9. Análisis estadístico

Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza (ANOVA, $P \leq 0.05$), los valores significativos se sometieron a la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) para comparar las medias entre tratamientos usando el software SAS (SAS, 2011).

4.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.4.1. Longitud de vástago

El Cd tuvo efectos negativos en la longitud de vástago de las dos variedades de Chile. En particular, la concentración 15 μM Cd redujo la longitud de planta en 36 y 28.6% en las variedades Jalapeño y Serrano (**Cuadro 4.1**). Por otra parte, el tratamiento 0.5 μM Tl redujo en 30.2 y 23.9% la longitud de vástago en Jalapeño y Serrano; mientras que, la dosis 1.5 μM Tl también la disminuyó en 54.2 y 41.5% en Jalapeño y Serrano, respectivamente (**Cuadro 4.2**). Por el contrario, en Serrano el tratamiento con 1 μM V, incrementó la longitud de vástago en 31.71% con respecto a su testigo (**Cuadro 4.3**).

El incremento en la longitud de planta se ha reportado con tratamientos de 5 a 10 μM La en plantas de Chile Morrón tratadas por 15 d (García-Jiménez *et al.*, 2017). Además, tratamientos de 25 y 50 μM V, estimulan la longitud de vástago en la fase de crecimiento inicial de plántulas de Chile Jalapeño y Poblano (Buendía-Valverde *et al.*, 2018); esta misma respuesta se ha presentado en plantas de Chile expuestas a dosis de 20 a 100 mg L^{-1} $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ en suelo durante 90 d (Aslam *et al.*, 2014), y en plantas de garbanzo (*Cicer arietinum*), tratadas con 200 a 400 $\mu\text{g Ni L}^{-1}$ y de 400 $\mu\text{g Co L}^{-1}$ (Khan & Khan, 2010). Contrario a lo anterior, tratamientos con 100 μM CdCl_2 provocaron disminución en la longitud de plantas de tomate tratadas por 90 d (Hediji *et al.*, 2010). Además, la aplicación de 15 y 30 μM V reducen 22.43 y 36.24 % la altura de plantas de Pimiento Morrón cultivadas en hidroponía (Hernández-Bautista *et al.*, 2015). Las perturbaciones en el crecimiento de las plantas varían de acuerdo a la especie, ecotipo, cultivar o variedad, por lo que es difícil especificar una concentración fitotóxica para ésta variable, sin embargo, estas alteraciones están relacionadas con la asimilación y distribución del agua y nutrientes esenciales (Ismael *et al.*, 2019).

4.4.2. Longitud de raíz

El tratamiento con 5 μM Cd provocó incremento de 8.1% en la longitud de raíz en Serrano respecto al testigo (**Cuadro 4.1**). Así mismo, la dosis 0.5 μM Tl aumentó la longitud de raíz en 21.18% en Serrano, mientras que el tratamiento de 1.5 μM Tl la redujo en 32.4 y 25.6% en Jalapeño y Serrano, respectivamente (**Cuadro 4.2**). Por otra parte, el tratamiento de 3 μM V disminuyó la longitud de raíz en 28% en la variedad Serrano (**Cuadro 4.3**).

La reducción en la longitud de raíz se ha reportado en plantas de chile cultivadas en suelo y tratadas de 20 a 100 mg L^{-1} $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ por 90 d (Aslam *et al.*, 2014), y en plantas de garbanzo expuestas a 400 $\mu\text{g Co L}^{-1}$ (Khan & Khan, 2010). Así mismo, Rehman *et al.* (2019) reportan reducciones significativas en plantas de mangle conocarpus (*Conocarpus erectus* L.) expuestas a 89 y 178 μM Cd. Por otra parte, tratamientos de 25 y 50 μM V, incrementan la longitud de radícula en semillas de chile Jalapeño y Serrano (Buendía-Valverde *et al.*, 2018). Igualmente, Hernández-Bautista *et al.* (2015) señalan que la aplicación de 15 y 30 μM Cd reduce la longitud de la raíz en plantas de chile pimiento morrón cultivadas en hidroponía.

Debido a que la raíz es la principal zona de interacción planta-metal, es común que se presenten alteraciones anatómicas y fisiológicas, cambios en el crecimiento y desarrollo, que involucran daño en las células de la raíz (Angulo-Bejarano *et al.*, 2021). Las reducciones en la longitud de la raíz son atribuidas a la reducción de la proliferación celular y son consideradas indicadores de toxicidad por Cd (Ismael *et al.*, 2019).

4.4.3. Longitud total de plántula

Los tratamientos de 15 μM Cd descendieron significativamente la longitud de plántula en las tres variedades de estudio (**Cuadro 4.1**). Igualmente, los tratamientos con 0.5 y 1.5 μM Tl mitigan la longitud total de plántula en Jalapeño en 23 y 45.7%; mientras que, 1.5 μM Tl la disminuyó 34.8% en Serrano (**Cuadro 4.2**). Por otra parte, en la variedad Serrano, el tratamiento de 1 μM V incrementó en 15.11% la longitud de plántula y 3 μM V la redujo 12% (**Figura 4.3**).

Se ha establecido que elementos como el Cd afectan el crecimiento de las plantas como consecuencia del deterioro de macromoléculas como proteínas, ARN, ADN, lípidos, pigmentos y membranas celulares (Rehman *et al.*, 2019).

4.4.4. Diámetro de tallo

Los tratamientos con Cd, Tl y V produjeron efectos diferenciales en el diámetro de tallo de las dos variedades estudiadas (**Cuadro 4.1**). La exposición a 15 μM Cd incrementó en 17.51% en Serrano. De manera similar, el tratamiento 0.5 μM Tl ocasionó el incremento del 15% en Serrano; mientras que, la concentración de 1.5 μM Tl disminuyó el diámetro de tallo en 30.4 y 23.9% en Jalapeño y Serrano, respectivamente (**Cuadro 4.2**). Por otro lado, el tratamiento con 1 μM V provocaron incremento del 34.6% en el diámetro de tallo de la variedad Serrano; mientras que la dosis 3 μM V lo redujo en 26.9% en Jalapeño (**Cuadro 4.3**).

El incremento en el diámetro de tallo se ha reportado con tratamientos de 10 μM La (lantano) en pimiento Morrón ([García-Jiménez et al., 2017](#)), y en plantas de chile cultivadas con 15 y 30 μM Cd añadida a la solución nutritiva ([Hernández-Bautista et al., 2015](#)). Este efecto puede ser atribuido a la expansión de las células del parénquima y el córtex, las cuales experimentan aumento de resistencia ante el flujo de agua y solutos ante la presencia de Cd ([Ismael et al., 2019](#)).

4.4.5. Número total de hojas

Los tratamientos con Cd, Tl y V no causan alteraciones en el número de hojas de las variedades en comparación con las plántulas del testigo (**Cuadros 4.1, 4.2 y 4.3**).

Contrario a los resultados, tratamientos de 15 y 30 μM Cd disminuyeron el número de hojas de plantas de chile cultivadas en hidroponía ([Hernández-Bautista et al., 2015](#)), contrario a esto, se presentaron incrementos en el número de hojas con la aplicación de 10 μM La, en plantas de chile morrón de la variedad Yolo Wonder después de 30 d ([García-Jiménez et al., 2017](#)), y en tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill. Cv. Walter) tratadas con 250 ng L^{-1} V añadido a la solución nutritiva ([Basiouny, 1984](#)).

4.4.6. Área foliar

El tratamiento 15 μM Cd redujo significativamente en 56.9 y 30.5% en las variedades Jalapeño y Serrano, consecutivamente (**Cuadro 4.1**). Los tratamientos con Tl causaron descensos de 57 % al aplicar 0.5 μM Tl en Jalapeño; mientras que 1.5 μM Tl ocasionó reducciones de 67.9 y 51.6% en Jalapeño y Serrano, respectivamente (**Cuadro 4.2**). Por otra parte, el tratamiento de 1 μM V incrementó el área foliar en 56.4% en Serrano (**Cuadro 4.3**).

Las alteraciones en el área foliar se han reportado en plantas de chile morrón tratadas con 10 μM La, donde en la variedad Sympathy la redujo en 18.6% y en Yolo Wonder la incrementó 17.3% después de la exposición por 30 d (García-Jiménez *et al.*, 2017). Por su parte, Casasola-Elizondo *et al.* (2017), reportan reducciones significativas de 9.6 y 32.5% con 10 y 20 μM Cd, respectivamente, en plántulas de tomate. De la misma manera, plantas de chile expuestas a 15 y 30 μM Cd presentaron decrementos de 44.48 y 79.77% en el área foliar después de 15 d (Hernández-Bautista *et al.*, 2015).

La disminución del área foliar es efecto de la toxicidad por metales como el Cd, donde la absorción de agua y nutrientes, la fotosíntesis y el daño oxidativo juegan un papel primordial en este proceso (Ismael *et al.*, 2019).

4.4.7. Volumen radical

El tratamiento de 5 μM Cd incrementó el volumen radical en 51.6% en Serrano, mientras que la concentración de 15 μM Cd lo disminuyó 47.6% en Jalapeño (**Cuadro 4.1**). En cuanto a los tratamientos con Tl, la dosis 0.5 μM causó reducciones significativas de 57.1 en Jalapeño (**Cuadro 4.2**). Del mismo modo, la concentración de 1.5 μM Tl redujo en 74, y 48% el volumen radical en Jalapeño y Serrano. Con respecto al V, el tratamiento 1 μM V redujo en 33.1% el volumen radical en la variedad Jalapeño (**Cuadro 4.3**).

Se ha reportado en plantas de haba (*Vicia faba*), que la reducción del volumen radical es inversamente proporcional a la concentración de Cd en el rango de 4.1 a 42.8 mg kg^{-1} (García-Gallegos *et al.*, 2012). Contrariamente, los tratamientos de 5 a 15 μM Cd incrementan ésta variable en plantas de chile tratadas por 28 d (García-Jiménez *et al.*, 2018).

4.4.8. Botones florales

Los tratamientos 5 μM Cd y 1 μM V provocaron reducciones del 85 y 55% respectivamente, en el número de botones florales en la variedad Jalapeño (**Cuadro 4.1**). En tanto que el Tl no tuvo efectos significativos en esta variable (**Cuadro 4.2**). Se han reportado incrementos significativos en el número de botones florales en plantas de chile morrón tratadas con 10 μM La por 30 d (García-Jiménez *et al.*, 2017).

4.4.9. Biomasa fresca de hoja

El tratamiento de 5 μM Cd incrementó 83.4% la biomasa fresca de hojas de plántulas de Jalapeño (**Cuadro 4.1**). Por el contrario, la dosis 0.5 μM Tl redujo esta variable 51.6 % en Jalapeño; mientras que, el tratamiento 1.5 μM Tl causó descensos del 54.6 y 47% en Jalapeño y Serrano, respectivamente (**Cuadro 4.2**). Por último, el tratamiento 1 μM V, elevó 52.5% en Serrano, y 3 μM V incrementó 43.45% en Jalapeño (**Cuadro 4.3**).

Reducciones en la biomasa fresca de hoja se han presentado en plantas de tomate expuestas de 20 a 100 μM CdCl₂ por 90 d ([Hediji et al., 2010](#)).

4.4.10. Biomasa fresca de tallo

Los tratamientos con Cd no produjeron efectos en la biomasa fresca de tallo. La dosis 0.5 μM Tl provocaron disminución de 31.7 % en la variedad Jalapeño (**Cuadro 4.1**). De igual manera, la concentración de 1.5 μM Tl disminuyó en promedio 67.2% el peso fresco de tallo de las variedades estudiadas (**Cuadro 4.2**). En cuanto a los tratamientos con V, la concentración de 1 μM incrementó 64.8% la biomasa fresca de tallo en la variedad Serrano (**Cuadro 4.3**).

Plantas de arroz expuestas a 10 mg L⁻¹ V incrementaron la biomasa fresca de tallo ([Chongkid et al., 2007](#)), mientras que la exposición de 20 a 100 μM CdCl₂ provocó la reducción de la biomasa fresca de tallo en plantas de tomate expuestas por 90 d ([Hediji et al., 2010](#)). Así mismo, la aplicación 5 a 15 mg L⁻¹ de Cu y Ag durante 21 d en plantas acuáticas de *Potamogeton* L., alteró la longitud y forma de tallo, y, aunque este estudio no incluyó la biomasa, se encontró que éstos cambios se producen por la expansión de espacios intercelulares en el parénquima cortical del tallo, posiblemente a causa de la acumulación de los metales en estos espacios, esto se ha producido en paredes celulares y espacios intercelulares del parénquima cortical de raíces crecidas en presencia de Cd ([Al-Saadi et al., 2013](#)). Por otra parte, [Batoool et al. \(2015\)](#) reportan que los metales suelen acumularse en los tejidos del parénquima y floema del tallo ocasionando reducción de biomasa, la cual repercute en el rendimiento de los cultivos.

4.4.11. Biomasa fresca de raíz

Los tratamientos con Cd no provocaron efectos significativos en la biomasa fresca de raíz de las tres variedades (**Cuadro 4.1**). En cuanto a los tratamientos con Tl, la dosis 0.5 μM redujo la

biomasa fresca de raíz en 46.9 y 19.4% en Jalapeño y Serrano respectivamente (**Cuadro 4.2**); mientras que, la dosis 1.5 μM V la disminuyó 65.6, y 49% en Jalapeño y Serrano. En cuanto al V, la concentración de 1 μM , redujo en 45% el peso fresco de raíz en Jalapeño (**Cuadro 4.3**).

Se ha presentado reducciones significativas en la biomasa fresca de raíz con tratamientos de 100 y 200 $\mu\text{g Ni L}^{-1}$, y con 400 $\mu\text{g Co L}^{-1}$ en plantas de garbanzo (Khan & Khan, 2010). De igual forma, en plantas de tomate expuestas a 100 $\mu\text{M CdCl}_2$ por 90 d se disminuye esta variable (Hediji *et al.*, 2010).

La reducción en la biomasa de la raíz es consecuencia de la baja actividad mitótica ocurrida en las células meristemáticas cuando se encuentran en contacto con metales no esenciales como el Cd y a la limitada adquisición de agua y nutrientes (Ismael *et al.*, 2019).

4.4.12. Biomasa fresca total

El tratamiento de 5 y 15 $\mu\text{M Cd}$ disminuyó en 62.3 y 51 % respectivamente la biomasa fresca total en la variedad Jalapeño (**Cuadro 4.1**). En cuanto a los tratamientos con Tl, el suministro de 0.5 $\mu\text{M Tl}$ disminuyó 45.4% la biomasa fresca total en Jalapeño. Por su parte, la aplicación de 1.5 $\mu\text{M Tl}$ redujo en promedio 60% la biomasa fresca total en las variedades estudiadas (**Cuadro 4.2**). Por último, el tratamiento con 3 $\mu\text{M V}$ incrementó 36% la biomasa fresca total en la variedad Jalapeño con respecto al testigo (**Cuadro 4.3**).

Reducciones significativas en el peso fresco de planta se han reportado con tratamientos de 20 a 100 $\text{mg Cd(NO}_3)_2 \text{ L}^{-1}$ en plantas de *Capsicum annuum* L. tratadas por 90 d (Aslam *et al.*, 2014). Por otra parte, se reportan reducciones de la biomasa fresca total son más negativas conforme se incrementa la concentración de los tratamientos con Cd, que van 4.1 a 42.8 mg kg^{-1} (García-Gallegos *et al.*, 2012).

Tratamientos con Cd, Pb y Zn disminuyen la biomasa fresca de brotes y raíces en plantas de espinaca (*Spinacia oleracea*), la toxicidad en la biomasa vegetal puede ocurrir al reducirse la formación de nuevas células bajo influencia de los metales (Alia *et al.*, 2015). Por otra parte, la reducción en la biomasa puede ser consecuencia indirecta de las alteraciones nutrimentales, así se ha observado en plantas cultivadas en presencia de Cd (Hédiji *et al.*, 2015).

4.4.13. Biomasa seca de hoja

Los tratamientos con Cd no tuvieron efectos en la biomasa seca de hoja (**Cuadro 4.1**). Por su parte, los tratamientos con Tl, provocaron reducciones significativas en la biomasa seca de hoja de 52.6 y 67.7% al aplicar 0.5 μM Tl, y de 65.8 y 68.9% al suministrar 1.5 μM Tl en Jalapeño y Serrano, respectivamente (**Cuadro 4.2**). Por último, los tratamientos con V provocaron incrementos significativos de 74.4% en esta variable en Serrano al aplicar 1 μM V, y del 95.8 y 43% en Jalapeño y Serrano al suministrar 3 μM V, respectivamente (**Cuadro 4.3**).

Reducciones en la biomasa seca de hoja se han presentado en plantas de tomate expuestas de 20 a 100 μM CdCl_2 por 90 d ([Hediji et al., 2010](#)), igualmente, se reportan decrementos en plantas de tomate expuestas por 30 d a 10 y 20 μM Cd ([Casasola-Elizondo et al., 2017](#)). Contrario a lo anterior, tratamientos con 10 μM La en plantas de chile morrón expuestas por 30 d incrementan la biomasa seca foliar ([García-Jiménez et al., 2017](#)).

4.4.14. Biomasa seca de tallo

Los tratamientos con 15 μM Cd provocaron reducciones significativas del 62.9 % en la biomasa seca de tallo de Jalapeño (**Cuadro 4.1**). En cuanto a los resultados con Tl, tenemos que la dosis 0.5 μM Tl, disminuye la biomasa seca de tallo en 37.1 % en Jalapeño, mientras que, la concentración de 1.5 μM Tl la reduce 71.42 y 55% en Jalapeño y Serrano, respectivamente (**Cuadro 4.2**). Por último, el tratamiento de 1 μM V, estimuló 89% la biomasa seca de raíz en Serrano (**Cuadro 4.3**).

Tratamientos de 20 a 100 μM CdCl_2 provocaron la reducción de la biomasa seca de tallo en plantas de tomate expuestas por 90 d ([Hediji et al., 2010](#)). Así mismo, en plantas de tomate expuestas a 20 μM Cd se reduce esta variable ([Casasola-Elizondo et al., 2017](#)).

4.4.15. Biomasa seca de raíz

Las variedades de chile no mostraron diferencias significativas en la biomasa seca de raíz al suministrar los tratamientos con Cd (**Cuadro 4.1**). En cuanto al Tl, la concentración de 0.5 μM disminuyó 62.8 en Jalapeño, mientras que la aplicación de 1.5 μM redujo 65.11 y 58.33% la biomasa seca de raíz en Jalapeño y Serrano, respectivamente (**Cuadro 4.2**). De acuerdo a los

resultados de V, la concentración de 3 μM se incrementa 30.23% la biomasa seca de raíz en Jalapeño (**Cuadro 4.3**).

Se han presentado disminuciones significativas en la biomasa seca de raíz en plantas de garbanzo expuestas a 400 $\mu\text{g L}^{-1}$ de Co (Khan & Khan, 2010) y en plantas de tomate expuestas a 100 μM de CdCl_2 por 90 d (Hediji *et al.*, 2010). igualmente, se reportan decrementos en plántulas de tomate expuestas por 30 d a 10 y 20 μM Cd (Casasola-Elizondo *et al.*, 2017) y plantas de mangle *conocarpus* tratadas de 44.5 a 178 μM Cd (Rehman *et al.*, 2019). En plantas de menta (*Mentha pulegium* L.) la biomasa seca de raíz aumentó al aplicar de 10 a 40 mg V L^{-1} (Akoumianaki-Ioannidou *et al.*, 2015).

4.4.16. Biomasa seca total

Los tratamientos con Cd no tuvieron efectos significativos en la biomasa seca total de plantas expuestas a este metal (**Cuadro 4.2**). En relación con el Tl, la concentración de 0.5 μM disminuyó en 52% la biomasa seca total en Jalapeño, mientras que, la dosis de 1.5 μM Tl, disminuyó en 66 y 48.7% la biomasa seca total en Jalapeño y Serrano (**Cuadro 4.2**). En el caso del V, su aplicación provocó incrementos significativos de 76.7% en Serrano al suministrar 1 μM V, y de 69.6% en Jalapeño al añadir 3 μM V a la solución nutritiva (**Cuadro 4.3**).

La aplicación de 10 μM La en plantas de chile morrón de la variedad Sven aumentó 48% al exponerlas por 15 d, mientras que la variedad Sympathy incrementó 26.4% la biomasa seca total con respecto al testigo (García-Jiménez *et al.*, 2017).

Se ha reportado en plantas de espinaca que la aplicación de Cd, Pb y Zn disminuyen la biomasa seca de brotes y raíces, esto se atribuye a la reducción de la proliferación celular afectada por los metales (Alia *et al.*, 2015).

Cuadro 4.1. Variables de crecimiento en plántulas de chile Jalapeño y Serrano tratadas con Cd durante 30 d.

Variables de crecimiento	Jalapeño Cadmio (μM)			Serrano Cadmio (μM)		
	0 (testigo)	5	15	0 (testigo)	5	15
Longitud de vástago (cm)	29.50 \pm 0.36 a	23.12 \pm 1.05 ab	18.87 \pm 2.85 b	26.32 \pm 0.29 a	24.1 \pm 1.13 a	18.8 \pm 1.07 b
Longitud de raíz (cm)	18.42 \pm 1.50 a	19.33 \pm 1.53 a	14.72 \pm 0.67 a	18.5 \pm 0.36 b	20 \pm 0.36 a	17.47 \pm 0.24 b
Lon. total de plántula (cm)	47.92 \pm 1.78 a	42.45 \pm 2.28 ab	33.6 \pm 3.52 b	44.82 \pm 0.46 a	44.09 \pm 0.88 ab	36.27 \pm 1.29 b
Diámetro de tallo (mm)	04.94 \pm 0.30 a	4.57 \pm 0.21 a	4.05 \pm 0.24 a	3.14 \pm 0.006 b	3.27 \pm 0.19 ab	3.69 \pm 0.01 a
Número de hojas	24.70 \pm 2.10 a	22.75 \pm 3.07 a	26.75 \pm 2.72 a	47.00 \pm 2.48 a	54.25 \pm 1.70 a	55.75 \pm 4.99 a
Área foliar (cm ²)	235.4 \pm 10.6 a	249.5 \pm 4.0 a	101.4 \pm 21.3 b	182.28 \pm 21.0 ab	225.15 \pm 22.1 a	126.6 \pm 25.1 b
Volumen radical (mL)	7.00 \pm 0.41 a	7.32 \pm 1.25 a	3.67 \pm 0.24 b	4.17 \pm 0.31 b	6.32 \pm 0.47 a	5.82 \pm 0.66 ab
Botones florales	5.00 \pm 0.71 a	0.75 \pm 0.48 b	2.25 \pm 1.03 ab	0 \pm 0 a	0 \pm 0 a	0 \pm 0 a
Biomasa fresca de hoja(g)	6.46 \pm 0.33 b	18.31 \pm 3.79 a	3.07 \pm 0.47 b	4.81 \pm 0.36 a	4.81 \pm 0.52 a	4.84 \pm 0.49 a
Biomasa fresca de tallo (g)	3.66 \pm 0.28 a	4.42 \pm 1.55 a	1.25 \pm 0.20 a	2.24 \pm 0.16 a	2.41 \pm 0.30 a	2.34 \pm 0.30 a
Biomasa fresca de raíz (g)	6.91 \pm 0.44 a	6.57 \pm 1.17 a	4.03 \pm 0.55 a	4.34 \pm 0.27 a	5.32 \pm 0.67 a	5.89 \pm 1.12 a
Biomasa fresca total (g)	17.04 \pm 0.96 a	6.42 \pm 1.33 b	8.36 \pm 1.20 b	11.40 \pm 0.64 a	12.55 \pm 1.44 a	13.07 \pm 1.90 a
Biomasa seca de hoja (g)	0.52 \pm 0.19 a	0.76 \pm 0.22 a	0.43 \pm 0.05 a	0.40 \pm 0.08 a	0.6 \pm 0.11 a	0.46 \pm 0.21 a
Peso seco de raíz (g)	0.43 \pm 0.03 ab	0.51 \pm 0.11 a	0.23 \pm 0.04 b	0.24 \pm 0.03 a	0.25 \pm 0.05 a	0.37 \pm 0.09 a
Biomasa seca de tallo (g)	0.35 \pm 0.02 a	0.29 \pm 0.06 a	0.13 \pm 0.02 b	0.2 \pm 0.02 a	0.18 \pm 0.04a	0.24 \pm 0.04 a
Biomasa seca total (g)	1.31 \pm 0.07 ab	1.56 \pm 0.27 a	0.80 \pm 0.08 b	0.85 \pm 0.08 ab	1.04 \pm 0.10 a	1.08 \pm 0.09a

Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

Cuadro 4.2. Variables de crecimiento en plántulas de chile Jalapeño y Serrano tratadas con TI durante 30 d.

Variables de crecimiento	Jalapeño			Serrano		
	Talio (μM)			Talio (μM)		
	0 (testigo)	0.5	1.5	0 (testigo)	0.5	1.5
Longitud de vástago (cm)	29.50 \pm 0.29 a	20.60 \pm 0.07 b	13.50 \pm 1.04 c	26.32 \pm 0.29 a	20.02 \pm 1.30 b	15.40 \pm 0.50 c
Longitud de raíz (cm)	18.42 \pm 1.50 a	16.32 \pm 0.27 a	12.46 \pm 0.13 b	18.50 \pm 0.36 b	22.42 \pm 0.30 a	13.77 \pm 0.56 c
Lon. total de plántula (cm)	47.92 \pm 1.78 a	36.92 \pm 0.33 b	25.96 \pm 1.11 c	44.82 \pm 0.46 a	42.45 \pm 1.00 a	29.16 \pm 0.35 b
Diámetro de tallo (mm)	4.94 \pm 0.30 a	5.04 \pm 0.36 a	3.44 \pm 0.07 b	3.14 \pm 0.06 b	3.61 \pm 0.09 a	2.39 \pm 0.13c
Número de hojas	24.75 \pm 2.10 a	20.00 \pm 1.47 a	18.75 \pm 1.93 a	47.00 \pm 2.48 a	51.75 \pm 4.09 a	50.00 \pm 0.71 a
Área foliar (cm ²)	235.4 \pm 10.6 a	101.23 \pm 7.1 b	75.63 \pm 3.2 b	182.28 \pm 21.0 a	154.73 \pm 16.3 ab	88.3 \pm 15.34 b
Volumen radical (mL)	7.00 \pm 0.41 a	3.00 \pm 0.71 b	1.82 \pm 0.12 b	4.17 \pm 0.31 a	3.32 \pm 0.24 a	2.17 \pm 0.12 b
Botones florales	5.00 \pm 0.71 a	7.00 \pm 0.41 a	5.25 \pm 0.48 a	0.00 \pm 0.0 a	0.00 \pm 0.0 a	0.00 \pm 0.0 a
Biomasa fresca de hoja (g)	6.46 \pm 0.33 a	3.13 \pm 0.29 b	2.93 \pm 0.32 b	4.81 \pm 0.36 a	3.77 \pm 0.53 ab	2.54 \pm 0.06 b
Biomasa fresca de tallo (g)	3.66 \pm 0.28 a	2.5 \pm 0.14 b	1.13 \pm 0.16 c	2.24 \pm 0.16 a	1.89 \pm 0.23 a	0.82 \pm 0.06 b
Biomasa fresca de raíz (g)	6.91 \pm 0.44 a	3.67 \pm 0.25 b	2.31 \pm 0.16 c	4.34 \pm 0.27 a	3.50 \pm 0.05 b	2.21 \pm 0.11 c
Biomasa fresca total (g)	17.04 \pm 0.96 a	9.31 \pm 0.23 b	6.37 \pm 0.57 c	11.4 \pm 0.64 a	9.17 \pm 0.80 a	5.57 \pm 0.16 b
Biomasa seca de hoja (g)	0.53 \pm 0.10 a	0.25 \pm 0.03 b	0.18 \pm 0.02 b	0.41 \pm 0.04 a	0.38 \pm 0.06 a	0.25 \pm 0.05 a
Biomasa seca de tallo (g)	0.35 \pm 0.02 a	0.22 \pm 0.02 b	0.1 \pm 0.03 c	0.2 \pm 0.02 a	0.18 \pm 0.02 a	0.09 \pm 0.0 b
Biomasa seca de raíz (g)	0.43 \pm 0.03a	0.16 \pm 0.04 b	0.15 \pm 0.01 b	0.24 \pm 0.03 a	0.19 \pm 0.02 a	0.1 \pm 0.02 b
Biomasa seca total (g)	1.31 \pm 0.07 a	0.63 \pm 0.06 b	0.45 \pm 0.01 b	0.86 \pm 0.08 a	0.76 \pm 0.08 a	0.44 \pm 0.06 b

Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

Cuadro 4.3. Variables de crecimiento en plántulas de chile Jalapeño y Serrano tratadas con V durante 30 d.

Variables de crecimiento	Jalapeño			Serrano		
	Vanadio (μM)			Vanadio (μM)		
	0 (testigo)	1	3	0 (testigo)	1	3
Longitud de vástago (cm)	29.50 \pm 0.29 a	30.80 \pm 1.52 a	32.70 \pm 1.27 a	26.33 \pm 0.29 b	34.68 \pm 1.41 a	25.73 \pm 0.99 b
Longitud de raíz (cm)	18.43 \pm 1.50 a	18.38 \pm 0.15 a	16.63 \pm 0.73 a	18.50 \pm 0.36 a	16.93 \pm 0.38 a	13.33 \pm 0.56 b
Lon. total de plántula (cm)	47.93 \pm 1.78 a	49.18 \pm 1.58 a	49.33 \pm 1.97 a	44.83 \pm 0.46 b	51.60 \pm 1.06 a	39.05 \pm 1.33 c
Diámetro de tallo (mm)	4.94 \pm 0.30 b	4.78 \pm 0.34 b	6.27 \pm 0.20 a	3.15 \pm 0.06 b	4.24 \pm 0.33 a	3.79 \pm 0.17 ab
Número de hojas	24.75 \pm 2.10 a	22.25 \pm 1.44 a	32.25 \pm 6.38 a	47.00 \pm 2.48 a	60.00 \pm 7.45 a	52.75 \pm 3.47 a
Área foliar (cm^2)	235.40 \pm 10.6 a	242.97 \pm 24.9 a	296.94 \pm 18.2 a	182.28 \pm 21.0 b	285.10 \pm 24.4 a	190.22 \pm 23.8 b
Volumen radical (mL)	7.00 \pm 0.41 a	4.68 \pm 0.47 b	7.68 \pm 0.62 a	4.18 \pm 0.31 a	5.00 \pm 0.82 a	5.33 \pm 0.62 a
Botones florales	5.00 \pm 0.71 a	2.25 \pm 0.63 b	4.25 \pm 0.25 ab	0.00 \pm 0.0 a	0.00 \pm 0.0 a	0.00 \pm 0.0 a
Biomasa fresca de hoja (g)	6.46 \pm 0.33 b	7.00 \pm 0.60 b	9.27 \pm 0.53 a	4.81 \pm 0.36 b	7.34 \pm 0.79 a	4.68 \pm 0.53 b
Biomasa fresca de tallo (g)	3.67 \pm 0.28 a	4.53 \pm 0.74 a	5.71 \pm 0.82 a	2.25 \pm 0.16 b	3.70 \pm 0.27 a	2.13 \pm 0.20 b
Biomasa fresca de raíz (g)	6.91 \pm 0.44 a	3.79 \pm 0.45 b	8.22 \pm 0.51 a	4.35 \pm 0.27 a	4.31 \pm 0.87 a	4.91 \pm 0.54 a
Biomasa fresca total (g)	17.04 \pm 0.96 b	15.32 \pm 1.72 b	23.20 \pm 0.62 a	11.41 \pm 0.64 a	15.35 \pm 1.37 a	11.72 \pm 1.26 a
Biomasa seca de hoja (g)	0.53 \pm 0.10 b	0.81 \pm 0.06 ab	1.03 \pm 0.06 a	0.41 \pm 0.04 b	0.71 \pm 0.01 a	0.58 \pm 0.04 a
Biomasa seca de tallo (g)	0.36 \pm 0.02 a	0.43 \pm 0.07 a	0.63 \pm 0.11 a	0.20 \pm 0.0 b	0.38 \pm 0.0 a	0.18 \pm 0.0 b
Biomasa seca de raíz (g)	0.43 \pm 0.03 b	0.43 \pm 0.03 b	0.56 \pm 0.04 a	0.25 \pm 0.03 a	0.42 \pm 0.06 a	0.32 \pm 0.05 a
Biomasa seca total (g)	1.31 \pm 0.07 b	1.67 \pm 0.16 b	2.23 \pm 0.12 a	0.86 \pm 0.77 b	1.52 \pm 0.11 a	1.09 \pm 0.14 ab

Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

4.4.17. Concentración de aminoácidos totales en hojas

La concentración de aminoácidos totales se incrementó significativamente al aplicar 5 y 15 μM de Cd con respecto a su testigo en las dos variedades estudiadas. De la misma manera, la concentración de 0.5 μM de Tl incrementó la concentración de aminoácidos. Contrario a estos resultados, los tratamientos con V, no tienen un efecto sobre la concentración de aminoácidos en las dos variedades de chile (Figura 4.1). Contrario a los resultados obtenidos, se han presentado disminuciones en la concentración de aminoácidos totales al aplicar 10 μM La en la solución nutritiva en plantas de chile pimiento (García-Jiménez *et al.*, 2017). Sin embargo, tratamientos con 5 μM de V provocaron incrementos del 29 % en la concentración de aminoácidos en hojas de chile pimiento Misterio cultivados en hidroponía por 28 d. Este efecto estimulante podría estar relacionado con la actividad del V sobre enzimas esenciales en el metabolismo de los organismos (García-Jiménez *et al.*, 2018).

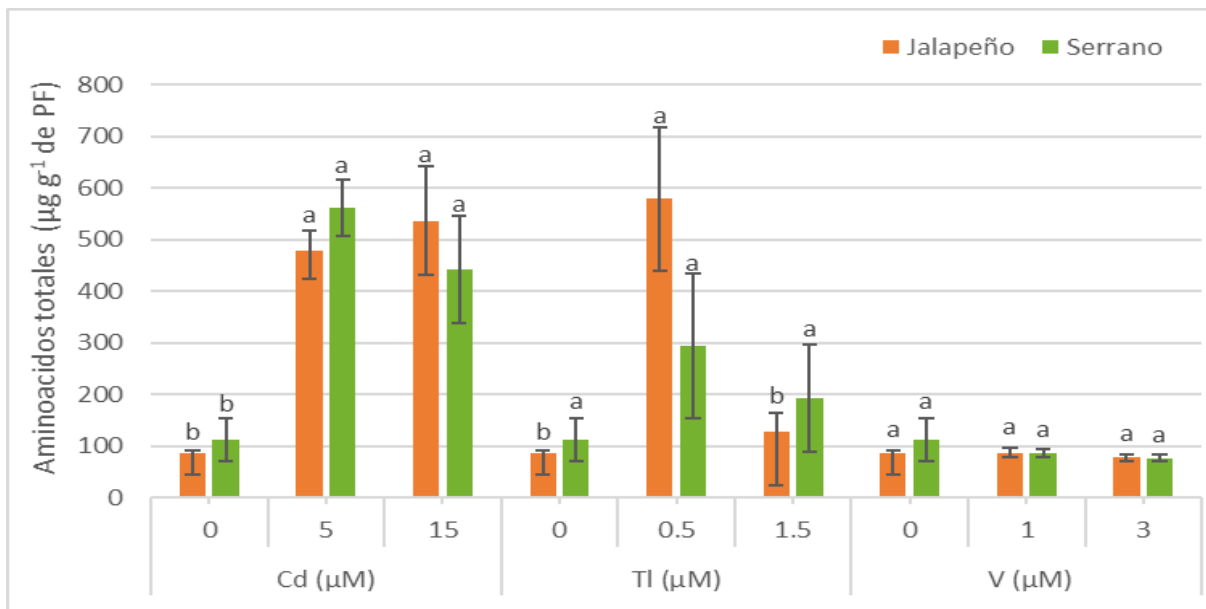


Figura 4.1. Aminoácidos totales en hojas de chile Jalapeño y Serrano tratadas con Cd, Tl y V durante 30 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$). PF=Peso fresco.

4.4.18. Concentración de azúcares solubles totales en hojas

Los tratamientos con 5 μM Cd incrementaron significativamente la concentración de azúcares totales en hojas de chile Jalapeño. Por otro lado, la aplicación de 1 y 3 μM V provocaron una disminución promedio de 39.5% en Jalapeño, así mismo, la exposición de 3 μM de V redujo 38%

esta variable en Serrano (**Figura 4.2**). El incremento en la concentración de azúcares totales se ha presentado en chile pimiento morrón Yolo Wonder, donde la aplicación de 10 μM La provocó un incremento en la concentración de azúcares solubles después de 15 d, ([García-Jiménez et al., 2017](#)). De igual manera, en plantas de chile cultivadas en hidroponía con 60 a 250 mg Si L^{-1} se presentó este efecto. Estos aumentos representan una ventaja en el sustento en la planta, principalmente en hojas, las cuales tienen un papel primordial en la absorción de energía solar ([Trejo-Téllez et al., 2020](#)).

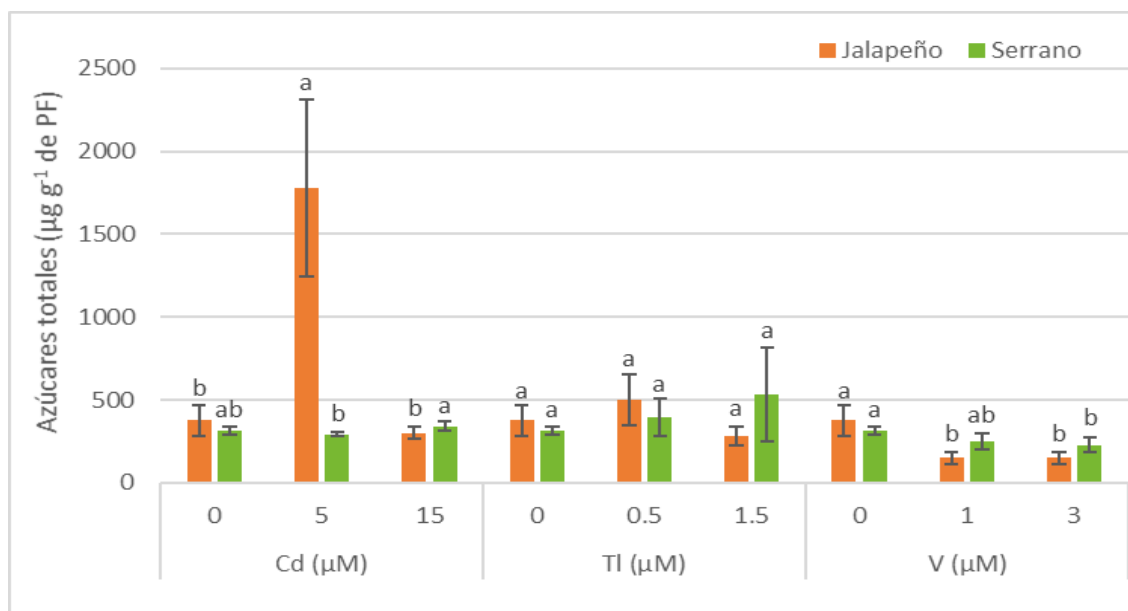


Figura 4.2. Azúcares totales en hojas de chile Jalapeño y Serrano tratadas con Cd, Tl y V durante 30 d. Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$). PF=Peso fresco.

4.4.19. Concentración de clorofilas y carotenoides en hojas

El tratamiento con 10 μM Cd se incrementó la concentración de clorofila a y b, así como la relación de clorofila a/b en Serrano (**Cuadro 4.4**). Por su parte, el Tl fue el metal que causó más alteraciones, siendo Jalapeño la variedad más afectada al disminuir significativamente la concentración de clorofila a 66%; en la clorofila b 69%; la relación de clorofila a/b 56 y 89% con 0.5 y 1.5 μM ; la clorofila total 37 y 62% al aplicar 0.5 y 1.5 μM , respectivamente. Contrario a lo anterior, la concentración de carotenoides aumentó significativamente con ambos tratamientos (**Cuadro 4.5**). En cuanto a los tratamientos con V, en la Jalapeño, se incrementó en promedio 54% la relación de clorofila a/b; disminuyó en promedio 76% la clorofila total; mientras que se

incrementó significativamente la concentración de carotenoides con la aplicación de 0.5 y 1.5 μM V (**Cuadro 4.6**).

Los resultados diferenciales en los tratamientos nos indican que el Cd, Tl y V pueden favorecer el metabolismo de las plantas sobre todo cuando se aplican a bajas concentraciones. Resultados similares se han obtenido con tratamientos con plantas de pimiento (*Capsicum annuum* L.) cultivadas en hidroponía con 60 y 125 mg L^{-1} Si (Trejo-Téllez et al., 2020). Así mismo, García-Jiménez et al., (2017) afirma que elementos como el La, estimulan la biosíntesis de clorofila a y b y clorofilas totales en las variedades de pimiento Sympathy y Yolo Wonder después de 30 d de tratamiento. Contrariamente, los tratamientos de 60 y 120 mg L^{-1} V aplicados a dos genotipos de garbanzo C-44 (tolerante a V) y Balkasar (sensible a V), mostraron una reducción significativa de clorofila a, clorofila b, clorofila total y carotenos, a medida que aumentó la concentración de V presente en la solución nutritiva (Imtiaz et al., 2016). El incremento de los pigmentos fotosintéticos es parte de un mecanismo que favorece el crecimiento de las plantas, posiblemente ocurrido por una mayor tasa fotosintética (García-Jiménez et al., 2017).

Cuadro 4.4. Concentración de clorofilas, relación clorofila a/b y carotenoides ($\mu\text{g g}^{-1}$ de biomasa fresca) de hojas de chile Jalapeño y Serrano expuestas a Cd por 30 d.

Variable	Variedad	Tratamientos con Cd (μM)		
		0 (testigo)	5	10
Clorofila a	Jalapeño	5.60 \pm 1.65 a	5.27 \pm 1.07 a	4.34 \pm 0.48 a
	Serrano	4.76 \pm 0.97 b	4.89 \pm 0.86 b	8.00 \pm 0.97 a
Clorofila b	Jalapeño	2.55 \pm 0.75 a	2.88 \pm 0.56 a	2.14 \pm 0.21 a
	Serrano	2.54 \pm 0.55 b	2.97 \pm 0.68 ab	4.37 \pm 0.88 a
Relación Clorofila a/b	Jalapeño	2.19 \pm 0.40 a	1.82 \pm 0.03 a	2.02 \pm 0.15 a
	Serrano	1.07 \pm 0.28 b	1.19 \pm 0.23 b	1.79 \pm 0.20 a
Clorofila total	Jalapeño	9.68 \pm 2.80 a	9.35 \pm 1.89 a	7.59 \pm 0.80 a
	Serrano	1.87 \pm 0.08 a	1.66 \pm 0.09 a	1.85 \pm 0.17 a
Carotenoides	Jalapeño	0.85 \pm 0.35 a	1.18 \pm 0.18 a	0.92 \pm 0.10 a
	Serrano	8.41 \pm 1.74 b	8.83 \pm 1.63 b	14.1 \pm 1.85 a

Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

Cuadro 4.5. Concentración de clorofilas, relación clorofila a/b y carotenoides ($\mu\text{g g}^{-1}$ de biomasa fresca) de hojas de chile Jalapeño y Serrano expuestas a TI por 30 d.

Variable	Variedad	Tratamientos con TI (μM)		
		0 (testigo)	5	10
Clorofila a	Jalapeño	5.60 ± 1.65 a	4.02 ± 0.45 a	1.90 ± 0.48 b
	Serrano	4.76 ± 0.97 a	5.02 ± 0.49 a	3.83 ± 0.66 a
Clorofila b	Jalapeño	2.56 ± 0.75 a	1.96 ± 0.41 a	0.80 ± 0.49 b
	Serrano	2.54 ± 0.55 a	2.66 ± 0.75 a	2.60 ± 0.58 a
Relación Clorofila a/b	Jalapeño	2.20 ± 0.40 a	0.96 ± 0.10 b	0.24 ± 0.18 c
	Serrano	1.07 ± 0.28 a	0.98 ± 0.29 a	0.99 ± 0.22 a
Clorofila total	Jalapeño	9.68 ± 2.80 a	2.08 ± 0.20 b	3.63 ± 2.96 b
	Serrano	1.87 ± 0.08 a	1.99 ± 0.55 a	1.48 ± 0.10 a
Carotenoides	Jalapeño	0.85 ± 0.35 c	7.00 ± 0.89 a	3.25 ± 0.94 b
	Serrano	8.41 ± 1.74 a	8.87 ± 1.08 a	7.05 ± 1.28 a

Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

Cuadro 4.6. Concentración de clorofilas, relación clorofila a/b y carotenoides ($\mu\text{g g}^{-1}$ de biomasa fresca) de hojas de chile Jalapeño y Serrano expuestas a V por 30 días.

Variable	Variedad	Tratamientos con V (μM)		
		0 μM (control)	1 μM	3 μM
Clorofila a	Jalapeño	5.60 ± 1.65 a	5.79 ± 1.38 a	5.87 ± 1.69 a
	Serrano	4.76 ± 0.97 a	5.36 ± 1.15 a	6.26 ± 0.35 a
Clorofila b	Jalapeño	2.55 ± 0.75 a	2.74 ± 1.26 a	2.57 ± 0.76 a
	Serrano	2.54 ± 0.55 a	2.57 ± 0.46 a	3.08 ± 0.26 a
Relación Clorofila a/b	Jalapeño	2.19 ± 0.40 a	1.03 ± 0.37 b	0.98 ± 0.25 b
	Serrano	1.07 ± 0.28 a	1.23 ± 0.32 a	1.15 ± 0.11 a
Clorofila total	Jalapeño	9.68 ± 2.80 a	2.35 ± 0.86 b	2.27 ± 0.19 b
	Serrano	1.88 ± 0.08 a	2.08 ± 0.20 a	2.03 ± 0.11 a
Carotenoides	Jalapeño	0.85 ± 0.35 b	10.06 ± 2.66 a	10.09 ± 2.91 a
	Serrano	8.41 ± 1.74 a	9.33 ± 1.92 a	10.93 ± 0.63 a

Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

4.4.20. Concentración foliar de macro y micronutrientos

Los tratamientos de 5 y 15 μM Cd provocaron diferentes efectos al incrementar la concentración de P, Ca, Mg, Fe y Mn, y disminuir la de K, Cu, Zn y B, asimismo, el Cd no tuvo efectos en la concentración de N (**Figura 4.3**).

En cuanto a los tratamientos con Tl, estos provocaron incremento en la concentración de P, Fe, Zn y Mn en Jalapeño y Serrano; mientras que disminuyó en K, Ca, Mg, Mn y B en Jalapeño y Serrano; y no tuvo efectos en N y Cu de las plántulas de Chile Jalapeño y Poblano (**Figura 4.4**).

La aplicación de 1 y 3 μM V provocó disminución en la concentración de P, K, Cu, Mn y B en Jalapeño y Serrano, de Ca y Mg en Poblano y de Zn en Serrano, mientras que no tuvo efectos en N y Fe (**Figura 4.5**).

Los efectos diferenciales obtenidos en la concentración de nutrientes nos indican que el Tl es el metal más tóxico, al disminuir mayor número de nutrientes en ambas variedades, seguido por el Cd y el V. Por otra parte, Jalapeño y Serrano presentaron una adaptabilidad semejante ante la presencia de los metales.

4.4.21. Contenido foliar de macro y micronutrientes

El Cd incrementó el contenido de P, K, Ca, Mg, Fe y Mn al aplicar 5 μM y la incrementó al suministrar 15 μM en Jalapeño y Serrano; de la misma manera, se presentaron incrementos en Cu y B con el tratamiento de 15 μM en la variedad Serrano; contrariamente, ambos tratamientos con Cd redujeron el contenido de Zn en Jalapeño y Serrano, mientras que el de 15 μM Cd redujo el contenido de B solo en Jalapeño. El contenido de N no fue afectado por los tratamientos con Cd (**Figura 4.6**).

Los tratamientos con Tl afectaron drásticamente el contenido de macro y micronutrientes al disminuir el contenido foliar de N, K, Ca, Mg, Cu, Zn, Mn y B en las variedades Jalapeño y Serrano; mientras que en P la disminuyó solo al aplicar 1.5 μM en ambas variedades y la incrementó con el tratamiento de 0.5 μM en Serrano; por otra parte, el contenido foliar de Fe disminuyó al aplicar 0.5 μM en Jalapeño, pero la incrementó con 1.5 μM en la misma variedad, además, se redujo el contenido de Fe con ambos tratamientos de Tl en Serrano (**Cuadro 4.7**).

Finalmente, los tratamientos con V provocaron incremento en el contenido de Ca, Mg y Fe en Jalapeño y Serrano; aumentos en N, P, K, Cu, Zn y Mn en Jalapeño; así mismo, se presentaron disminuciones en el contenido de B con ambos tratamientos en Serrano y en Jalapeño al aplicar 0.5 μM V (**Figura 4.8**).

Las plántulas de Chile Jalapeño y Serrano presentaron gran adaptabilidad a las concentraciones bajas de Cd, Tl y V, obteniendo aumentos en el contenido de nutrientes esenciales, sin embargo, los tratamientos con concentraciones altas mostraron efectos negativos, probablemente a

consecuencia de sobre pasar el umbral de toxicidad, esto puede ser reflejado en la reducción de crecimiento y desarrollo de las plantas.



Figura 4.3. Concentración foliar de macronutrientes (N, P, K, Ca y Mg) y micronutrientes (Fe, Cu, Zn, Mn y B) de plántulas de chile tratadas con Cd por 30 d ($n=3$, $\alpha = 0.05$ por la prueba de Tukey).



Figura 4.4. Concentración foliar de macronutrientos (N, P, K, Ca y Mg) y micronutrientos (Fe, Cu, Zn, Mn y B) de plántulas de chile tratadas con TI por 30 d ($n=3$, $\alpha = 0.05$ por la prueba de Tukey).

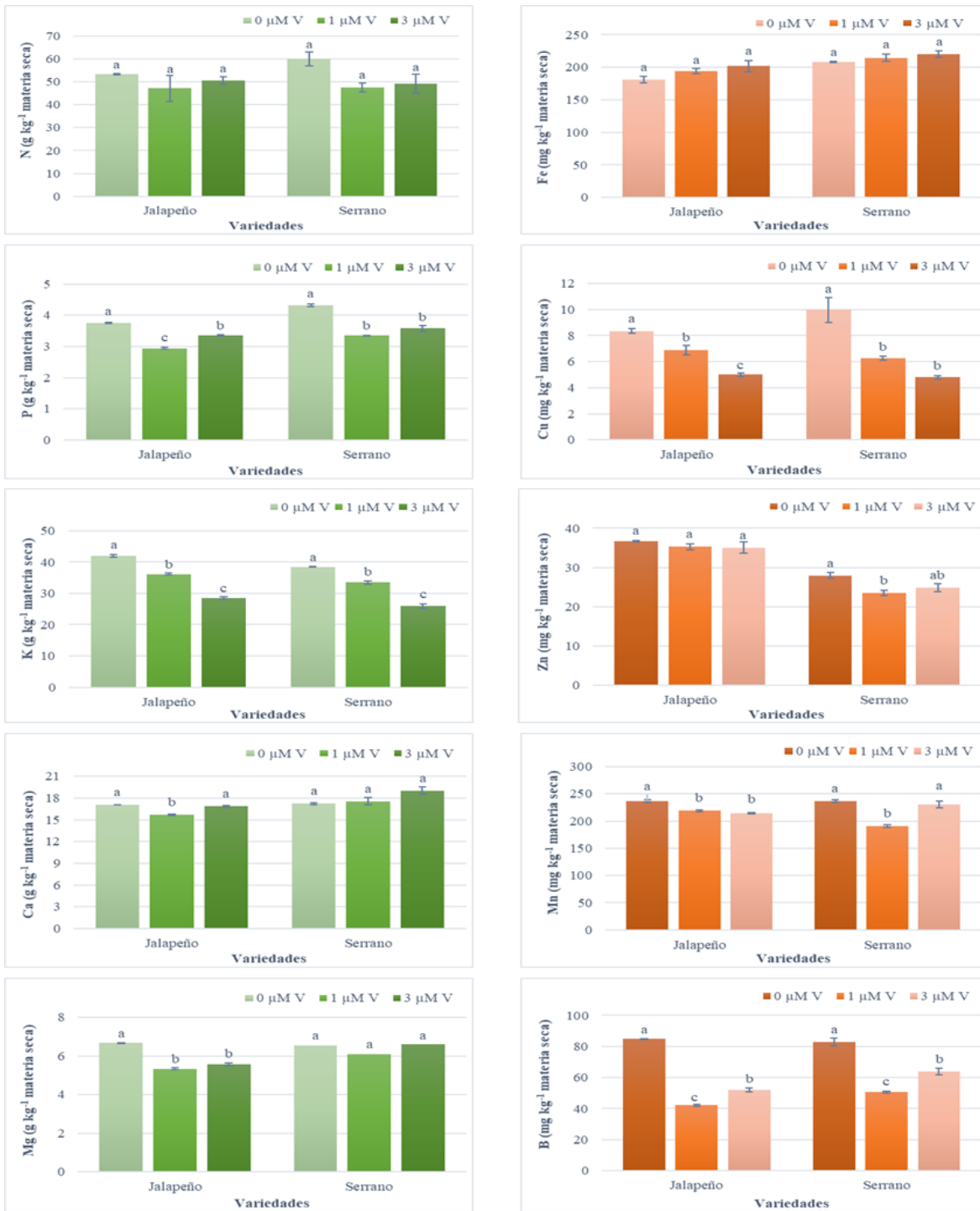


Figura 4.5. Concentración foliar de macronutrientes (N, P, K, Ca y Mg) y micronutrientes (Fe, Cu, Zn, Mn y B) de plántulas de chile Jalapeño y Serrano tratadas con V por 30 d ($n=3$, $\alpha = 0.05$ por la prueba de Tukey).



Figura 4. 6. Contenido foliar de macronutrientes (N, P, K, Ca y Mg) y micronutrientes (Fe, Cu, Zn, Mn y B) de plántulas de chile Jalapeño y Serrano tratadas con Cd por 30 d ($n=3$, $\alpha = 0.05$ por la prueba de Tukey).



Figura 4.7. Contenido foliar de macronutrientos (N, P, K, Ca y Mg) y micronutrientos (Fe, Cu, Zn, Mn y B) de plántulas de chile Jalapeño y Serrano tratadas con TI por 30 d ($n=3$, $\alpha = 0.05$ por la prueba de Tukey).



Figura 4.8. Contenido foliar de macronutrientes (N, P, K, Ca y Mg) y micronutrientes (Fe, Cu, Zn, Mn y B) de plántulas de chile Jalapeño y Serrano tratadas con V por 30 d ($n=3$, $\alpha = 0.05$ por la prueba de Tukey).

4.5.CONCLUSIONES

El Cd, Tl y V provocan efectos diferenciales en el crecimiento, concentración de clorofilas, aminoácidos totales, azúcares totales, concentración y contenido nutrimental de las plantas de Chile. Las diferentes respuestas entre los dos grupos de plantas se atribuyen principalmente a la plasticidad fenotípica de cada variedad evaluada con las distintas concentraciones de los metales, resaltando los efectos benéficos principalmente con las concentraciones bajas utilizadas en este estudio. De manera general, la sensibilidad de las variedades a la aplicación de metales ocurrió Jalapeño>Serrano. En cuanto a la toxicidad de los metales, esta ocurrió Tl>Cd>V, donde se recalcan los efectos negativos que produce el Tl, al ser metal que afectó mayor número de variables; por otra parte, se destacan los efectos estimulantes que presentaron los tratamientos con V en las concentraciones estudiadas.

CONCLUSIONES GENERALES

El Tl provoca susceptibilidad en las plantas de chile Jalapeño>Serrano>Poblano; en Jalapeño, se presentaron correlaciones negativas de Ca:Mg, Ca:S y Mg:S y correlaciones positivas en N:K, N:Ca, N:Mg, P:Ca y P:Mg; en Jalapeño, el Tl se asoció de manera positiva con la relación de las concentraciones de Ca:S, Mg:S, N:K, N:Ca, N:Mg, P:Ca y P:Mg. En Poblano, el Tl se correlacionó de manera positiva con la relación Mg:S. El Cd alteró la concentración de P en Jalapeño y Serrano, incrementa la concentración de K en Poblano y aumenta la de S y Mn en las tres variedades; así mismo el Cd se acumuló en las plantas de las tres variedades. El V estimuló la absorción de N, Fe, Mn en Jalapeño, Poblano y Serrano; de P, Ca, Cu en Poblano y Serrano; de K y Mg en Poblano; de S en Jalapeño y Poblano; y de Zn en Serrano. Finalmente, las respuestas diferenciales en las variables de crecimiento, concentración de aminoácidos totales, concentración de azúcares solubles totales, concentración de clorofilas y carotenoides, concentración y contenido de macro y micronutrientes en plántulas de chile Jalapeño y Serrano se atribuyen principalmente a la plasticidad fenotípica de cada grupo; la sensibilidad de las variedades fue Poblano>Jalapeño>Serrano, mientras que la toxicidad de los metales ocurrió Tl>Cd>V, donde se destacan los efectos negativos que produce el Tl, y los efectos estimulantes que provoca el V en las plantas estudiadas.

LITERATURA CITADA

- Aguilar-Meléndez, A., Morrell P. L., Roose M. L., & Kim S. C. (2009). Genetic diversity and structure in semiwild and domesticated chiles (*Capsicum annum*; *Solanaceae*) from Mexico. *American Journal of Botany*, 96(6), 1190-1202. <https://doi.org/10.3732/ajb.0800155>
- Aihemaiti, A., Gao, Y., Meng, Y., Chen, X., Liu, J., Xiang, H., Xu, Y., & Jiang, J. (2020). Review of plant-vanadium physiological interactions, bioaccumulation, and bioremediation of vanadium-contaminated sites. *Science of the Total Environment*, 712, 135637. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135637>
- Akoumianaki-Ioannidou, A., Barouchas, P. E., Kyramariou, A., Iliá, E., & Moustakas, N. K. (2015). Effect of vanadium on dry matter and nutrient concentration in pennyroyal (*Mentha pulegium* L.). *Bulletin UASVM Horticulture*, 72(2), 295-298. <http://dx.doi.org/10.15835/buasvmcn-hort:11348>
- Alcántar, G. G., & Sandoval, V. M. (1999). Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C. Publicación especial No. 10. Chapingo, México.
- Alcántar, G. G., Trejo-Téllez, L. I., Gómez-Merino F. C. (2016). Nutrición de cultivos. Segunda edición. Biblioteca Básica de Agricultura, Colegio de Postgraduados. ISBN 978-607-715-324-5
- Alia, N., Sardar, K., Said, M., Salma, K., Sadia, A., Sadaf, S., Toqeer, A., & Miklas, S. (2015). Toxicity and bioaccumulation of heavy metals in spinach (*Spinacia oleracea*) grown in a controlled environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(7), 7400-7416. <https://doi.org/10.3390/ijerph120707400>
- Al-Saadi, S.A.A.M., Al-Asadi, W.M., & Al-Waheeb, A.N.H. (2013). The Effect of Some Heavy Metals Accumulation on Physiological and Anatomical Characteristic of Some *Potamogeton* L. Plant. *Journal of Ecology and Environmental Sciences*, ISSN: 0976-9900 & E-ISSN: 0976-9919, 4(1), 100-108.
- Angulo-Bejarano, P. I., Puente-Rivera, J., & Cruz-Ortega, R. (2021). Metal and Metalloid Toxicity in Plants: An Overview on Molecular Aspects. *Plants (Basel)*, 10(4), 635. <https://doi.org/10.3390/plants10040635>
- Anke, M. (2004). Vanadium: An element both essential and toxic to plants, ¿animals and humans? In Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia. *Anales de la Real Academia Nacional*, 4, (70), 961-999.
- Appenroth, K. J. (2010). Definition of “heavy metals” and their role in biological systems. In: Soil heavy metals. *Soil Biology*, Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 19-29. https://doi.org/10.1007/978-3-642-02436-8_2
- Arif, N., Yadav, V., Singh, S., Singh, S., Ahmad, P., Mishra, R. K., Sharma, S., Tripathi, D. K., Dubey, N. K. & Chauhan, D. K. (2016). Influence of high and low levels of plant-beneficial

- heavy metal ions on plant growth and development. *Frontiers in Environmental Science*, 4, 69. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00069>
- Arnon, D., Wessel, G. (1953). Vanadium as an Essential Element for Green Plants. *Nature*, 172, 1039–1040. <https://doi.org/10.1038/1721039a0>
- Aslam, R., Ansari, M. Y. K., Choudhary, S., Bhat, T. M., & Jahan, N. (2014). Genotoxic effects of heavy metal cadmium on growth, biochemical, cyto-physiological parameters and detection of DNA polymorphism by RAPD in *Capsicum annuum* L.–An important spice crop of India. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 21(5), 465-472. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.07.005>
- Azofeifa, A., & 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.
- Baran, E. J. (2017). Vanadio: Un Nuevo elemento estratégico. *Anales de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 69, 84-114.
- Barker, A. V., & Pilbeam, D. J. (2007). *Handbook of plant nutrition*. CRC press.
- Borges, K. L. R., Hippler, F. W. R., Carvalho, M. E. A., Nalin, R. S., Matias, F. I., & Azevedo, R. A. (2019). Nutritional status and root morphology of tomato under Cd-induced stress: comparing contrasting genotypes for metal-tolerance. *Scientia Horticulturae*, 246, 518-527. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.023>
- Brune, A. & Dietz, K. J. (1995). A comparative analysis of element composition of roots and leaves of barley seedlings grown in the presence of toxic cadmium, molybdenum, nickel, and zinc concentrations. *Journal of Plant Nutrition*, 18(4), 853-868. <https://doi.org/10.1080/01904169509364943>
- Buendía-Valverde, M.L., Trejo-Téllez, L. I., Corona-Torres, T., & Aguilar-Rincón, V. H. (2018). Cadmio, talio y vanadio afectan diferencialmente la germinación y crecimiento inicial de tres variedades de chile. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(4): 737-749. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.04.14>
- Basiouny, F. M. (1984). Distribution of vanadium and its influence on chlorophyll formation and iron metabolism in tomato plants. *Journal of Plant Nutrition*, 7(7), 1059-1073. <https://doi.org/10.1080/01904168409363265>
- Batool, R., Hameed, M., Ashraf, M., Ahmad, M. S. A., & Fatima S. (2015) Physio-Anatomical Responses of Plants to Heavy Metals. In: Öztürk M., Ashraf M., Aksoy A., Ahmad M. (eds.). *Phytoremediation for Green Energy*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7887-0_5
- Cai, J., Chen, L., Qu, H., Lian, J., Liu, W., Hu, Y., & Xu, G. (2012). Alteration of nutrient allocation and transporter genes expression in rice under N, P, K, and Mg deficiencies. *Acta Physiologiae Plantarum*, 34(3), 939-946. <https://doi.org/10.1007/s11738-011-0890-x>

- Camacho-Cristóbal, J. J., Rexach, J., & González-Fontes, A. (2008). Boron in plants: deficiency and toxicity. *Journal of Integrative Plant Biology*, 50(10), 1247-1255. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2008.00742.x>
- Carballar-Hernández, S., Hernández-Cuevas, L. V., Montaña, N. M., Ferrera-Cerrato, R., & Alarcón, A. (2018). Species composition of native arbuscular mycorrhizal fungal consortia influences growth and nutrition of Poblano pepper plants (*Capsicum annuum* L.). *Applied Soil Ecology*, 130, 50-58. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.05.022>
- Carvalho, M. E. A., Castro, P. R. C. & Azevedo, R. A. (2020). Hormesis in plants under Cd exposure: from toxic to beneficial element? *Journal of Hazardous Materials*, 384, 121434. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121434>
- Carvalho, M. E. A., Piotta, F. A., Franco, M. R., Rossi, M. L., Martinelli, A. P., Cuypers, A., & Azevedo, R. A. (2019). Relationship between Mg, B and Mn status and tomato tolerance against Cd toxicity. *Journal of environmental management*, 240, 84-92. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.026>
- Casasola-Elizondo, C. A., Trejo-Téllez, L. I., Alcántar-González, G., Gómez-Merino, F. C., & García-Morales, S. (2017). Cadmio y fosfito en crecimiento de plántulas de tomate. En: Pérez, F., Figueroa, E., Godínez, L., & Rocha, J. (Eds), *Ciencias de la Química y Agronomía. Handbook T-I.*-©ECORFAN, Texcoco de Mora, México. pp. 28-37.
- Chongkid, B., Vachirapattama, N., & Jirakiattikul, Y. (2007). Effects of vanadium on rice growth and vanadium accumulation in rice tissues. *Agriculture and Natural Resources*, 41(5), 28-33.
- Cruz-Crespo, E., Can-Chulim, Á., Bugarín-Montoya, R., Pineda-Pineda, J., Flores-Canales, R., Juárez-López, P., & 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.
- Contreras-Cadena, D. A., Gómez-Pech, C., Rangel-García, M., Ruiz-Hernández, A., Martínez-Bulit, P., & Barba-Behrens, N. (2014). La importancia del vanadio en los seres vivos. *Educación Química*, 25, 245-253. [https://doi.10.1016/S0187-893X\(14\)70564-6](https://doi.10.1016/S0187-893X(14)70564-6)
- Cvjetko P, Cvjetko I, Pavlica M. (2010). Thallium toxicity in humans. *Arhiv za Higijenu Rada i Toksikologiju*, 61(1), 111-119. <https://doi.org/10.2478/10004-1254-61-2010-1976>
- DalCorso, G., Manara, A., Piasentin, S., & Furini, A. (2014). Nutrient metal elements in plants. *Metallomics*, 6(10), 1770-1788. <https://doi.org/10.1039/c4mt00173g>
- De Araújo, R. P., de Almeida, A. A. F., Pereira, L. S., Mangabeira, P. A. O., Souza, J. O., Pirovani, C. P., Ahnert, D. & Baligar, V. C. (2017). Photosynthetic, antioxidative, molecular and ultrastructural responses of young cacao plants to Cd toxicity in the soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 144, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.06.006>
- Del Carpio, E., Hernández, L., Ciangherotti, C., Coa, V. V., Jiménez, L., Lubes, V., & Lubes, G. (2018). Vanadium: History, chemistry, interactions with α -amino acids and potential

- therapeutic applications. *Coordination Chemistry Reviews*, 372, 117-140, <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2018.06.002>
- Díaz-Pérez, J. C. (2013). Bell pepper (*Capsicum annuum* L.) crop as affected by shade level: Microenvironment, plant growth, leaf gas exchange, and leaf mineral nutrient concentration. *HortScience*, 48(2), 175-182. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.48.2.175>
- Di Toppi, L. S., & Gabbrielli, R. (1999). Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany*, 41(2), 105-130. [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(98\)00058-6](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(98)00058-6)
- Dubey, S., Shri, M., Gupta, A., Rani, V., & Chakrabarty, D. (2018). Toxicity and detoxification of heavy metals during plant growth and metabolism. *Environmental Chemistry Letters*, 16(4), 1169-1192. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0741-8>
- Duffus, J. H. (2003). "Heavy metals" a meaningless term? (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 74(5), 793-807. <https://doi.org/10.1351/pac200375091357>
- Du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196: 3-14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>
- EPA, Environmental Protection Agency. 1999. Toxicological review of cadmium and compounds. Washington, D. C. 85 p.
- Etienne, P., Sorin, E., Maillard, A., Gallardo, K., Arkoun, M., Guerrand, J., Cruz, F., Yvin, J. C., & Ourry, A. (2018). Assessment of sulfur deficiency under field conditions by single measurements of sulfur, chloride and phosphorus in mature leaves. *Plants (Basel, Switzerland)*, 7(2), 37. <https://doi.org/10.3390/plants7020037>
- Figueira, E., Freitas, R., Guasch, H., & Almeida, S. F. P. (2014). Efficiency of cadmium chelation by phytochelatin in *Nitzschia palea* (Kützinger) W. Smith. *Ecotoxicology*, 23(2), 285-292. <https://doi.org/10.1007/s10646-013-1172-8>
- Frattini, P. (2005). Thallium properties and behaviour-A Literature Study. *Geological Survey of Finland*. 1-38.
- Galván-Arzate, S., & Santamaría, A. (1998). Thallium toxicity. *Toxicology Letters*, 99(1), 1-13. [https://doi.org/10.1016/S0378-4274\(98\)00126-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4274(98)00126-X)
- García Gallegos, E., García Nieto, E., Juárez Santillán, L. F., Juárez Santacruz, L., Montiel González, J. M. R., & Gómez Camarillo, M. A. (2012). La respuesta de haba (*Vicia faba*, L.) cultivada en un suelo contaminado con diferentes concentraciones de cadmio. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(2), 119-126.
- García-Jiménez, A., Gómez-Merino, F. C., Tejeda-Sartorius, O., & Trejo-Téllez, L. I. (2017). Lanthanum affects bell pepper seedling quality depending on the genotype and time of exposure by differentially modifying plant height, stem diameter and concentrations of chlorophylls, sugars, amino acids, and proteins. *Frontiers in Plant Science*, 8, 308. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00308>

- García-Jiménez, A., Trejo-Téllez, L. I., Guillén-Sánchez, D., & Gómez-Merino, F. C. (2018). Vanadium stimulates pepper plant growth and flowering, increases concentrations of amino acids, sugars and chlorophylls, and modifies nutrient concentrations. *PLoS One*, 13(8), <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201908>
- Ghnaya, T., Nouairi, I., Slama, I., Messedi, D., Grignon, C., Abdelly, C. & Ghorbel, M. H. (2005). Cadmium effects on growth and mineral nutrition of two halophytes: *Sesuvium portulacastrum* and *Mesembryanthemum crystallinum*. *Journal of Plant Physiology*, 162(10), 1133-1140. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.11.011>
- Gomah, G. L., Voegborlo, R. B. & Ngumbu, R. S. (2018). Levels of heavy metals in some commercially available rice on the Liberian market. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, 4(11), 62-69. <https://doi.org/10.32628/IJSRST1840119>
- Gómez-Merino, F. C., Trejo-Téllez, L. I., Cuacua-Temiz, C., Jácome-Chacón, M. A., y Senties-Herrera H. E. (2015). Los elementos benéficos: potencial para innovar la producción agrícola. *Agroentorno*, 166(18): 19-20.
- Gonçalves, J. F., Antes, F. G., Maldaner, J., Pereira, L. B., Tabaldi, L. A., Rauber, R., Rossato, L. V., Bisognin, D. A., Dressler, V. L., Flores, E. M. M., & Nicoloso, F. T. (2009). Cadmium and mineral nutrient accumulation in potato plantlets grown under cadmium stress in two different experimental culture conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 47(9), 814-821. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2009.04.002>
- González-Guerrero, M., Escudero, V., Saéz, Á., & Tejada-Jiménez, M. (2016). Transition metal transport in plants and associated endosymbionts: arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1088. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01088>
- Gouia, H., Ghorbal, M. H. & Meyer, C. (2000). Effects of cadmium on activity of nitrate reductase and on other enzymes of the nitrate assimilation pathway in bean. *Plant Physiology and Biochemistry*, 38(7-8), 629-638. [https://doi.org/10.1016/S0981-9428\(00\)00775-0](https://doi.org/10.1016/S0981-9428(00)00775-0)
- Guo, W., Nazim, H., Liang, Z., & Yang, D. (2016). Magnesium deficiency in plants: An urgent problem. *Crop Journal*, 4(2), 83-91. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2015.11.003>
- Gupta, N., Yadav, K. K., Kumar, V., Kumar, S., Chadd, R. P., & Kumar, A. (2019). Trace elements in soil-vegetables interface: translocation, bioaccumulation, toxicity and amelioration- A review. *Science of the Total Environment*, 651(2), 2927-2942. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.047>
- Gupta, U. C., Jame, Y. W., Campbell, C. A., Leyshon, A. J., & Nicholaichuk, W. (1985). Boron toxicity and deficiency: a review. *Canadian Journal of Soil Science*, 65(3), 381-409. <https://doi.org/10.4141/cjss85-044>
- Hauer-Jákli, M., & 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. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00766>

- Hédi, H., Djebali, W., Belkadhi, A., Cabasson, C., Moing, A., Rolin, D., Brouquisse, R., Gallusci, P., & Chaïbi, W. (2015). Impact of long-term cadmium exposure on mineral content of *Solanum lycopersicum* plants: consequences on fruit production. *South African Journal of Botany*, 97, 176-181. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2015.01.010>
- Hédi, H., Djebali, W., Cabasson, C., Maucourt, M., Baldet, P., Bertrand, A., Zoghalmi, L. B., Deborde, C., Moing, A., Brouquisse, R., Chaïbi, W., & Gallusci, P. (2010). Effects of long-term cadmium exposure on growth and metabolomic profile of tomato plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73(8), 1965-1974. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2010.08.014>
- Hermans, C., Chen, J., Coppens, F., Inzé, D., & Verbruggen, N. (2011). Low magnesium status in plants enhances tolerance to cadmium exposure. *New Phytologist*, 192(2), 428-436. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03814.x>
- Hernández-Bautista, L., Trejo-Téllez, L. I., Gómez-Merino, F. C., García-Morales, S., & Tejeda-Sartorius, O. (2015). Physiological and nutrient changes in sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) seedlings caused by cadmium. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 31(4), 389-396.
- Houri, T., Khairallah, Y., Al Zahab, A., Osta, B., Romanos, D., & Haddad, G. (2020). Heavy metals accumulation effects on the photosynthetic performance of geophytes in Mediterranean reserve. *Journal of King Saud University-Science*, 32(1), 874-880. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2019.04.005>
- Intiaz, M., Mushtaq, M. A., Rizwan, M. S., Arif, M. S., Yousaf, B., Ashraf, M., Shuanglian, X., Rizwan, M., Mehmood, S., & Tu, S. (2016). Comparison of antioxidant enzyme activities and DNA damage in chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes exposed to vanadium. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(19), 19787-19796.
- Ioannidou, A. A., Barouchas, P. E., Kyramariou, A., Ili, E., & Moustakas, N. K. (2015). Effect of Vanadium on Dry matter and Nutrient Concentration in pennyroyal (*Mentha pulegium* L.). *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca, Horticulture*, 72(2), 295-298. <https://doi.org/10.15835/buasvmcn-hort:11348>
- Ismael, M. A., Elyamine, A. M., Moussa, M. G., Cai, M., Zhao, X., & Hu, C. (2019). Cadmium in plants: uptake, toxicity, and its interactions with selenium fertilizers. *Metallomics*, 11(2), 255-277. <https://doi.org/10.1039/c8mt00247a>
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7(2), 60-72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>
- Järup, L. (2003). Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin*, 68(1), 167-182. <https://doi.org/10.1093/bmb/ldg032>
- Jiang, X. J., Luo, Y. M., Liu, Q., Liu, S. L. & Zhao, Q. G. (2004). Effects of Cadmium on Nutrient Uptake and Translocation by Indian Mustard. *Environmental Geochemistry and Health*, 26, 319-324. <https://doi.org/10.1023/B:EGAH.0000039596.15586.b3>

- Johnson, C. D., & Decotearu, D. R. (1996). Nitrogen and potassium fertility affects Jalapeño pepper plant growth, pod yield, and pungency. *HortScience*, 31(7), 1119-1123.
- Jozefczak, M., Remans, T., Vangronsveld, J., & Cuypers, A. (2012). Glutathione is a key player in metal-induced oxidative stress defenses. *International Journal of Molecular Sciences*, 13(3), 3145–3175. <https://doi.org/10.3390/ijms13033145>
- Kam, O. R., Bakouan, C., Zongo, I., & Guel, B. (2019). Assessing the Source of Thallium Contamination in Ground and Surface Waters in the Locality of Yamtenga (Burkina-Faso): Correlation with Some Heavy Metal Ions. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 19(4), 1-14. <https://doi.org/10.9734/IRJPAC/2019/v19i430122>
- Kapusta, P., & Godzik, B. (2013). Does heavy metal deposition affect nutrient uptake by moss *Pleurozium schreberi*? In E3S Web of Conferences (Vol. 1, p. 29005). EDP Sciences.
- Karbowska, B. (2016). Presence of thallium in the environment: sources of contaminations, distribution and monitoring methods. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(11), 640. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5647-y>
- Kasuya, M., Teranishi, H., Aoshima, K., Katoh, T., Horiguchi, H., Morikawa, Y., Nishijo, M. & Iwata, K. (1992). Water pollution by cadmium and the onset of Itai-itai disease. *Water Science and Technology*, 25(11), 149-156. <https://doi.org/10.2166/wst.1992.0286>
- Kazantzis, G. (2000). Thallium in the environment and health effects. *Environmental Geochemistry and Health*, 22, 275-280.
- Khan, A., Khan, S., Khan, M. A., Qamar, Z., & Waqas, M. (2015). The uptake and bioaccumulation of heavy metals by food plants, their effects on plants nutrients, and associated health risk: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(18), 13772-13799. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4881-0>
- Khan, M. R., & Khan, M. M. (2010). Effect of varying concentration of nickel and cobalt on the plant growth and yield of chickpea. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(6), 1036-1046.
- Khan, S., & Khan, N. N. (1983). Influence of lead and cadmium on the growth and nutrient concentration of tomato (*Lycopersicum esculentum*) and egg-plant (*Solanum melongena*). *Plant and Soil*, 74(3), 387-394.
- Kobayashi, N. I., Saito, T., Iwata, N., Ohmae, Y., Iwata, R., Tanoi, K., & Nakanishi, T. M. (2013). Leaf senescence in rice due to magnesium deficiency mediated defect in transpiration rate before sugar accumulation and chlorosis. *Physiology Plantarum*, 148(4), 490-501. <https://doi.org/10.1111/ppl.12003>
- Kopriva, S., Malagoli, M., & Takahashi, H. (2019). Sulfur nutrition: Impacts on plant development, metabolism, and stress responses. *Journal Experimental Botany*, 70, 4069–4073. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz319>
- Leghari, S. J., Wahocho, N. A., Laghari, G. M., HafeezLaghari, A., MustafaBhabhan, G., HussainTalpur, K., Bhutto, T. A., Wahocho, S. A. & Lashari, A. A. (2016). Role of nitrogen

- for plant growth and development: A review. *Advances in Environmental Biology*, 10(9), 209-219.
- Léonard, A., & Gerber, G. B. (1997). Mutagenicity, carcinogenicity and teratogenicity of thallium compounds. *Mutation Research*, 387(1), 47-53. [https://doi.org/10.1016/S1383-5742\(97\)00022-7](https://doi.org/10.1016/S1383-5742(97)00022-7)
- Lešková, A., Giehl, R. F. H., Hartmann, A., Fargašová, A., & von Wirén, N. (2017). Heavy metals induce iron deficiency responses at different hierarchic and regulatory levels. *Plant Physiology*, 174(3), 1648-1668 <https://doi.org/10.1104/pp.16.01916>
- Lu, Y., Wang, Q. F., Li, J., Xiong, J., Zhou, L. N., He, S. L., Zhang, J. Q., Chen, Z. A., He, S. G. & Liu, H. (2019). Effects of exogenous sulfur on alleviating cadmium stress in tartary buckwheat. *Scientific Reports*, 9, 7397. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43901-4>
- Madejón, P., Murillo, J. M., Marañón, T., & Lepp, N. W. (2007). Factors affecting accumulation of thallium and other trace elements in two wild *Brassicaceae* spontaneously growing on soils contaminated by tailings dam waste. *Chemosphere*, 67, 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.10.008>
- Małuszyński, M. J. (2009). Thallium in environment. Institute of Environment Protection, Poland. *Environmental Protection and Natural Resources*, 40, 31-38.
- Marchetti, C. (2013). Role of calcium channels in heavy metal toxicity. *ISRN Toxicology*, 1, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2013/184360>
- Marschner, P. (2012) Marschner's mineral nutrition of higher plants. Third edition. Academic press. USA. 649 p.
- Matraszek, R., Hawrylak-Nowak, B., Chwil, S., & Chwil, M. (2016). Macroelemental composition of cadmium stressed lettuce plants grown under conditions of intensive sulphur nutrition. *Journal of Environmental Management*, 180, 24-34. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.05.017>
- Mazur, R., Sadowska, M., Kowalewska, Ł., Abratowska, A., Kalaji, H. M., Mostowska, A., Garstka M., & Krasnodębska-Ostręga, B. (2016). Overlapping toxic effect of longterm thallium exposure on white mustard (*Sinapis alba* L.) photosynthetic activity. *BMC plant Biology*, 16(1), 191. <https://doi.org/10.1186/s12870-016-0883-4>
- Mills, H. A., & Jones, J. B. (1996). Plant Analysis Handbook II. A practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide. Ed. Micro-Macropublishing, Georgia, USA. 422 p.
- Moore, S., & Stein, W. H. (1954). A modified ninhydrin reagent for the photometric determination of amino acids and related compounds. *Journal of Biological Chemistry*, 211(2), 907-913.
- Morikawa, C. K. (2017). Reducing cadmium accumulation in fresh pepper fruits by grafting. *The Horticulture Journal*, 86(1), 45-51. <https://doi.org/10.2503/hortj.MI-136>

- Nazar, R., Iqbal, N., Masood, A., Khan, M. I. R., Syeed, S., & Khan, N. A. (2012). Cadmium toxicity in plants and role of mineral nutrients in its alleviation. *American Journal of Plant Sciences*, 3, 1476-1489. <https://doi.org/10.4236/ajps.2012.310178> P
- Nejad, S. A. G., & Etesami, H. (2020). The importance of boron in plant nutrition. In *Metalloids in Plants: Advances and Future Prospects*, (eds. Deshmukh, R., Tripathi, D.K., and Guerriero, G.) (20), 433-449. <https://doi.10.1002/9781119487210.ch20>
- Nriagu, J. O. (Ed.). (1998). Thallium in the environment. Vol 29. New York: John Wiley & Sons.
- Olness A, Nelsen T, Rinke J, Voorhees WB. (2000). Ionic ratios and crop performance. I. Vanadate and phosphate on soybean. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 185(3): 145-151. <httpS://doi.10.1046/j.1439-037x.2000.00429.x>
- Pilon-Smits, E. A., Quinn, C. F., Tapken, W., Malagoli, M., & Schiavon, M. (2009). Physiological functions of beneficial elements. *Current Opinion in Plant Biology*, 12(3), 267-274. <https://doi.10.1016/j.pbi.2009.04.009>
- Przedpełska-Wąsowicz, E., Polatajko, A., & Wierzbicka, M. (2012). The influence of cadmium stress on the content of mineral nutrients and metal-binding proteins in *Arabidopsis halleri* L. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(8), 5445-5458. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1292-4>
- Rai, P. K., Lee, S. S., Zhang, M., Tsang, Y. F., & Kim, K. H. (2019). Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. *Environment International*, 125, 365-385. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.067>
- Reddy K. J. (2006). Nutrient stress. In: Madhava Rao K., Raghavendra A., Janardhan Reddy K. (eds) *Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/1-4020-4225-6_7
- Rehder D. (2008). Occurrence, distribution and Impact. In: *Bioinorganic vanadium chemistry*. John Wiley & Sons, Ltd, Inglaterra. 1-11.
- Rehman, S., Abbas, G., Shahid, M., Saqib, M., Farooq, A. B. U., Hussain, M., Murtaza, B., Amjad, M., Naeem, M. A., & Farooq, A. (2019). Effect of salinity on cadmium tolerance, ionic homeostasis and oxidative stress responses in *conocarpus* exposed to cadmium stress: Implications for phytoremediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 171, 146-153. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.077>
- Rengel, Z., Bose, J., Chen, Q., & Tripathi, B. N. (2015). Magnesium alleviates plant toxicity of aluminium and heavy metals. *Crop and Pasture Science*, 66(12), 1298-1307. <https://doi.org/10.1071/CP15284>
- Riga, P., & 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. <https://doi.org/10.1081/PLN-1200 22367>.
- Roberts, T. L. (2014). Cadmium and phosphorous fertilizers: the issues and the science. *Procedia Engineering*, 83, 52-59. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.012>

- Rodríguez-Mercado, J. J., & Altamirano-Lozano, M. A. (2013). Genetic toxicology of thallium: a review. *Drug and Chemical Toxicology*, 36(3), 369-383. <https://doi.org/10.3109/01480545.2012.710633>
- SAS Institute Inc. (2011). SAS/STAT Users Guide. Version 9.3. SAS Institute Inc., Cary, N. C., USA.
- Sardans, J., Grau, O., Chen, H. Y. H., Janssens, I. A., Ciais, P., Piao, S., & Peñuelas, J. (2017). Changes in nutrient concentrations of leaves and roots in response to global change factors. *Global Change Biology*, 23(9), 3849-3856. <https://doi.org/10.1111/gcb.13721>
- Semiz, S. (2021). Vanadium as potential therapeutic agent for COVID-19: A focus on its antiviral, antiinflammatory, and antihyperglycemic effects. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2021.126887>
- Seshadri, B., Bolan, N. S., Wijesekara, H., Kunhikrishnan, A., Thangarajan, R., Qi, F., Matheyarasu, R., Rocco, C., Kenneth, M., & Naidu, R. (2016). Phosphorus–cadmium interactions in paddy soils. *Geoderma*, 270, 43-59. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.11.029>
- Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Schreck, E., Xiong, T., & Niazi, N. K. (2017). Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of Hazardous Materials*, 325, 36-58. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.063>
- Sinclair, A. G., Morrison, J. D., Smith, L. C., & Dodds, K. G. (1997). Determination of optimum nutrient element ratios in plant tissue. *Journal of Plant Nutrition*, 20(9), 1069-1083. <https://doi.org/10.1080/01904169709365319>
- Singh, S., Parihar, P., Singh, R., Singh, V. P., & Prasad, S. M. (2016). Heavy metal tolerance in plants: role of transcriptomics, proteomics, metabolomics, and ionomics. *Frontiers in Plant Science*, 6, 1143. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01143>
- Smical, A. I., Hotea, V., Oros, V., Juhasz, J., & Pop, E. (2008). Studies on transfer and bioaccumulation of heavy metals from soil into lettuce. *Environmental Engineering and Management Journal*, 7(5), 609-615.
- Soler, J. S. & Rovira J. S. (1996) Cadmium in inorganic fertilizers. In: Rodríguez-Barrueco C. (eds) *Fertilizers and Environment. Developments in Plant and Soil Sciences*, Springer. 66, 541-545. https://doi.org/10.1007/978-94-009-1586-2_95
- Steiner, A. A. (1984). The universal nutrient solution. 6th international congress on soilless culture. Wageningen, The Netherlands. pp. 633-650
- Sumanta, N., Haque, C. I., Nishika, J., & Suprakash, R. (2014). Spectrophotometric analysis of chlorophylls and carotenoids from commonly grown fern species by using various extracting solvents. *Research Journal of Chemical Sciences*, 4(9), 63-69.
- Tanoi, K., & Kobayashi, N. (2015). Leaf senescence by magnesium deficiency. *Plants*, 4, 756-772. <https://doi.org/10.3390/plants4040756>

- Thévenod, F. (2009). Cadmium and cellular signaling cascades: to be or not to be? *Toxicology and Applied Pharmacology*, 238(3), 221-239. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2009.01.013>.
- Trejo-Téllez, L. I., García-Jiménez, A., Escobar-Sepúlveda, H. F., Ramírez-Olvera, S. M., Bello-Bello, J. J., & Gómez-Merino, F. C. (2020). Silicon induces hormetic dose-response effects on growth and concentrations of chlorophylls, amino acids and sugars in pepper plants during the early developmental stage. *PeerJ*, 8, e9224.
- Tóth, G., Hermann, T., Da Silva, M. R., & Montanarella, L. (2016). Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. *Environment International*, 88, 299-309. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.017>
- Uchida, R. (2000). Recommended plant tissue nutrient levels for some vegetable, fruit, and ornamental foliage and flowering plants in Hawaii. *Plant Nutrient Management in Hawaii's Soils*. College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii at Manoa, (4), 57-64.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2015). Regulation development for drinking water contaminants. Disponible en: <http://www.epa.gov/safewater.zendesk.com/hc/en-us/section/202346197-Thallium>
- Van Oosten, M. J., Pepe, O., De Pascale, S., Silletti, S., & Maggio, A. (2017). The role of biostimulants and bioeffectors as alleviators of abiotic stress in crop plants. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 4(5), 1-12. <https://doi.10.1186/s40538-017-0089-5>
- Vila, M. L. (2018). Biodisponibilidad de metales pesados en suelos contaminados. Tesis doctoral, Universidad de Vigo. España. 245 p.
- Viraraghavan, T., & Srinivasan, A. (2011). Thallium: environmental pollution and health effects. *Encyclopedia of Environmental Health*, 2nd edition, 6;39-47 <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63951-6.00643-4>
- Wang, J.F., Liu, Z. (1999). Effect of vanadium on the growth of soybean seedlings. *Plant Soil*, 216, 47–51. <https://doi.org/10.1023/A:1004723509113>
- Wawrzynska, A., Moniuszko, G., & Sirko, A. (2015). Links between ethylene and sulfur nutrition—a regulatory interplay or just metabolite association? *Frontiers in Plant Science*, 6, 1053. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01053>
- White, P. J. & Brown, P. H. (2010). Plant nutrition for sustainable development and global health. *Annals of Botany*, 105(7), 1073-1080. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq085>
- WHO. 1988. Environmental Health Criteria 81. Vanadium. World Health Organization. International Programme on Chemical Safety (IPCS), Ginebra, Suiza.
- Yakhin, O. I., Lubyantsev, A. A., Yakhin, I. A., & Brown, P. H. (2017). Biostimulants in plant science: a global perspective. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1-32. <https://doi.10.3389/fpls.2016.02049>

- Yruela, I. (2005). Copper in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(1), 145-156. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202005000100012>
- Yu, M. H., & Tsunoda, H. (2016). *Environmental toxicology: biological and health effects of pollutants*. Third Edition. CRC Press. 397p. <https://doi.org/10.1201/b11677>
- Zhang, F., Wan, X., & Zhong, Y. (2014). Nitrogen as an important detoxification factor to cadmium stress in poplar plants. *Journal of Plant Interactions*, 9(1), 249-258. <https://doi.org/10.1080/17429145.2013.819944>
- Zhang, G., Fukami, M., & Sekimoto, H. (2002). Influence of cadmium on mineral concentrations and yield components in wheat genotypes differing in Cd tolerance at seedling stage. *Field Crops Research*, 77(2-3), 93-98. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(02\)00061-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00061-8)
- Zhang, X., Wu, H., Ma, Y., Meng, Y., Ren, D. & Zhang, S. (2020). Intrinsic soil property effects on Cd phytotoxicity to *Ligustrum japonicum* 'Howardii' expressed as different fractions of Cd in forest soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 206, 110949. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110949>
- Zhao, T., Tie, B. Q., & Yang, S. W. (2007). Effect of vanadium on seed germination and seedling growth. *Environmental Science & Technology*, 30(5), 3-5.