

COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
GENÉTICA

**METALES PESADOS EN
GERMINACIÓN Y PRODUCCIÓN DE
TRES VARIEDADES DE CHILE**

MARÍA DE LA LUZ BUENDÍA VALVERDE

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL GRADO DE

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2017

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe María de la Luz Buendía Valverde, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Dr. Tarsicio Corona Torres, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis

"METALES PESADOS EN GERMINACIÓN Y PRODUCCIÓN DE CHILE"

y de los producto de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre el colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 20 de Julio de 2017


Firma del
Alumno (a)


DR. TARSICIO CORONA TORRES
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: “**METALES PESADOS EN GERMINACIÓN Y PRODUCCIÓN DE TRES VARIEDADES DE CHILE**” 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:

**MAESTRA EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
GENÉTICA**

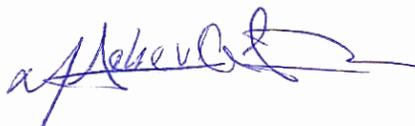
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. TARSICIO CORONA TORRES

ASESOR:



DR. VÍCTOR HEBER AGUILAR RINCÓN

ASESORA:



DRA. LIBIA I. TREJO-TÉLLEZ

METALES PESADOS EN LA GERMINACIÓN Y PRODUCCIÓN DE TRES VARIEDADES DE CHILE

María de la Luz Buendía Valverde, M. C.
Colegio de Postgraduados, 2017

RESUMEN

Se evaluaron de forma independiente, los efectos de los metales cadmio (Cd), talio (Tl) y vanadio (V) a tres concentraciones, 0, 25 y 50 μM , en indicadores de germinación y crecimiento inicial en tres variedades de chile: Jalapeño, Poblano y Serrano. Las semillas fueron tratadas durante 15 días, y en intervalos de 24 h se cuantificó el número de semillas germinadas para la obtención del porcentaje de germinación (PG). Al final de este periodo, se determinó el porcentaje relativo de germinación (PRG), las longitudes de vástagos (LV) y raíces (LR), el crecimiento relativo de radícula (CRR), el índice de germinación (IG) y el coeficiente de velocidad de germinación (CVG). El PG y el PRG no fueron afectados por los tratamientos. Los principales efectos de los factores de estudio se observaron en indicadores relacionados con el crecimiento inicial. La tolerancia de las variedades de chile evaluadas a los metales en estudio, en orden decreciente es: Jalapeño > Poblano > Serrano. El Tl mostró alta fitotoxicidad en la variedad Serrano; contrariamente, este elemento incrementó la LV en las variedades Jalapeño y Poblano. El Cd estimuló la LV de chile Poblano, en tanto que el V estimuló el CVG en chile Jalapeño, y la LV del chile Poblano. Se concluye que el Cd, Tl y V producen efectos diferenciales, mismos que son dependientes de factores como la variedad de chile probada, la concentración del metal evaluado y la fase de desarrollo (germinación o crecimiento inicial). En un segundo experimento se evaluaron también los efectos, de manera independiente los efectos de estos metales adicionados a la solución nutritiva en diferentes concentraciones (Cd 0, 5 y 10 μM ; Tl 0, 0.0055 y 0.0110 μM ; V 0, 0.75 y 1.50 μM) durante el ciclo productivo en componentes del rendimiento y concentración foliar de N, P y K de las tres variedades. El Cd redujo el número de frutos por planta, el rendimiento y la longitud de fruto en la variedad Jalapeño; asimismo la dosis baja de Cd (5 μM) incrementó de manera significativa la concentración foliar de K en las variedades Poblano; mientras que redujo las de P en las variedades Jalapeño y Serrano. La dosis baja de Cd (5 μM) redujo de manera significativa la longitud de frutos de la variedad Serrano. En la variedad Poblano, el Tl estimuló el rendimiento, e incrementó la longitud y el ancho del fruto, así como la concentración foliar de N. En la variedad Serrano, el Tl redujo el rendimiento con la dosis baja (0.0055 μM); mientras que con ambas concentraciones evaluadas redujo la longitud de fruto. En la variedad Jalapeño, la dosis baja de Tl redujo significativamente la concentración foliar de K. En la variedad Poblano, el V incrementó el número de frutos por planta, rendimiento, longitud y ancho del fruto, y la concentración foliar de N; con la dosis baja de V aumentó también la concentración foliar de K en esta variedad. En la variedad Jalapeño, el V redujo rendimiento y concentración de N en hojas; la dosis baja de V evaluada redujo también de manera significativa el número de frutos por planta.

Key words: *Capsicum annuum* L., cadmio, talio, vanadio, metales pesados, fitotoxicidad.

HEAVY METALS IN GERMINATION AND PRODUCTION OF THREE VARIETIES OF PEPPERS

María de la Luz Buendía Valverde, M. Sc.
Colegio de Postgraduados, 2017

ABSTRACT

The effects of cadmium (Cd), thallium (Tl) and vanadium (V) metals at three concentrations, 0, 25 and 50 μM , were evaluated independently in germination and initial growth indicators in three pepper varieties: Jalapeño, Poblano and Serrano. The seeds were treated for 15 days, and at 24 h intervals the number of germinated seeds was quantified to obtain the percentage of germination (PG). At the end of this period, the relative germination percentage (PRG), stem length (LV) and root length (LR), relative radicle growth (CRR), germination index (GI) and coefficient of Germination rate (CVG). PG and PRG were not affected by treatments. The main effects of the study factors were observed in indicators related to initial growth. The tolerance of the varieties of pepper evaluated to the metals studied, in decreasing order was: Jalapeño > Poblano > Serrano. Tl showed high phytotoxicity in the Serrano variety; In contrast, this element increased LV in Jalapeño and Poblano varieties. The Cd stimulated the LV of Poblano variety, while the V stimulated the CVG in Jalapeño variety, and the LV of the Poblano variety. It is concluded that Cd, Tl and V produce differential effects, which are dependent on factors such as the variety tested, the concentration of the evaluated metal and the development phase (germination or initial growth). In a second experiment, we evaluated the effects of these metals added to the nutrient solution in different concentrations (Cd 0, 5 and 10 μM , Tl 0, 0.0055 and 0.0110 μM , V 0, 0.75 and 1.50 μM) during the productive cycle in components of the yield and foliar concentration of N, P and K of the three varieties. The Cd reduced the number of fruits per plant, yield and length of fruit in the variety Jalapeño. The low dose of Cd (5 μM) significantly increased the foliar concentration of K in the Poblano varieties, while reducing P in Jalapeño and Serrano varieties. The low dose of Cd (5 μM) significantly reduced the fruit length of the Serrano variety. In the Poblano variety, Tl stimulated yield, increased fruit length and width, and foliar N concentration. In the Serrano variety, Tl reduced yield at low dose (0.0055 μM), while with both evaluated concentrations Tl reduced fruit length. In the Jalapeño variety, the low dose of Tl significantly reduced the foliar concentration of K. In the Poblano variety, the V increased the number of fruits per plant, yield, length and width of the fruit, and the foliar concentration of N; with the low dose of V also increased the foliar concentration of K in this variety. In the Jalapeño variety, the V reduced yield and concentration of N in leaf, while the low dose of V evaluated also significantly reduced the number of fruits per plant.

Key words: *Capsicum annuum* L., cadmium, thallium, vanadium, heavy metals, phytotoxicity.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento otorgado para realizar mis estudios de Maestría.

Al Colegio de Postgraduados, especialmente al personal académico del Postgrado de Genética y del laboratorio de Nutrición Vegetal, por su valiosa participación para llevar a cabo mi trabajo de investigación.

Al Dr. Tarsicio Corona Torres, por su apoyo y dedicación brindada durante la preparación y conducción del trabajo de investigación y sus valiosas sugerencias en la elaboración de la tesis.

Al Dr. Héber Aguilar Rincón, por su orientación y apoyo durante la realización de la investigación y sus valiosas aportaciones y correcciones al documento de tesis.

A la Dra. Libia I. Trejo Téllez por sus valiosas aportaciones y correcciones al documento de tesis, por su invaluable apoyo y dedicación para la realización de mis estudios de maestría, al proyecto de investigación, por sus valiosas sugerencias, así como a las facilidades brindadas para realizar el trabajo de invernadero, por abrirme las puertas de su laboratorio para realizar mi investigación. Por su amistad y su apoyo.

A mis amigos y compañeros, por ser afortunada de haberlos encontrado y caminar juntos este sueño.

A todas las personas que directa o indirectamente contribuyeron a la realización de la presente investigación.

Estoy agradecida por las noches que se hicieron mañanas, por los amigos que se volvieron familia y por sueños que se hicieron realidad.

DEDICATORIA

A mis padres:

Luz María Valverde Gálvez y Cayetano Buendía Jiménez
La bendición más grande que Dios me ha dado, mi familia.

A mis queridos hijos:

Misael y Luis Alberto

Porque dan sentido y alegría a mi vida.
Por ser el principal motivo de mi existencia y superación.

A Salvador

Porque siempre he contado contigo, por tu amor y comprensión.

A Dulce, Valería y Camila

Porque cuento con ustedes en todo momento.
Dan a mi vida una chispa extra de alegría.

Las palabras no me alcanzan,

Gracias a todos!

Sinceramente

María de la Luz Buendía Valverde.

CONTENIDO

| | Página |
|---|--------|
| RESUMEN | iii |
| ABSTRACT | iv |
| AGRADECIMIENTOS | v |
| DEDICATORIA | vi |
| LISTA DE CUADROS | xi |
| LISTA DE FIGURAS | xv |
| MARCO TEÓRICO | 1 |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1. Cadmio (Cd)..... | 2 |
| 1.1. Características físicas y químicas del Cd..... | 2 |
| 1.2. Origen del Cd en la naturaleza..... | 4 |
| 1.3. Ciclo biogeoquímico del Cd..... | 4 |
| 1.4. Cd en plantas superiores..... | 6 |
| 1.5. Absorción y transporte de Cd por plantas superiores..... | 7 |
| 1.6. Efectos de la absorción de Cd en plantas superiores..... | 8 |
| 2. Talio (Tl)..... | 10 |
| 2.1. Características físicas y químicas del Tl..... | 11 |
| 2.2. Origen del Tl en la naturaleza..... | 12 |
| 2.3. Ciclo biogeoquímico del Tl..... | 12 |
| 2.4. Tl en plantas superiores..... | 13 |
| 2.5. Absorción y transporte de Tl en plantas superiores..... | 15 |

Página

| | |
|--|-----------|
| 2.6. Efectos de la absorción de TI en plantas superiores..... | 16 |
| 3. Vanadio (V)..... | 18 |
| 3.1. Características físicas y químicas del V..... | 18 |
| 3.2. Origen del V en la naturaleza..... | 21 |
| 3.3. Ciclo biogeoquímico del V..... | 21 |
| 3.4. V en plantas superiores..... | 22 |
| 3.5. Absorción y transporte de V por plantas superiores..... | 24 |
| 3.6. Efectos de la absorción de V en plantas superiores..... | 25 |
| 4. Literatura citada | 29 |
| CAPÍTULO I. CADMIO, TALIO Y VANADIO EN LA GERMINACIÓN DE TRES VARIEDADES DE CHILE | 34 |
| 1.1. INTRODUCCIÓN..... | 34 |
| 1.2. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 37 |
| 1.2.1. Material vegetal..... | 37 |
| 1.2.2. Desinfección de semillas..... | 37 |
| 1.2.3. Diseño de tratamientos y diseño experimental | 38 |
| 1.2.4. Variables evaluadas..... | 39 |
| 1.2.4.1. Porcentaje de germinación (PG)..... | 39 |
| 1.2.4.2. Índice de germinación (IG)..... | 39 |
| 1.2.4.3. Coeficiente de velocidad de germinación (CVG)..... | 39 |
| 1.2.4.4. Longitud de radícula (LR) y longitud de vástago (LV)..... | 40 |
| 1.2.4.5. Peso fresco de plántulas (PFP)..... | 40 |
| 1.2.4.6. Peso seco de plántulas (PSP) | 40 |
| 1.2.5. Análisis estadístico..... | 40 |
| 1.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 40 |
| 1.3.1. Porcentaje de germinación (PG)..... | 41 |
| 1.3.2. Porcentaje relativo de germinación (PG)..... | 44 |
| 1.3.3. Índice de germinación (IG)..... | 47 |

| | Página |
|---|--------|
| 1.3.4. Coeficiente de velocidad de germinación (CVG)..... | 50 |
| 1.3.5. Longitud de radícula (LR)..... | 53 |
| 1.3.6. Longitud de radícula de vástago (LV)..... | 56 |
| 1.3.7. Crecimiento relativo de radícula (CRR)..... | 58 |
| 1.3.8. Peso fresco de plántula (PFP)..... | 60 |
| 1.3.9. Peso seco de plántula (PSP)..... | 62 |
| 1.4. CONCLUSIONES..... | 65 |
| 1.5. LITERATURA CITADA..... | 66 |

CAPÍTULO II. EFECTO DEL CADMIO, TALIO Y VANADIO EN LAS PLANTAS DE TRES VARIEDADES DE CHILE

| | |
|--|----|
| | 70 |
| 2.1. INTRODUCCIÓN..... | 70 |
| 2.2. MATERIAL Y METODOS..... | 72 |
| 2.2.1. Material vegetal..... | 72 |
| 2.2.2. Ubicación del experimento | 72 |
| 2.2.3. Desinfección de semillas..... | 73 |
| 2.2.4. Producción de plántulas..... | 73 |
| 2.2.5. Trasplante..... | 73 |
| 2.2.6. Sistema de riego..... | 73 |
| 2.2.7. Diseño de tratamientos y experimental..... | 74 |
| 2.2.8. Variables evaluadas..... | 75 |
| 2.2.8.1. Componentes del rendimiento..... | 75 |
| 2.2.8.2. Concentración foliar de N, P y K..... | 75 |
| 2.2.9. Análisis estadístico..... | 76 |
| 2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 76 |
| 2.3.1. Número de frutos cosechados por planta..... | 76 |
| 2.3.2. Rendimiento por planta..... | 79 |
| 2.3.3. Ancho de fruto..... | 82 |
| 2.3.4. Longitud de fruto..... | 84 |

| | Página |
|--|--------|
| 2.3.5. Concentración foliar del N..... | 86 |
| 2.3.6. Concentración foliar de P..... | 88 |
| 2.3.7. Concentración foliar de K..... | 90 |
| 2.4. CONCLUSIONES..... | 92 |
| 2.5. LITERATURA CITADA..... | 93 |

LISTA DE CUADROS

MARCO TEÓRICO

| | Página |
|---|--------|
| Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas de los compuestos de Cadmio..... | 3 |
| Cuadro 2. Propiedades físicas y químicas de los compuestos de Talio..... | 11 |
| Cuadro 3. Propiedades físicas y químicas de los compuestos de Vanadio..... | 20 |

CAPÍTULO I

| | Página |
|--|--------|
| Cuadro 1.1. Experimentos realizados con sus respectivos tratamientos durante la fase de germinación de semillas..... | 38 |
| Cuadro 1.2. Peso de biomasa fresca de plántulas provenientes de semillas de tres variedades de chile tratadas con Cd..... | 60 |
| Cuadro 1.3. Peso de biomasa fresca de plántulas provenientes de semillas de tres variedades de chile tratadas con TI..... | 61 |
| Cuadro 1.4. Peso de biomasa fresca de plántulas provenientes de semillas de tres variedades de chile tratadas con V..... | 62 |
| Cuadro 1.5. Peso de biomasa seca de plántulas provenientes de semillas de tres variedades de chile tratadas con Cd..... | 63 |
| Cuadro 1.6. Peso de biomasa seca de plántulas provenientes de semillas de tres variedades de chile tratadas con TI..... | 64 |
| Cuadro 1.7. Peso de biomasa seca de plántulas provenientes de semillas de tres variedades de chile tratadas con V..... | 65 |

CAPÍTULO II

| | Página |
|---|--------|
| Cuadro 2.1. Frutos totales por planta de tres variedades de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano) tratadas con Cd en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero..... | 77 |
| Cuadro 2.2. Frutos totales por planta de tres variedades de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano) tratadas con TI en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero..... | 78 |
| Cuadro 2.3. Frutos totales por planta de tres variedades de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano) tratadas con V en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero..... | 79 |
| Cuadro 2.4. Rendimiento por planta después de cuatro cortes, en tres variedades de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano) tratadas con Cd en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero..... | 80 |
| Cuadro 2.5. Rendimiento por planta después de cuatro cortes, en tres variedades de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano) tratadas con TI en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero..... | 80 |
| Cuadro 2.6. Rendimiento por planta después de cuatro cortes, en tres variedades de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano) tratadas con V en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero..... | 81 |
| Cuadro 2.7. Ancho promedio de frutos (mm) de tres variedades de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano) tratadas con Cd en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero..... | 82 |
| Cuadro 2.8. Ancho promedio de frutos (mm) de tres variedades de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano) tratadas con TI en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero..... | 83 |

| | Página |
|--|--------|
| Cuadro 2.9. Ancho promedio de frutos (mm) de tres variedades de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano) tratadas con V en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero..... | 83 |
| Cuadro 2.10. Longitud promedio de frutos (cm) de tres variedades de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano) tratadas con Cd en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero..... | 84 |
| Cuadro 2.11. Longitud promedio de frutos (cm) de tres variedades de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano) tratadas con TI en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero..... | 85 |
| Cuadro 2.12. Longitud promedio de frutos (cm) de tres variedades de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano) tratadas con V en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero..... | 85 |
| Cuadro 2.13. Concentración foliar de N (g kg^{-1} de materia seca), en plantas de tres variedades de chile tratadas durante el ciclo de producción con Cd en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero..... | 86 |
| Cuadro 2.14. Concentración foliar de N (g kg^{-1} de materia seca), en plantas de tres variedades de chile tratadas durante el ciclo de producción con TI en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero..... | 87 |
| Cuadro 2.15. Concentración foliar de N (g kg^{-1} de materia seca), en plantas de tres variedades de chile tratadas durante el ciclo de producción con V en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero..... | 88 |
| Cuadro 2.16. Concentración foliar de P (g kg^{-1} de materia seca), en plantas de tres variedades de chile tratadas durante el ciclo de producción con cadmio en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero..... | 89 |

| | | |
|---------------------|---|----|
| Cuadro 2.17. | Concentración foliar de P (g kg^{-1} de materia seca), en plantas de tres variedades de chile tratadas durante el ciclo de producción con talio en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero..... | 89 |
| Cuadro 2.18. | Concentración foliar de P (g kg^{-1} de materia seca), en plantas de tres variedades de chile tratadas durante el ciclo de producción con vanadio en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero..... | 90 |
| Cuadro 2.19. | Concentración foliar de K (g kg^{-1} de materia seca), en plantas de tres variedades de chile tratadas durante el ciclo de producción con cadmio en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero..... | 91 |
| Cuadro 2.20. | Concentración foliar de K (g kg^{-1} de materia seca), en plantas de tres variedades de chile tratadas durante el ciclo de producción con talio en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero..... | 91 |
| Cuadro 2.21. | Concentración foliar de K (g kg^{-1} de materia seca), en plantas de tres variedades de chile tratadas durante el ciclo de producción con vanadio en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero..... | 91 |

LISTA DE FIGURAS

MARCO TEÓRICO

| | Página |
|--|--------|
| Figura 1. Transporte de Cd en el suelo | 5 |
| Figura 2. Transporte de TI en el suelo..... | 12 |
| Figura 3. Ciclo biogeoquímico del V en el ambiente..... | 22 |

CAPÍTULO I

| | Página |
|---|--------|
| Figura 1.1. Porcentaje de germinación de semillas de tres variedades de chile tratadas con Cd (a), TI (b) y V (c). Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad por subfigura indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$)..... | 42 |
| Figura 1.2. Porcentaje relativo de germinación de semillas de tres variedades de chile tratadas con Cd (a), TI (b) y V (c). Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad por subfigura indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$)..... | 45 |
| Figura 1.3. Índice de germinación (IG) de semillas de tres variedades de chile tratadas con Cd (a), TI (b) y V (c). Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad por subfigura indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$)..... | 48 |
| Figura 1.4. Coeficiente de velocidad de germinación (CVG) de semillas de tres variedades de chile tratadas con Cd (a), TI (b) y V (c). Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad por subfigura indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$)..... | 51 |
| Figura 1.5. Longitud de radícula de plántulas obtenidas a partir de semillas de tres variedades de chile tratadas con Cd (a), TI (b) y V (c). Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad por subfigura indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$)..... | 55 |

Figura 1.6. Longitud de vástago de plántulas de semillas de tres variedades de chile tratadas con Cd (a), TI (b) y V (c). Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad por subfigura indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$)..... 57

Figura 1.7. Crecimiento relativo de radícula (CRR) de plántulas obtenidas de semillas de tres variedades de chile tratadas con Cd (a), TI (b) y V (c). Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad por subfigura indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$)..... 59

MARCO TEÓRICO

Introducción

Los metales pesados se encuentran en forma natural en la corteza terrestre, algunos participan en procesos bioquímicos y fisiológicos de los organismos; sin embargo, otros son considerados contaminantes aun a bajas concentraciones debido a que pueden acumularse en el ambiente y causar serios daños en los ecosistemas y a la salud humana ([Maluszynski, 2009](#)).

Se considera metal pesado a aquél que poseen una gravedad específica mayor a 5 g cm^{-3} ; sin embargo, independientemente de su masa atómica o densidad, este grupo puede incluir metales de transición, metaloides, lantánidos y actínidos ([Singh et al., 2011](#)).

En el ambiente, las emisiones de estos elementos pueden producirse a través de procesos naturales y antropogénicos, principalmente durante la extracción y refinación minera, la liberación de efluentes industriales, la combustión de combustibles fósiles y productos derivados del petróleo, la mala disposición de residuos metálicos, entre otros, lo que ha provocado un incremento en su concentración, dispersión y exposición de muchos metales incluyendo el cadmio (Cd), talio (Tl) y vanadio(V) ([Järup, 2003](#)); los cuales son tema de esta investigación.

1. Cadmio (Cd)

1.1. Características físicas y químicas del Cd

El Cd es un elemento metálico descubierto por el alemán Friedrich Stromeyer en 1817, su nombre proviene de la palabra latina “*cadmia*” que significa “calamina”, junto con el zinc (Zn) y el mercurio (Hg) forma parte del grupo 12 de la tabla periódica, posee una masa atómica de 112.41, número atómico 48, densidad relativa de 8.64 g cm^{-3} , punto de ebullición de 765 °C , punto de fusión de 320.9 °C , radio atómico de 1.54 Å . El Cd se encuentra en la naturaleza en bajas concentraciones, sin embargo es considerado tóxico, y se encuentra dentro de la lista de contaminantes ambientales ([WHO, 1992a](#); [U. S. EPA, 1999](#)). Este metal puede combinarse con otros elementos y formar compuestos como cloruros, óxidos, sulfuros, entre otros. Éstos pueden poseer propiedades fisicoquímicas en común (**Cuadro 1**; [WHO, 1992b](#)).

Los compuestos de Cd son utilizados en distintos procesos industriales: Chapado protector de acero, estabilizadores para PVC, pigmentos de plástico y vidrio, material de electrodo en baterías de níquel-cadmio y como componente en aleaciones ([EHC 135, 1992](#)). Sus desechos pueden unirse fuertemente a las partículas del suelo permaneciendo en él por muchos años. Se estima que su vida media es de 15 a 30 años ([Martin y Kaplan, 1998](#); [Pernía et al., 2008](#)).

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas de los compuestos de cadmio (EHC 135, 1992).

| Nombre | Fórmula Empírica | Masa atómica (g mol ⁻¹) | Densidad relativa (g cm ⁻³) | Punto de fusión (°C) | Punto de ebullición (°C) | Solubilidad en agua (g L ⁻¹) |
|---------------------|--|--|--|-------------------------|-----------------------------|---|
| Cadmio | Cd | 112.41 | 8.642 | 320.9 | 765 | Insoluble |
| Cloruro de cadmio | CdCl ₂ | 183.32 | 4.047 | 568 | 960 | 1400 (20°C) |
| Acetato de cadmio | C ₄ H ₆ CdO ₄ | 230.50 | 2.341 | 256 | • | Muy soluble |
| Óxido de cadmio | CdO | 128.40 | 6.95 | < 1426 • | 900-1000 • | Insoluble |
| Hidróxido de cadmio | Cd(OH) ₂ | 146.41 | 4.79 | 300 | * | 0.0026 (26°C) |
| Sulfuro de cadmio | CdS | 144.46 | 4.82 | 1750 | * | 0.0013 (18°C) |
| Sulfato de cadmio | CdSO ₄ | 208.46 | 4.691 | 1000 | * | 755 (0°C) |
| Sulfito de cadmio | CdSO ₃ | 192.46 | * | • | * | Levemente soluble |

*Sin dato. • Se descompone.

1.2. Origen del Cd en la naturaleza

Las principales emisiones de Cd a la atmósfera son provocadas principalmente por la actividad antropogénica, como la minería, fundición de metales, la quema de combustibles fósiles, el uso de fertilizantes fosfatados, la fabricación de baterías, cementos, pigmentos, plásticos, entre otros ([Nava-Ruíz y Méndez-Armenta, 2011](#)).

En las últimas cuatro décadas las emisiones de Cd al ambiente se han mantenido constantes (20,000 t año⁻¹), ya que desde 1980 se observó una mayor regulación respecto a su uso e implementación de programas de captura y reciclado. Sin embargo, la creciente industrialización en regiones de Europa, Estados Unidos y Asia oriental han incrementado la demanda de este metal, lo que ha provocado una dispersión de hasta tres veces más en estas zonas y pueden aumentar aún más si no existe un control estricto sobre las emisiones ([Cullen y Maldonado, 2013](#)).

Las concentraciones reportadas de Cd en el agua potable son menores a 1 µg L⁻¹, en el aire urbano van de 5 a 40 ng m⁻³, en zonas rurales de 1 a 5 ng m⁻³, en suelos es de 0.26 mg L⁻¹, y en plantas vasculares de 1 a 10 mg kg⁻¹ ([U.S. EPA, 1999](#); [Carranza-Bautista, 2009](#)). La población en general puede estar expuesta al Cd principalmente a través del agua para beber y por la ingesta de comida contaminada con Cd (en hojas de vegetales, en cereales, frutas, hortalizas, entre otros) ([Nava-Ruíz y Méndez-Armenta, 2011](#)).

1.3. Ciclo biogeoquímico del Cd

Las emisiones de Cd por la vía antropogénica han alterado significativamente el ciclo biogeoquímico de este metal y sus emisiones van de 3,000 a 7,570 t año⁻¹ en comparación de 1,440 t año⁻¹ por flujo natural en el ambiente, las principales fuentes

incluyen la producción de metales no ferrosos, la quema de combustibles fósiles, la producción de hierro y acero, la eliminación de residuos y la producción de cemento (Pacyna y Pacyna, 2001; Cullen y Maldonado, 2013).

El Cd es removido de la atmósfera principalmente por deposición de partículas, precipitación, escorrentía y erosión, es transportado a ríos y océanos donde además llegan los efluentes industriales, estas aguas de ríos contaminados con Cd pueden a su vez contaminar tierras cercanas a través de la irrigación de cultivos o por deposición de sedimentos degradados (Figura 1; Pernía *et al.*, 2008).

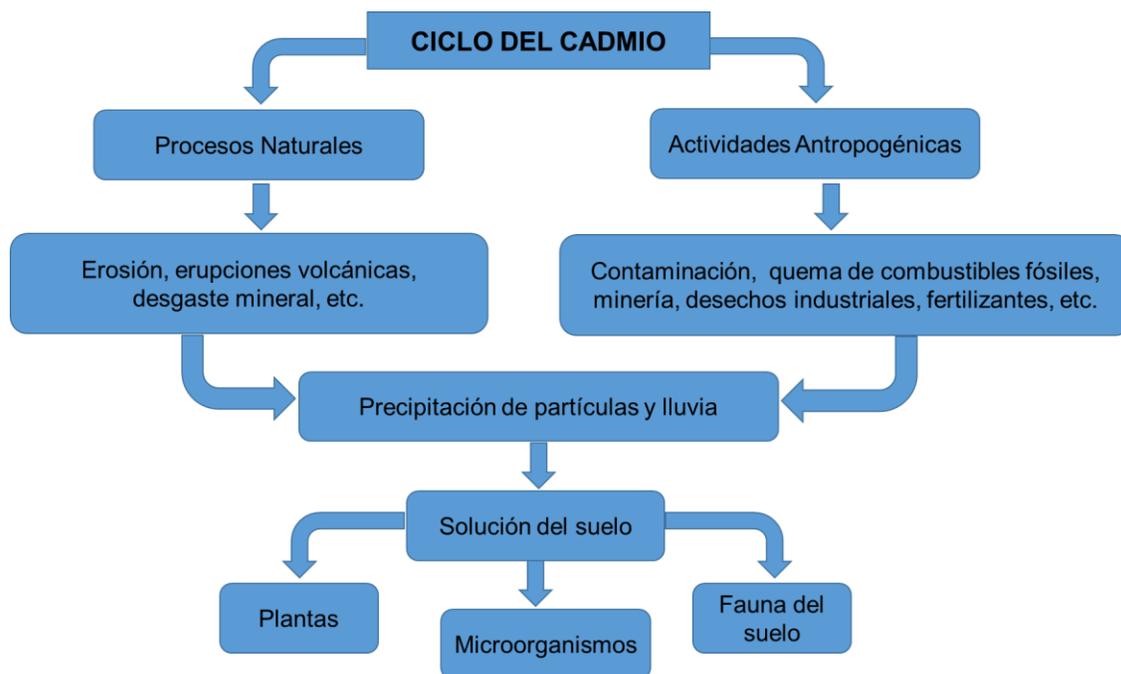


Figura 1. Transporte de Cd en el suelo (modificado de Badillo-German, 1985).

Por su parte, cuando el Cd se incorpora a los océanos presenta un comportamiento muy parecido al fosfato, lo que sugiere que el Cd tiene un papel fisiológico para el fitoplancton marino, además se ha encontrado que tiene una gran importancia ecológica, debido a

que participa en la adquisición de carbono por las algas marinas, sin embargo se sigue trabajando para entender la compleja interacción entre la composición química del agua de los océanos y los microorganismos marinos que dominan la exportación de Cd a la superficie (Cullen y Maldonado, 2013).

1.4. Cadmio en plantas superiores

En las últimas décadas la actividad industrial y la agricultura intensiva (con uso de compuestos químicos), han ocasionado un gran impacto en el medio ambiente, mismo que se ve drásticamente reflejado en la calidad del agua, del aire y de los suelos. Las implicaciones que se producen en el suelo son de suma importancia dado que es la principal fuente de compuestos y elementos para las plantas; entre éstos, los metales pesados que ocasionan toxicidad a la planta (Oancea *et al.*, 2005).

La capacidad que pueden tener las plantas al acumular metales puede dividirse en tres grupos: Las acumuladoras, que almacenan los metales principalmente en los brotes y crecen en los suelos donde hay tanto concentraciones bajas como altas de metales; las indicadoras, las cuales presentan en sus tejidos concentraciones muy similares a las que existen de forma natural en el ambiente; y las exclusoras, en donde se mantienen bajas concentraciones de metales en los brotes de la planta pero existen altas concentraciones fuera de ella (Seregin e Ivanov, 2001).

Das *et al.* (1997) mencionan que la resistencia que presentan las plantas a elementos tóxicos no siempre ha sido la misma, si no que han evolucionado, lo que ha llevado a que las plantas desarrollen mecanismos de tolerancia a elementos tóxicos como el Cd. Otros autores como Cheng (2003), establecen que debido a que el Cd no forma parte de

los elementos esenciales, sino que es más bien considerado un contaminante ambiental puede acumularse y provocar efectos adversos en las plantas.

El Cd ha sido ampliamente estudiado en muchas plantas ([Di Toppi y Gabrielli, 1999](#)), se ha reportado que puede transferirse y multiplicar su concentración en las cadenas tróficas donde está presente. Además, se ha sabe que la principal ruta de absorción en la planta es por medio de las raíces y que la absorción depende básicamente de la biodisponibilidad y de la concentración del Cd. La concentración de Cd es regulada por las propiedades físico-químicas del suelo (materia orgánica, el pH, el potencial redox y la temperatura) así como así como por la concentración de otros elementos ([Pernía et al., 2008](#)).

El Cd tiene efectos a nivel bioquímico, celular y fisiológico en plantas superiores; sin embargo, la forma en que el Cd altera diversos procesos aún no es clara; algunos autores sugieren que los efectos del Cd son dependientes de la concentración, el tiempo de exposición y la especie expuesta a este metal ([Benavides et al., 2005](#); [Oancea et al., 2005](#)).

1.5. Absorción y transporte de Cd por plantas superiores

La distribución de Cd en la planta depende de: 1) La biodisponibilidad de Cd dentro de la rizósfera; 2) La tasa de transporte de Cd en las raíces a través de las vías apoplástica y simplástica; 3) La proporción de Cd fijado en las raíces como complejo Cd-fitoquelatina y la acumulada dentro de la vacuola; y 4) Tasas de carga de xilema y translocación de Cd. Por otra parte, la capacidad de intercambio cationico (CIC) de las paredes de las células de la raíz puede ser un factor determinante en la captación de metales, ya que

entre más alta sea la CIC, mayor es la absorción de metales en las paredes celulares, haciendo por tanto a los iones metálicos más disponibles para el transporte a través de la membrana; asimismo disminuye el eflujo de los metales. La CIC alta también aumenta el contenido del metal en el citoplasma (Nazar *et al.*, 2012).

La mayor parte de Cd dentro de la planta es acumulado en la raíz, quedando secuestrado en la vacuola, por lo tanto solo una pequeña parte es transportada a la parte aérea de la planta, concentrándose en orden decreciente en tallos, hojas, frutos y semillas. Cuando el Cd se encuentra en la raíz, viaja por el xilema a través del apoplasto y al simplasto formando complejos (Nazar *et al.*, 2012).

1.6. Efectos de la absorción de Cd en plantas superiores

Como se ha mencionado anteriormente, los efectos que puede provocar el Cd en las plantas han sido bien documentados; sin embargo los mecanismos moleculares responsables no son completamente claros, algunos autores concuerdan que entre más altas sean las concentraciones y el tiempo de exposición, más severas serán las alteraciones en el metabolismo y en el crecimiento de las plantas (Oancea *et al.*, 2005).

De forma general, el Cd provoca inestabilidad de la entrada, transporte y uso de elementos esenciales como el Ca, Mg, P y K, lo que puede llevar a la planta a un desequilibrio nutrimental. Además, altera la entrada y transporte de nitrato desde la raíz al tallo, pueden presentar alteraciones en la apertura estomática al interactuar con el balance hídrico de la planta, causar alteraciones en el ciclo de Calvin, la fotosíntesis, la transpiración, el metabolismo de los carbohidratos, y el principal síntoma de toxicidad por Cd es la clorosis producida por la deficiencia de hierro (Benavides *et al.*, 2005).

De forma visual se puede observar el enrollamiento de las hojas, reducción del crecimiento de raíces y tallos ocasionado por una disminución de la tasa de elongación celular. La reducción en el crecimiento de la raíz se ha observado en *Allium cepa*, *Oryza sativa* y *Silene cucubalus*, donde se ha observado que la raíz es el primer órgano que recibe el daño por Cd (Oancea *et al.*, 2005).

Tran y Popova (2013), determinaron que cuando las plantas son expuestas al Cd, se inhibe el crecimiento, se presenta reducción de brotes, menor elongación de raíces, enchinamiento de hojas e inhibición de formación de raíces laterales.

Dentro de la planta, el Cd estimula la actividad de la enzima NADPH-oxidasa provocando una explosión oxidativa que produce superóxido extracelular, acumulación de peróxido de hidrógeno y peroxidación de lípidos. Además estimula la producción de fitoquelatinas mediante el aumento de la actividad de la fitoquelatina sintasa, lo que ocasiona la quelación del Cd en el conjugado fitoquelatina-Cd de las vacuolas y disminuyendo la concentración de Cd libre. Teniendo en cuenta que las fitoquelatinas son oligómeros de glutatión reducido (GSH), éste puede agotarse con la síntesis de fitoquelatinas y alterar el mantenimiento del equilibrio redox celular (Nazar *et al.*, 2012).

Así mismo, la exposición con Cd pueden reducir la actividad de la ATPasa alterando la funcionalidad de la membrana plasmática, además, produce desequilibrios en el metabolismo del cloroplasto inhibiendo la síntesis de clorofila y reduciendo la actividad de enzimas implicadas en la fijación del CO₂ (Rodríguez-Serrano *et al.*, 2008).

2. Talio (Tl)

2.1. Características físicas y químicas del Tl

El talio (Tl) es un metal pesado que fue descubierto en Inglaterra por Sir William Crookes en 1861, su nombre proviene del griego *thallos* que significa “brote o tallo verde”, es un metal no esencial para plantas superiores y está presente en bajas concentraciones pero éstas son muy tóxicas (WHO, 1996; Kazantzis, 2000).

En conjunto con el boro (B), aluminio (Al), galio (Ga) e indio (In), el Tl forma parte del grupo 13 de la tabla periódica. Es suave, maleable, de color gris metálico, tiene número atómico 81, masa atómica relativa de 204.38, densidad relativa de 11.85 g cm⁻³, con puntos de fusión y ebullición de 303 °C y 1457 °C, respectivamente; tiene un radio iónico de 1.50 Å, radio atómico de 1.71 Å, presenta dos estados de oxidación Tl⁺ y Tl³⁺, tiene similitud con cationes como el potasio (K⁺) (Wierzbicka *et al.*, 2004; Rodríguez-Mercado y Altamirano-Lozano, 2013).

Por varios años el Tl fue usado como principal componente de venenos para ratas, y desde 1926 como insecticida y plaguicida, entre los compuestos más comercializados se encuentran el acetato de talio (I), cloruro de talio(I), carbonato de talio(I), sulfato de talio(I), entre otros (Cuadro 2) (WHO, 1996; Léonard y Gerber, 1996).

Cuadro 2. Propiedades físicas y químicas de los compuestos de talio (WHO, 1996).

| Nombre | Fórmula química | Masa atómica (g mol ⁻¹) | Densidad relativa (g cm ⁻³) | Punto de fusión (°C) | Punto de ebullición (°C) | Color | Solubilidad en agua |
|-----------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---|----------------------|--------------------------|-----------------|----------------------------------|
| Talio | Tl | 204.38 | 11.85 | 303.5 | 1,457 | Gris metálico | Insoluble |
| Acetato de talio(I) | CH ₃ COOTl | 263.43 | 3.765 | 131 | * | Blanco | Muy soluble |
| Bromuro de talio(I) | TlBr | 284.29 | 7.557 (a 17.3°C) | 480 | 815 | Amarillo pálido | 0.5 g L ⁻¹ a 25 °C |
| Carbonato de talio(I) | Tl ₂ CO ₃ | 468.78 | 7.110 | 273 | Sin dato | Blanco | 40.3 g L ⁻¹ a 15.5 °C |
| Cloruro de talio(I) | TlCl | 239.84 | 7.004 (a 30°C) | 430 | 720 | Blanco | 2.9 g L ⁻¹ a 15.5 °C |
| Fluoruro de talio(I) | TlF | 223.38 | 8.23 (a 4°C) | 327 | 655 | Sin color | 786 g L ⁻¹ a 15 °C |
| Hidróxido de talio(I) | TlOH | 221.39 | * | 139 | * | Amarillo pálido | 259 g L ⁻¹ |
| Oxido de talio(I) | Tl ₂ O | 424.77 | 9.52 (a 16°C) | 300 | 1080(-O) | Negro | Insoluble |
| Oxido de talio(III) | Tl ₂ O ₃ | 456.76 | 10.19 (22°C) | 717±5 | 875 (-O ₂) | Negro | Insoluble |
| Sulfato de talio(I) | Tl ₂ SO ₄ | 504.82 | 6.77 | 632 | Descompone | Blanco | 48.7 g L ⁻¹ a 20 °C |

*Sin dato.

2.2. Origen del TI en la naturaleza

Estudios de contaminación industrial demuestran la presencia de TI en depósitos minerales (crokesita, lorandita, cristita, avicenita, ellisita, silvita y polucita), rocas, suelos, agua y plantas (Léonard y Gerber, 1996; Cvjetko *et al.*, 2010).

2.3. Ciclo biogeoquímico del TI

No existe información suficiente que explique el ciclo biogeoquímico del talio, sin embargo se sabe que la dispersión puede ocurrir por actividades naturales y antropogénicas (**Figura 2**); en el ambiente, el TI precipita y llega a las aguas residuales donde es incorporado a los suelos a través de la irrigación de los cultivos, donde se incorpora a los organismos a través de la cadena trófica, poniendo en riesgo la salud de los organismos (Léonard y Gerber, 1996).

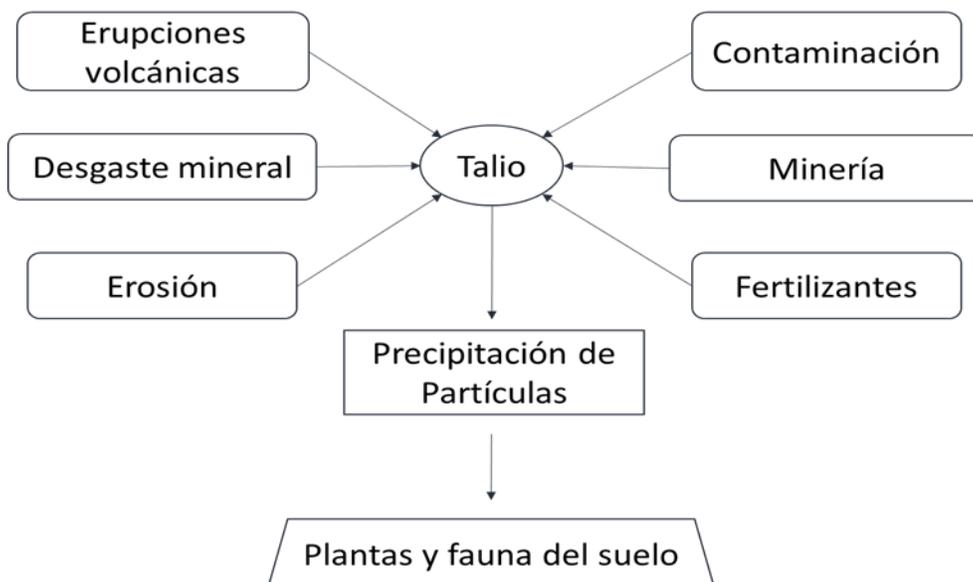


Figura 2. Transporte de TI en el suelo (modificado de Repetto y Del Peso, 1998; Repetto y Del Peso, 2001).

En regiones donde no se presenta actividad minera se ha observado que el Tl puede ser transportado a través del flujo de agua subterránea, afectando los ecosistemas a través del suministro de agua, lo que representa un peligro indudable en la cadena alimenticia para la salud humana (Xiao *et al.*, 2004).

En el ambiente, las concentraciones de Tl son muy variables dependiendo del área de monitoreo; no obstante, existen datos de referencia que actúan como límites seguros (Xiao *et al.*, 2004). En zonas no contaminadas se reportan concentraciones menores a 1 ng m⁻³ y en zonas industriales hasta 58 ng m⁻³ (Rodríguez-Mercado y Altamirano-Lozano, 2013). En agua potable la concentración máxima permitida de Tl es de 2 µg L⁻¹ (U.S. EPA, 2009). En ríos su concentración oscila de 0.001 a 1 mg L⁻¹ y en el mar de 0.01 a 0.02 mg L⁻¹ (WHO, 1996; Cvjetko *et al.*, 2010). En suelos de cultivo, la concentración de Tl aceptada es de 1 mg kg⁻¹; el contenido del Tl en los alimentos generalmente es bajo y depende directamente de los niveles en el suelo. En frutas y verduras se ha reportado Tl en concentraciones de 0.05 a 0.1 mg kg⁻¹ (WHO, 1996; Léonard y Gerber, 1997).

2.4. Talio en plantas superiores

La principal vía de exposición a Tl para animales y seres humanos es la ingestión de plantas cultivadas en suelos contaminados por este metal. Cuando el Tl está presente en los suelos, es fácilmente absorbido por las plantas porque está presente como Tl(I) que es termodinámicamente estable (Madejón *et al.*, 2007).

La fitodisponibilidad del Tl depende de las especies vegetales; brócoli, nabo y col acumulan Tl en la parte aérea a concentraciones de hasta 20 mg kg⁻¹ de peso seco. En

otras especies como la zanahoria, frijol, papa y trigo, la concentración de Tl es menor y su presencia es predominante en raíces ([Pavličková et al., 2005](#)).

Existen varias investigaciones que informan la acumulación de Tl que se presenta en plantas de la familia *Brassicaceae*, es debida a que son plantas ricas en azufre. En éstas, el Tl se acumula en las partes comestibles (brotes y follaje) ([Madejón et al., 2007](#)). En un estudio se recolectaron plantas de *Hirschfeldia incana* (L.) y *Diplotaxis catholica* (L.), plantas silvestres de la familia *Brassicaceae*, consideradas como invasoras frecuentes en áreas perturbadas y cultivadas, y se analizaron en éstas las concentraciones de algunos elementos traza (As, Cd, Cu, Tl y Zn); el Tl fue el único elemento donde las concentraciones fueron superiores a los normales; presentándose la mayor concentración de Tl en flores y frutos de *H. incana* (5.00 mg kg⁻¹ y 3.77 mg kg⁻¹ respectivamente). Este tipo de plantas presentan un riesgo potencial en la cadena alimentaria en suelos con altas concentraciones de Tl ([Madejón et al., 2007](#)). De manera típica, la concentración de Tl en plantas es menor a 0.1 mg kg⁻¹ de peso seco ([Kazantis, 2000](#)).

Por otra parte, [Queirolo et al. \(2009\)](#) reportan que al norte de Chile, en una región dedicada a la extracción de cobre, al analizar muestras de cultivos de papas, haba, maíz y algas se encontró que los niveles y bioacumulación del Tl disminuyen de mayor a menor en papa, haba y maíz, respectivamente; mientras que en algas aumenta la concentración hasta 10 veces más de lo encontrado en plantas.

2.5. Absorción y transporte de Tl en plantas superiores

La absorción de Tl en plantas es viable dada la estrecha afinidad geoquímica entre Tl y K, estos dos elementos tienen radios iónicos similares es por ello que Tl puede sustituir fácilmente K en plantas durante sus procesos bioquímicos. El Tl tiene la capacidad de producir complejos con ligandos que contienen S y P, dando lugar a la sustitución con K en sus sitios de adsorción específicos (Xiao *et al.* 2004).

El transporte de Tl es principalmente en raíces por difusión; por ejemplo la fresa acumula Tl en la rizósfera con un alto porcentaje de translocación de la raíz hasta las hojas, con esto se confirma la importancia de la disponibilidad de nutrientes y movilidad de contaminantes de la rizósfera (Ferronato *et al.*, 2016).

En un estudio con (*Fragaria vesca* L., *Mentha pulegium* L. y *Ocimum basilicum* L) se cuantificó la disponibilidad de Tl en el suelo y la absorción y acumulación de éste en los tejidos de la planta durante 80 días; asimismo, se evaluó su efecto tóxico. Después de 80 días se trataron con 120 mg de Tl. El tratamiento de Tl en menta y albahaca se interrumpió después de 72 días (110 mg Tl), el testigo se trató con agua destilada. El contenido de K disminuyó en plantas tratadas con Tl con respecto al testigo siendo evidente en menta y albahaca.

Pavličková *et al.* (2005) evaluaron la absorción de talio por *Brassica napus* L. en suelos contaminados de manera artificial y natural. Se usaron dos conjuntos de tres tipos diferentes de suelos (pesados (Hrubčice), medios (Míchov) y ligeros (Račín). El primer conjunto se recolectaron en áreas con altos niveles de Tl (0.3, 1.5 y 3.3 mg kg⁻¹) y al segundo conjunto de suelos se adicionaron concentraciones bajas de Tl (0, 0.4, 2.4 y 6 mg kg⁻¹) de sulfato de talio. En suelos con contaminación artificial, el Tl estuvo más

disponible en comparación con aquellos contaminados de manera natural. La forma fisicoquímica, la unión y el contenido de TI son los principales factores que influyen en su absorción por las plantas. En este estudio el principal factor que influyó en la absorción de TI fue el contenido total en el suelo. La concentración de este elemento se presentó en las semillas de *Brassica* en concentraciones de hasta 45%.

Las altas concentraciones de TI en cultivos y otras plantas están estrechamente relacionadas con las concentraciones de TI en los suelos, también pudiera deberse por la sustitución de K por TI (Xiao *et al.*, 2004).

2.6. Efectos de la absorción de TI en plantas superiores

La disponibilidad del TI en el suelo y su absorción en los tejidos vegetales depende principalmente de la concentración y características fisicoquímicas del suelo, así como los mecanismos de absorción y tolerancia de este elemento (Ferronato *et al.*, 2016).

Los síntomas de toxicidad de TI varían entre especies, de manera general reduce el crecimiento vegetativo, la elongación de tallos y raíces, provoca el marchitamiento de hojas y la ausencia de fructificación (Ferronato *et al.*, 2016).

El TI limita la absorción de los iones K en los tejidos de los cultivos reemplazándolo, esto es debido a su radio iónico similar, el TI puede sustituir al K en la bomba Na^+/K^+ -ATPasa, formando grupos sulfhidrilo proteínicos, interactuando con riboflavina alterando la homeostasis del Ca e inhibiendo la inactivación de actividades enzimáticas, provocando problemas de toxicidad a los organismos (Ferronato *et al.*, 2016).

Al-Najar *et al.* (2003) evaluaron las diferentes fracciones de TI en la rizósfera de dos plantas hiperacumuladoras de este elemento (*Brassica oleracea acephala* L. cv.

Winterbor e *Iberis intermedia* Guers). Ambas especies presentaron el 18 y 2 % de TI acumulado en brotes respectivamente, cuando se agota la rizosfera el transporte de TI es por raíces principalmente por difusión. El fácil acceso fue la fracción 1 (no disponible en planta) en suelo por ambas especies de estudio.

Plantas de *Sinapsis alba* L., especie que tiene alta capacidad de acumular TI, se trataron con dosis crecientes de TINO_3 (0, 100, 500 y 1000 $\mu\text{g L}^{-1}$ de solución nutritiva), mostraron que el crecimiento de raíz se inhibió solo de manera inicial con concentraciones de 100 $\mu\text{g L}^{-1}$; plantas expuesta a 500 $\mu\text{g L}^{-1}$ mostraron toxicidad moderada. Con dosis de 1000 $\mu\text{g L}^{-1}$, el crecimiento de las raíces se inhibió durante todo el experimento. Con respecto a la morfología de las hojas, se observó que a concentraciones de 500 $\mu\text{g L}^{-1}$ se deformaron los márgenes, se presentó decoloración en las nervaduras y éstas fueron más pequeñas. Con dosis de 1000 $\mu\text{g L}^{-1}$ se presentaron necrosis y un 15% de las plántulas no sobrevivieron. En este estudio se identificaron dos fases de toxicidad de TI. En la primera fase, la no destructiva, no se mostraron efectos significativos en reacciones fotoquímicas y reordenamientos parciales de los complejos fotosintéticos en los niveles de pigmento y proteína y en la estructura del cloroplasto. La segunda fase que es la destructiva, se asocia con la oxidación masiva de pigmentos, la disminución de niveles de proteína del núcleo fotosintético y desaparición de la grana ([Mazur et al., 2016](#)).

[Xiao et al. \(2004\)](#) realizaron un estudio con altas concentraciones de TI en suelos de Lanmuchang en China, para ello recolectaron 32 muestras de suelo, 36 plantas de cultivo y tres plantas silvestres. El TI estuvo presente en partes comestibles de los cultivos en el orden siguiente: col verde > zanahoria > chile > repollo chino > arroz > maíz. La col verde presentó TI en concentraciones de 500 mg kg^{-1} de peso seco. La mayor concentración

de Tl en los cultivos correspondió con las concentraciones más altas de Ca y Mg. En este estudio se mostró que la contaminación con Tl ocurre en ausencia de la actividad minera, si bien esta actividad puede acelerar la transferencia de elementos tóxicos en la cadena alimentaria.

[LaCoste et al. \(2001\)](#) evaluaron la concentración de Tl en once hortalizas entre las que destacan frijol verde, remolacha, col verde, lechuga, cebolla, guisante, rábano, tomate, nabo y berro, así como la especie hiperacumuladora *Iberis intermedia*. Para lo anterior, las plantas se trataron con diferentes concentraciones de Tl (0.7 y 3.7 mg kg⁻¹) adicionadas a un suelo limoso. El nivel más alto se presentó en *Iberis intermedia* con 400 mg kg⁻¹ de materia seca. Entre las hortalizas, los niveles más altos de Tl se tuvieron en berro, rábano, nabo y col verde todas de la familia *Brassicaceae*, seguidos por la remolacha y espinaca.

3. El vanadio (V)

3.1. Características físicas y químicas del V

El vanadio (V) es un metal de transición cuyo descubrimiento se atribuye al químico sueco Nils Sefstrom en 1831; sin embargo, Andrés Manuel del Río lo descubrió en México desde 1801, su nombre es en honor a “*Vanadis*” la diosa escandinava de la belleza y la fertilidad ([IPCS, 1988](#); [Korbecki et al., 2012](#)).

El V es un metal de transición, de color gris plateado, punto de fusión 1910 °C, punto de ebullición 3407 °C, con una densidad relativa de 6.11 g cm⁻³. En la tabla periódica se

ubica como el primer elemento de transición del grupo 5, tiene como número atómico 23, masa atómica de 50.95, radio atómico de 1.34 Å, está presente en el ambiente en los estados de oxidación +3, +4 y +5 siendo la forma más predominante la del V(+5). El V puede formar diversos compuestos, entre los que se encuentra el metavanadato de amonio, pentóxido de vanadio, entre otros **(Cuadro 3)** (WHO, 1988).

Este elemento tiene el lugar 22 por su abundancia en la corteza terrestre, se encuentra en 68 minerales diferentes y se extrae principalmente de Sudáfrica (42.2%), Rusia (39.2%) y China (12.7%) donde existen las mayores reservas (IPCS, 1988).

De manera similar al molibdeno (Mo), el V tiene una posición excepcional dentro de los biometales, ya que participa en los procesos biológicos en forma de anión o catión, su química de coordinación es interesante, comúnmente presenta geometría octaédrica, de pirámide o bpirámide cuadrada, donde, un oxígeno siempre forma un doble enlace con V^{+5} ó V^{+4} , originando compuestos oxovanadatos u oxovanadilos (Rodríguez-Mercado y Altamirano-Lozano, 2006).

Cuadro 3. Propiedades físicas y químicas de los compuestos de vanadio (WHO, 1998).

| Nombre | Fórmula química | Estado de oxidación | Masa atómica (g mol ⁻¹) | Densidad relativa (g cm ⁻³) | Punto de fusión (°C) | Punto de ebullición (°C) | Solubilidad en agua |
|-------------------------|--------------------------------|---------------------|-------------------------------------|---|----------------------|--------------------------|---|
| Pentóxido de vanadio | V ₂ O ₅ | V | 181.88 | 3.357 | 690 | 1750 | 5.2 g L ⁻¹ a 15 °C |
| Trióxido de vanadio | V ₂ O ₃ | III | 149.88 | 4.87 | 1970 | * | Ligeramente soluble en fría. Soluble en caliente |
| Metavanadato de amonio | NH ₄ O ₅ | V | 116.98 | 2.326 | 200 | * | Soluble con 5.2 g L ⁻¹ a 15 °C |
| Tetracloruro de vanadio | VCl ₄ | IV | 192.75 | * | -28 ± 2 | 148.5 | Se descompone |
| Oxicloruro de vanadio | VOCl ₂ | IV | 137.85 | 2.88 | * | 127 | Se descompone |
| Metavanadato de sodio | NaVO ₃ | V | 121.93 | * | 630 | * | Soluble con 211 g L ⁻¹ a 15 °C |

*Sin dato.

3.2. Origen del V en la naturaleza

El V se encuentra como un agregado de minerales, tal es el caso de la magnetita titanífera, principal fuente de extracción de V debido a que se obtiene principalmente como un subproducto del hierro y titanio (Huang *et al.*, 2015).

Su presencia se observa en altas concentraciones en depósitos de agua como ríos, lagos y mares, tal es el caso de sedimentos en el fondo del Golfo Pérsico, donde se reportan concentraciones de 100 mg g^{-1} ; en aguas subterráneas de California y otros estados de los Estados Unidos de América se han encontrado cantidades superiores a 25 mg dm^{-3} (Korbecki *et al.*, 2012).

Se han reportado concentraciones de V en agua de ciudades de 0.15 a $1.4 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$ y en aguas de áreas rurales menores a $0.024 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$. En el agua para beber, la concentración de V debe ser menor a $10 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$, con un promedio de $4.3 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$; sin embargo se han encontrado niveles altos, que van de 49.2 a $70 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ en ríos cercanos a minas y mantos acuíferos ubicados cerca de zonas industriales. Se estima que la ingesta de V en la dieta es de 13 a $15 \text{ } \mu\text{g día}^{-1}$ y algunos autores mencionan que alcanza valores de $60 \text{ } \mu\text{g día}^{-1}$ (Rodríguez-Mercado y Altamirano-Lozano, 2006; García, 2006).

3.3. Ciclo biogeoquímico del V

En la superficie de la tierra se encuentran presentes diversos compuestos de V, que aunque pueden presentar propiedades distintas (concentración, pH, potencial redox), se encuentran participando activamente en los procesos geoquímicos y biogeoquímicos del V (Huang *et al.*, 2015).

El comportamiento químico que presenta el V en el agua controla el ciclo biogeoquímico del V en el ambiente, donde es dispersado principalmente por la actividad volcánica y las actividades industriales en forma de V, V(II), V(III), V(IV) y V(V) y posteriormente por deposición atmosférica se incorpora a los suelos y depósitos de agua donde puede ser un riesgo para los organismos presentes (**Figura 3**; Huang *et al.*, 2015).

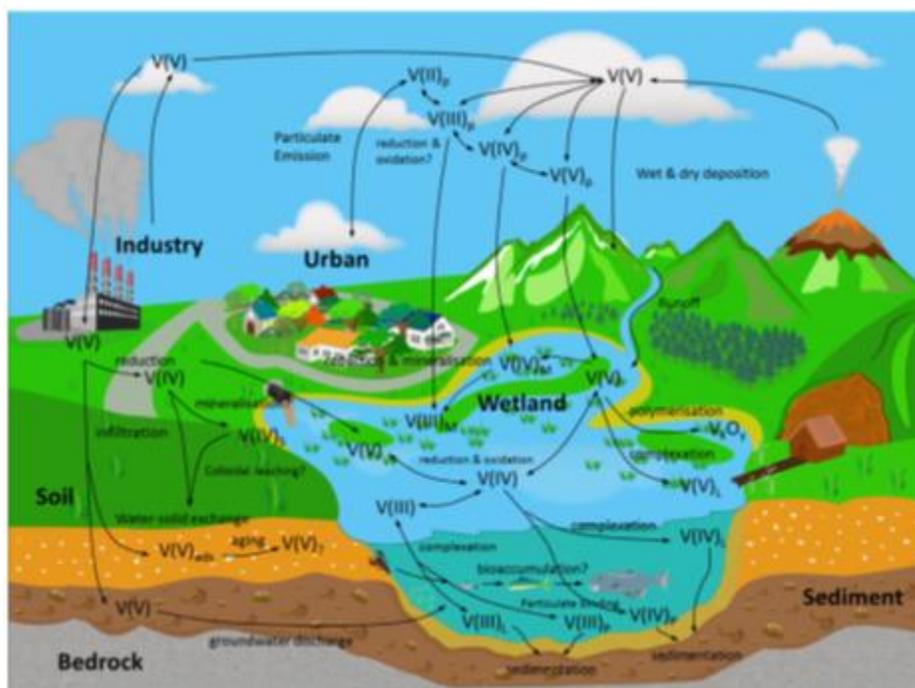


Figura 3. Ciclo biogeoquímico del V en el ambiente (Huang *et al.*, 2015).

3.4. Vanadio en plantas superiores

El V ha recibido poca atención; sin embargo, los reportes de investigación con este elemento en plantas superiores son controversiales. Algunos autores mencionan que con pequeñas concentraciones de este elemento se inhibe el crecimiento de las plantas y para otras es altamente tóxico. Otros autores, indican al incrementar la concentración de V en tejido vegetal a 10 ng g^{-1} aproximadamente, se incrementa el crecimiento. En 1953,

incluso Arnon y Wessel declararon que era un elemento esencial para algunas plantas (Olness *et al.*, 2002).

El vanadio ha sido detectado como constituyente en un gran número de plantas, en especial en aquellas que crecen en suelos donde se encuentra este elemento. Las concentraciones oscilan de 1 mg kg⁻¹ en peso seco, en los diferentes órganos de la planta. En los nódulos de leguminosas se han encontrado valores entre 3 y 4 mg kg⁻¹ (Navarro-Blaya y Navarro-García, 2003). Yang *et al.* (2011) mencionan que entre las plantas superiores el V es más alto en leguminosas.

En la mayoría de los cultivos contienen trazas de V, debido a que pequeñas concentraciones estimulan el crecimiento de las plantas y actúan como catalizador para la fijación de nitrógeno (Cappuyns y Slabbinck, 2012).

Existen muchos estudios de los efectos tóxicos de V en plantas, esta toxicidad es atribuida a la similitud estructural entre iones vanadato (H₂VO₄²⁻) y fosfato (H₂PO₄⁻). Vachirapatama *et al.* (2005) mencionan que algunos fertilizantes fosfatados están contaminados por altas concentraciones de V (90 a 180 mg kg⁻¹), como consecuencia el uso de esos fertilizantes hace que el V se difunda en suelos, agua y plantas. Aunque de manera positiva, el V desempeña un papel importante en la absorción de elementos por las células vegetales (Akoumianaki *et al.*, 2016).

La toxicidad del V en plantas se ha estudiado principalmente en soluciones nutritivas con concentraciones entre 1 y 5 mg L⁻¹ (Akoumianaki *et al.*, 2015). Además se reporta un efecto positivo y esencial en plantas de lechuga y tomate cuando se encuentra en bajas concentraciones (2 ng g⁻¹ en biomasa seca) (Wang y Liu, 1999). Antal *et al.* (2009) evaluaron 56 especies de plantas medicinales, donde el V puede identificarse en todas

ellas en concentraciones de $13 \mu\text{g kg}^{-1}$ a 76.3 mg kg^{-1} . El contenido de V que se encontró en la parte aérea en floración fue de $763 \mu\text{g kg}^{-1}$, seguido en hojas con $682 \mu\text{g kg}^{-1}$, raíces con $600 \mu\text{g kg}^{-1}$, flores $352 \mu\text{g kg}^{-1}$ y frutos $112 \mu\text{g kg}^{-1}$. *Thymus pulegionides* tiene una mayor capacidad de acumular V, aunque se destacan otras especies como *Geum urbanum*, *Urtica dioica*, *Hypericum perforatum* y *Valeriana officinalis*.

[Saco et al. \(2013\)](#) en semillas de *Phaseolus vulgaris* L. tratadas con concentraciones crecientes de V (0, 160, 240, 320 y $400 \mu\text{M}$) a partir de $\text{VOSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, encontró que bajas concentraciones (160 y $240 \mu\text{M}$) incrementan la longitud y área de raíz, la biomasa fresca y seca de raíz y hoja, así como la longitud y anchura en hoja. La concentración de V en raíces y hojas incrementó con el aumento de la dosis de V, siendo más abundante en hojas ($1544.0 \mu\text{g g}^{-1}$) de plantas tratadas con $320 \mu\text{M}$ V.

3.5. Absorción y transporte de V por plantas superiores

Existe evidencia de la biotransformación del vanadio en vanadato (VO_4^{-3}) a vanadil (VO_2^+) durante la absorción por las plantas ([Morrell et al., 1986](#)). El estado de oxidación más tóxico de V es +5 (vanadato) debido a que cuando es absorbido por los tejidos de las plantas puede inhibir la translocación de la H^+ -ATPasa de la membrana plasmática, la cual desempeña un papel importante en la absorción de nutrientes por las células vegetales. ([Vachirapatama et al., 2011](#)). Asimismo, la reducción celular interna de H_2VO_4^- a VO_2^+ ha llevado a especular la posibilidad de interacciones con calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) en soya ([Olness et al., 2002](#)).

[Bowman \(1983\)](#) menciona que la absorción de P se inhibe conforme incrementa la concentración de V; por el contrario, la absorción del V se inhibía a medida que

incrementa la concentración de P en *Neurospora crassa*. Estos dos elementos compiten entre sí por el mismo sistema de transporte a nivel membrana celular (Olness *et al.*, 2002).

Vachirapatama *et al.* (2011) llevaron a cabo experimentos hidropónicos para investigar la absorción de V en plantas de mostaza verde China (*Brassica campestris* ssp. *chinensis* var. *parachinensis*) y de tomate cuando son tratadas por seis concentraciones de metavanadato de amonio (0, 1, 10, 20, 40 y 80 mg NH₄VO₃ L⁻¹). La mayor acumulación de V fue en raíces en comparación con tallos y hojas en mostaza verde China. En tomate la mayor acumulación de V se tuvo en raíces en comparación con los frutos.

3.6. Efectos de la absorción de V en plantas superiores

El vanadato presenta propiedades inhibitorias en algunas enzimas que participan en la absorción de nutrientes, entre ellas destaca la H⁺-ATPasa de membrana plasmática (Kasai *et al.*, 1999). Este elemento como componente del suelo interfiere en la absorción del P por la planta (Olness *et al.*, 2005).

Vachiraparama y Jirakiattikul (2008), reportan que el V suministrado a una concentración de 80 mg NH₄VO₃ L⁻¹ afectó el crecimiento de plantas de mostaza verde China, al reducir la longitud de tallos, de raíces y el número de hojas; esta misma concentración también afectó el peso de la biomasa seca en los tres órganos de la planta. De igual manera, en las plantas de tomate la concentración más alta de NH₄VO₃, disminuyó la biomasa fresca y seca de raíz y fruto.

Wang y Liu (1999) evaluaron los efectos del V en el crecimiento de plántulas soya en dos diferentes tipos de suelo (fluvo-aquic y oxisol), que fueron mezclados con siete

concentraciones de V (0, 5, 10, 15, 30, 50 y 75 mg V kg⁻¹) con soluciones de NH₄VO₃ con un pH 6.0. Los resultados indicaron que con la dosis más alta de V aplicado se presentó la mayor concentración de V en el suelo oxisol debido a que estos suelos presentaron mayor cantidad de Fe y Mn totales (46 y 648 mg kg⁻¹, respectivamente) y por tanto pudo absorber mayores cantidades de V. Asimismo las plántulas de soya presentaron respuestas diferenciales, éstas dependientes de la concentración de V aplicada; en suelo fluvo-aquic a concentraciones mayores de 30 mg V kg⁻¹, la biomasa seca y el rendimiento se redujeron; por el contrario, en el suelo oxisol con la concentración de 75 mg V kg⁻¹, el rendimiento y biomasa seca de las plantas no fueron afectados. Además, a mayor concentración de V soluble en la solución del suelo se presentó mayor toxicidad en plantas cultivadas en suelo fluvo-aquic.

[Akoumianaki et al. \(2015\)](#) evaluaron el efecto del V en *Mentha pulegium* L. al aplicar cinco concentraciones de éste (0, 5, 10, 20, 40 mg L⁻¹) a partir de de NH₄VO₃ en condiciones de invernadero. De manera general las plantas no presentaron síntomas de toxicidad con el incremento en las concentraciones de V. Las plantas tratadas con 40 mg L⁻¹ presentaron mayor concentración de V en hojas, tallos y raíces (3.08, 8.93 y 26.00 mg kg⁻¹, respectivamente). La mayor concentración de V en raíces pudiera deberse a un mecanismo de retención que aún no ha sido bien estudiado. Las concentraciones de Fe presentó la misma tendencia que la del V.

El tratamiento de plántulas de arroz con V (0, 1, 10, 40 y 80 mg L⁻¹) en condiciones hidropónicas fue realizado por [Chongkid et al. \(2007\)](#). Estos autores reportan que las plantas tratadas con 80 mg L⁻¹ durante 42 días, disminuyeron su altura y diámetro de tallo. Con respecto a las biomásas fresca y seca de tallos y raíces, éstas disminuyeron

con la dosis más alta de V después de 70 días de tratamiento. Con la dosis de 10 mg V L⁻¹, se presentaron mayores valores de biomasa fresca y seca; lo anterior, se debe a que el V promueve la absorción de N en forma de amonio, activando el crecimiento de la planta. En la etapa reproductiva, dosis bajas de V de (0-20 mg L⁻¹) incrementaron el número de panículas por planta, número de semillas por panícula, peso de semillas por planta y peso de 100 semillas. La mayor concentración de V se registró en raíces, seguida de tallos en la dosis más alta de V con medias de 4859.20 y 2607.30 mg kg⁻¹, respectivamente.

[Saco et al. \(2013\)](#) en *Phaseolus vulgaris* L. reportan que el V afecta la morfología de hojas siendo más pequeñas y redondas, las raíces son más pequeñas y de menor superficie, conforme aumenta la dosis de este elemento. Los cambios ultraestructurales muestran cambios en los espacios intracelulares en raíces debido probablemente por la absorción y distribución del elemento. En hojas se presentó una disminución en el número de cloroplastos y una desorganización de tilacoides cuando las plantas se trataron con V en un intervalo de concentración de 240 a 320 μM.

[Akoumianaki et al. \(2016\)](#) reportan que en albahaca (*Ocimum basilicum* L.) tratada en invernadero con cinco concentraciones de V (0, 5, 10, 20 y 40 mg L⁻¹) empleando como fuente NH₄VO₃, mostraron reducción de crecimiento solo con la dosis más alta evaluada. La biomasa seca de raíz aumentó con la dosis creciente de V. De la misma forma, al incrementar la dosis de V, la concentración en hojas y raíces e aumentó, pero disminuyó en tallos. La concentración de Fe en hojas y raíces disminuyó con las dosis más altas de V. La concentración de Pb disminuye al incrementar las dosis de V en todos los órganos de la planta. Este estudio indica que el 75 % del V absorbido se presentó en raíces.

[Gil et al. \(1995\)](#) reportan que en lechugas cultivadas en soluciones nutritivas tratadas con V (0, 0.1, 0.2, 0.5 y 1 mg/kg), (0, 100, 200, 500 y 1000) observaron que la biomasa fresca, seca y el rendimiento disminuyeron con las dosis de 0.2 a 1 mg/kg. Las plantas presentaron síntomas de toxicidad, entre ellos oscurecimiento y modificación de la forma de las raíces principales, disminución en el número y longitud de raíces secundarias y finalmente necrosis. En hojas se observó la pérdida de turgencia con dosis de V de 0.5 y 1.0 mg/kg. La mayor acumulación de este elemento fue en raíces. El V afectó de manera positiva las concentraciones foliares de Ca y Fe.

[Olness et al. \(2005\)](#) indican que en plantas de *Cuphea viscosissima* x *C. lanceolata* ('PSR23') cultivadas en hidroponía, donde se aplicaron dos concentraciones de $MgSO_4$ (0.346 y 1.38 mM) y siete de vanadato (0.00, 15, 26, 41, 61, 102 y 153 μM) observaron que a medida que aumenta la concentración de V disminuye el crecimiento. Asimismo, se registraron efectos de toxicidad por V (inhibición del crecimiento en los brotes, clorosis en hojas y pérdida de raíces).

[Osu y Onyema \(2016\)](#) reportan que el tratamiento con NH_4VO_3 (0, 10, 15, 20 y 40 ppm) no afectó el crecimiento de plantas de pepino. Este elemento se acumuló principalmente en raíces debido a la reducción de vanadato (V) a vanadil (IV) durante la absorción. A medida que se incrementó la concentración de NH_4VO_3 , aumentó la absorción de nutrientes y se redujo la absorción de los metales pesados adicionados al medio disminuye. En aquellos suelos no tratados con V, la absorción de nutrientes y metales pesados se incrementó.

[Yang et al. \(2011\)](#) al evaluar alfalfa cultivada en suelos que contenían vanadio y cadmio, reportan que la acumulación de V osciló desde 3.46 a 3,440.14 $mg\ kg^{-1}$ en raíces y en la

parte aérea de 2.16 a 154.34 mg kg⁻¹; estos resultados muestran la capacidad de absorción de V por parte de este cultivo. A concentraciones de 25 y 50 mg V kg⁻¹, las plantas presentaron mayor biomasa y mayor altura; el incremento en las concentraciones de V de 100 a 400 mg kg⁻¹ inhibió el crecimiento. Al aumentar la dosis de V se presentó una mayor concentración de Cd.

LITERATURA CITADA

- Akoumianaki-loannidou A, Barouchas PE, Ilia E, Kyramariou A, Moustakas NK. 2016. Effect of vanadium on dry matter and nutrient concentration in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Australian Journal of Crop Science*, 10(2): 199-206.
- Akoumianaki-loannidou A, Barouchas PE, Kyramariou A, Ilia E, Moustakas NK. 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): 294-298.
- Al-Najar H, Schulz R, Römheld V. 2003. Plant availability of thallium in the rhizosphere of hyperaccumulator plants: a key factor for assessment of phytoextraction. *Plant and Soil*, 249(1): 97-105.
- Antal DS, Dehelean CA, Canciu CM, Anke M. 2009. Vanadium in medicinal plants: new data on the occurrence of an element both essential and toxic to plants and man. *Analele Universității din Oradea, Fascicula Biologie*, 16(2): 5-10.
- Badillo Germán JF. 1985. Curso básico de toxicología ambiental. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos. Metepec; ECO; 1985. Tab. pp. 205-29.
- Benavides MP, Gallego M, Tomaro ML. 2005. Cadmium toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(1): 21-34.
- Bowman BJ. 1983. Vanadate uptake in *Neurospora crassa* occurs via phosphate transport system II. *Journal of Bacteriology*, 153(1): 286-291.
- Cappuyns V, Slabbinck E. 2012. Occurrence of vanadium in Belgian and European alluvial soils. *Applied and Environmental Soil Science*, 1-12.
- Carranza-Bautista HD. 2009. Bioacumulación de cadmio en plantas silvestres de la zona de Xochimilco con potencial para fitorremediación". Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM.

- Cheng S. 2003. Effects of heavy metals on plants and resistance mechanisms. *Environmental Science and Pollution Research*, 10(4): 256-264. doi: 10.1065/espr2002.11.141.2
- Chongkid B, Vachirapattama, Jirakiattikul Y. 2007. Effects of vanadium on rice growth and vanadium accumulation in rice tissues. *Kasetsart Journal, Natural Science*, 41: 28-33.
- Cullen JT, Maldonado MT. 2013. Biogeochemistry of Cadmium and Its Release to the Environment. En: Sigel A, Sigel H, Sigel RKO (Eds), *Cadmium: From Toxicity to Essentiality, Metal Ions in Life Sciences*. Springer Finance. 31-58. doi: 10.1007/978-94-007-5179-8_2.
- Cvjetko P, Cvjetko I, Pavlica M. 2010. Thallium toxicity in humans. *Arhiv za Higijenu Rada i Toksikologiju*, 61(1), 111-118. 61: 111-119.
- Das P, Samantaray S, Rout GR. 1997. Studies on cadmium toxicity in plants: a review. *Environmental Pollution*, 98(1): 29-36.
- Di Toppi LS, Gabbrielli R. 1999. Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany*, 41(2): 105-130.
- Ferronato C, Carbone S, Vianello, Vittori AL. 2016. Thallium toxicity in mediterranean horticultural crops (*Fragaria vesca* L., *Mentha pulegium* L., *Ocimum basilicum* L.). *Water, Air and Soil Pollution*, 227(10): 1-10.
- García GB. 2006. El vanadio, un elemento ambiguo. *Acta Toxicológica Argentina*, 14(2): 32-36.
- Gil J, Alvarez CE, Martínez MC, Pérez N. 1995. Effect of vanadium on lettuce growth cationic nutrition, and yield. *Journal of Environmental Science and Health*, 30(1): 73-87.
- Huang JH, Huang F, Evans L, Glasauer S. 2015. Vanadium: Global (bio) geochemistry. *Chemical Geology*, 417: 68-89.
- IPCS. International Programme on Chemical Safety. 1988. Vanadium. *Environmental Health Criteria*, World Health Organisation, Ginebra, No. 81.
- Järup L. 2003. Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin*, 68: 167-182. doi: 10.1093/bmb/ldg032.
- Kasai M, Yamzaki J, Kikuchi M, Iwaya M, Sawada S. 1999. Concentration of vanadium in soil water and its effect on growth and metabolism of rye and wheat plants. *Communications in Soil Science and Plants Analysis*, 30(7-8): 971-982.
- Kazantzis G. 2000. Thallium in the environment and health effects. *Environ Geochem Hlth* 22: 275-280.
- Korbecki J, Baranowska-Bosiacka I, Gutowska I, Chlubek D. 2012. Biochemical and medical importance of vanadium compounds. *Acta Biochimica Polonica*, 59(2): 195-200.

- LaCoste C, Robinson B, Brooks R. 2001. Uptake of thallium by vegetables: its significance for human health, phytoremediation, and phytomining. *Journal of Plant Nutrition*, 24(8): 1205-1215.
- Léonard A, Gerber GB. 1997. Mutagenicity, carcinogenicity and teratogenicity of thallium compounds. *Mutation Research*, 387(1): 47-53.
- Madejón P, Murillo JM, Marañón T, Lepp NW. 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.
- Maluszynski MJ. 2009. Thallium in environment. Institute of Environment Protection, Poland. *Environmental Protection and Natural Resources*, 40: 31-38.
- Martin HW y Kaplan DI. 1998. Temporal changes in cadmium, thallium, and vanadium mobility in soil and phytoavailability under field conditions. *Water, Air, and Soil Pollution*, 101(1): 399-410.
- Mazur R, Sadowska M, Kowalewska Ł, Abratowska A, Kalaji HM, Mostowska A, Garstka M, Krasnodebska-Ostrega B. 2016. Overlapping toxic effect of long term thallium exposure on white mustard (*Sinapis alba* L.) photosynthetic activity. *BMC Plant Biology*, 1(16): 1-17. doi: 10.1186/s12870-016-0883-4
- Mazur, R., Sadowska, M., Kowalewska, Ł., Abratowska, A., Kalaji, HM, Mostowska A, Mostowska A, Garstka M, Krasnodebska-Ostrega, B. 2016. Overlapping toxic effect of long term thallium exposure on white mustard (*Sinapis alba* L.) photosynthetic activity. *BMC Plant Biology*, 16(1), 191.
- Morrell BG, Lepp NW, Phipps DA. 1986. Vanadium uptake by higher plants: Some recent developments. *Environmental Geochemistry and Health*, 8(1): 14-18.
- Navarro-Blaya S, Navarro-García G. 2003. *Química Agrícola*. Ed. Mundiprensa México, s.a. de C.V. 2ed. México D.F. 419 p.
- Nava-Ruíz C, Méndez-Armenta M. 2011. Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Arch, Neurocién, (Méx)*, 16(3): 140-147.
- Nazar R, Iqbal N, Masood A, Khan MIR, Syeed S, Khan NA. 2012. Cadmium toxicity in plants and role of mineral nutrients in its alleviation. *American Journal of Plant Sciences*, 3: 1476-1489. doi: 10.4236/ajps.2012.310178
- Oancea S, Foca N, Airinei A. 2005. Effects of heavy metals on plant growth and photosynthetic activity. *Analele Univ. "Al. I. Cuza, 1*: 107-110.
- Olness A, Archer DW, Gesch RW and Rinke J. 2002. Resin-extractable phosphorus, vanadium, calcium and Magnesium as factors in maize (*Zea mays* L.) yield. *J. Agronomy and Crop Science*, 188: 94-101.
- Olness A, Gesch R, Forcella F, Archer D, Rinke J. 2005. Importance of vanadium and nutrient ionic ratios on the development of hydroponically grown cuphea. *Industrial Crops and Products*, 21: 165-171.

- Osu CI, Onyema MO. 2016. Vanadium inhibition capacity on nutrients and heavy metal uptake by *Cucumis sativus*. *Journal of American Science*, 12(10): 63-66.
- Pacyna JM, Pacyna EG. 2001. An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide. *Environmental Reviews*, 9: 269-298. doi: 10.1139/er-9-4-269
- Pavličková J, Zbiral J, Smatanová M, Houserová P, Cizmárová E, Havlíková S, Kubán V. 2005. Uptake of thallium from artificially and naturally contaminated soils into rape (*Brassica napus* L.). *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 53: 2867-2871.
- Pernía B, De Sousa A, Reyes R, Castrillo R. 2008. Biomarcadores de contaminación por cadmio en plantas. *Interciencia*, 32(2): 112-119.
- Queirolo F, Stegen S, Contreras OC, Ostapczuk P, Queirolo A, Paredes B. 2009. Thallium levels and bioaccumulation in environmental samples of northern Chile: human health risks. *J. Chil. Chem. Soc.*, 54(4): 464-468.
- Repetto G, Del Peso A. 1998. Human thallium toxicity. *In: Nriagu JO (ed.) Thallium in the environment*. Vol. 29. EUA: John Wiley and Sons, Inc. EUA. pp. 167-199.
- Repetto G, Del Peso A. 2012. Gallium, indium, and thallium. *En: Bingham E y Cohrssen B (Eds). Patty's toxicology*. Vol. 1. Sexta edición, EUA, John Wiley and Sons, Inc. EUA. pp. 257-353.
- Rodríguez-Mercado JJ, Altamirano-Lozano MA. 2006. Vanadio: Contaminación, metabolismo y genotoxicidad. *Rev. Int. Contam. Ambient.*, 22(4): 173-189.
- Rodríguez-Mercado JJ, Altamirano-Lozano MA. 2013. Genetic toxicology of thallium: a review. *Drug Chem. Toxicol.*, 36: 369-383.
- Rodríguez-Serrano M, Martínez-de la Casa N, Romero-Puertas MC, del Río LA, y Sandalio LM. 2008. Toxicidad del Cadmio en Plantas. *Ecosistemas*, 17(3): 139-146.
- Saco D, Martín S, San José P. 2013. Vanadium distribution in roots and leaves of *Phaseolus vulgaris*: morphological and ultrastructural effects. *Biologia Plantarum*, 57(1): 128-132.
- Seregin IV, Ivanov VB. 2001. Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 48(4): 606-630.
- Singh R, Gautam N, Mishra A, Gupta R. 2011. Heavy metals and living systems: An overview. *Indian J. Pharmacol.* 43(3): 246-253. doi: 10.4103/0253-7613.81505.
- Tran TA, Popova LP. 2013. Functions and toxicity of cadmium in plants: Recent advances and future prospects. *Turkish Journal of Botany*, 37(1): 1-13.
- U.S. EPA, Environmental Protection Agency. 1999. Toxicological review of cadmium and compounds. Washington, D. C. 85 p.

- U.S. EPA, Environmental Protection Agency. 2009. Washington, D.C. Toxicological review of thallium and compounds. (15 de diciembre de 2015). Disponible en línea en: www.epa.gov/iris, consultado: febrero 11, 2016.
- Vachirapatama N, Jirakiattikul Y, Dicoski G, Townsend AT, Haddad PR. 2005. On-line preconcentration and sample clean-up system for the determination of vanadium as 4-(2-pyridylazo) resorcinol-hydrogen peroxide ternary complex in plant tissues by ion-interaction high performance liquid chromatography. *Analytica Chimica Acta*, 543: 70-76.
- Vachirapatama N, Jirakiattikul Y, Dicoski G, Townsend AT, Haddad PR. 2011. Effect of vanadium on plant growth and its accumulation in plants tissues. *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, 33(3): 255-261.
- Vachirapatama N, Jirakiattikul Y. 2008. Effect of vanadium on growth of Chinese green mustard (*Brassica campestris* ssp. *chinensis* var. *parachinensis*) under substrate culture. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 30(4): 427-431.
- Wang JF, Liu Z. 1999. Effect of vanadium on the growth of soybean seedlings. *Plant and Soil*, 216: 47-51.
- WHO. 1992a. Environmental Health Criteria 134. 1992. Cadmium. World Health Organization. International Programme on Chemical Safety. Ginebra, Suiza.
- WHO. 1992b. Environmental Health Criteria 135. Cadmium-Environmental Aspects. World Health Organization. International Programme on Chemical Safety, WHO. Ginebra, Suiza.
- WHO. 1996. Thallium. World Health Organization. International Programme on Chemical Safety (IPCS), Environmental Health Criteria 192, Ginebra.
- Wierzbicka M, Szarek-Lukaszewska G, Grodzinska K. 2004. Highly toxic thallium in plants from the vicinity of Olkusz (Poland). *Ecotox. Environ. Safe*, 59: 84-88.
- Xiao T, Guha J, Boyle D, Liu CQ, Zheng B, Wilson GC, Rouleau A, Chen J. 2004. Naturally occurring thallium: a hidden geoenvironmental health hazard? *Environ. Int.*, 30: 501-507. doi: 10.1016/j.envint.2003.10.004.
- Yang J, Teng Y, Wang J, Li J. 2011. Vanadium uptake by alfalfa grown in V-Cd-contaminated soil by pot experiment. *Biol. Trace Elem. Res.*, 142: 787-795.

CAPÍTULO I. CADMIO, TALIO Y VANADIO EN LA GERMINACIÓN Y CRECIMIENTO INICIAL DE TRES VARIEDADES DE CHILE

1.1. INTRODUCCIÓN

La germinación se define como el surgimiento y desarrollo del embrión de la semilla. El proceso inicia cuando la semilla que se encuentra en estado quiescente (inactivo), absorbe el agua necesaria para que suceda la rehidratación de proteínas y orgánulos celulares que activarán el metabolismo; mientras que, la síntesis de ácidos nucleicos y proteínas iniciarán la actividad enzimática que finalmente estimulará la emergencia de la radícula ([Herrera et al., 2006](#)).

Los bioensayos de germinación de semillas con metales pesados pueden ser un valioso indicador de fitotoxicidad ([Iannacone y Alvariño, 2005](#)). [Sobrero y Ronca \(2004\)](#) mencionan que el proceso de germinación es una etapa de gran sensibilidad donde la presencia de cualquier compuesto tóxico puede alterar la supervivencia y el desarrollo normal de la planta, además sugieren que es necesario evaluar el crecimiento y desarrollo de la radícula y del hipocótilo ya que éstos son indicadores que permiten observar efectos de inhibición o de retraso que pueden ocurrir sin que haya una alteración durante la germinación y que proporcionan información complementaria al estudio que se realiza.

En los últimos años se han incrementado los niveles de contaminación de suelos por metales pesados como consecuencia principal de la creciente actividad industrial. De

forma natural también es común encontrar estos elementos debido a que algunos son necesarios para el crecimiento de las plantas, mientras que otros no tienen ninguna función biológica conocida y pueden causar efectos adversos cuando se encuentran en concentraciones altas (Navarro-Aviñó *et al.*, 2007; Tangahu *et al.*, 2011).

Ruiz y Armenta (2012) reportan que el arsénico (As) interfiere con el proceso metabólico y disminuye la germinación de semillas y el crecimiento de las plantas. De igual manera Álvarez- Menéndez *et al.* (2006) han reportado que el mercurio (Hg) en forma de metilmercurio altera la capacidad de germinación del haba (*Vicia faba* L.).

Por su parte, Bae *et al.* (2016) reportan que al evaluar la germinación de semillas de *Ambrosia artemisiifolia*, *Coronilla varia*, *Lotus corniculatus* y *Trifolium arvense* expuestas a zinc (Zn), plomo (Pb), níquel (Ni), cobre (Cu) y cadmio (Cd), se tuvo inhibición significativa de la germinación en todas las especies.

En las especies halófitas *Atriplex halimus* y *Salicornia ramosissima* expuestas a diferentes concentraciones de Cu, manganeso (Mn), Ni y Zn, se ve afectado el porcentaje de germinación; sin embargo no se afecta la tasa de germinación en ambas variedades (Márquez-García *et al.*, 2013).

Asimismo, para el caso del Cd se reportó que en semillas de plantas ornamentales (*Tagetes erecta*, *Salvia splendens* y *Abelmoschus manihot*), a concentraciones de 0 a 50 mg L⁻¹ no se ve afectada la germinación; sin embargo, se presentaron efectos inhibitorios significativos en el crecimiento y en el peso en fresco de la raíz (Wang y Zhou, 2005). De igual forma, Aina *et al.* (2007) reportan que en plántulas de arroz concentraciones de 1 µM Cd, causan disminución en el crecimiento; mientras que, concentraciones por debajo de ésta estimulan el crecimiento.

Por otra parte, [Babić et al. \(2009\)](#) reportan que el talio (Tl) causa inhibición del crecimiento de plántulas en *Lemna minor* después de una bioacumulación de 2 µM. Asimismo se reporta la reducción en la longitud de la radícula en 67% en lechuga con concentraciones de Tl de 0.5 mg L⁻¹; en nabo, reducción del 57% con 2.5 mg Tl L⁻¹; en mijo, del 37% con 5 mg Tl L⁻¹; en todos los casos en comparación con el testigo ([Carlson, et al., 1991](#)). Por otra parte, [Yao et al. \(2008\)](#) reporta que en semillas de arroz (*Oryza sativa* L.) expuestas a Tl en un intervalo de concentración de 0.1 a 10 mg L⁻¹ no hay cambios significativos en la germinación; no obstante, a partir de 5 mg L⁻¹ se inhibe significativamente la longitud de la radícula. En dos variedades (Carmagnola y Ferimon) de marihuana (*Cannabis sativa*) establecidas en suelo, se evaluaron los efectos de dos dosis de Tl (15 y 30 mg kg⁻¹ de suelo); se observó fitotoxicidad por Tl, reflejada primero en una germinación pobre, posteriormente se presentó amarillamiento y necrosis de hojas pequeñas y crecimiento más lento que el testigo ([Di Candito et al., 2004](#)).

En el caso del vanadio (V), [Tham et al. \(2001\)](#) reportan que concentraciones de 50 a 100 µg mL⁻¹ disminuyen el porcentaje de germinación en soya, trigo, cebada y arroz, asimismo se reduce significativamente la biomasa total de las plántulas. Por otra parte se ha reportado que concentraciones de 2.5 mg V L⁻¹ reducen la longitud de radícula en nabo en 49%, en 42% en col y en 27% en lechuga ([Carlson et al., 1991](#)).

Por otra parte, entre los cultivos de mayor importancia en México se encuentra el chile (*Capsicum annuum* L.). La producción anual de chile en el 2015 fue de 2.2 millones de toneladas de fruto fresco, de las cuales se exportan cerca de 900 mil toneladas de chiles frescos, secos y en preparaciones a Canadá, Japón, Estados Unidos, Alemania y Gran Bretaña. Dicha producción se obtiene principalmente de Chihuahua, Sinaloa y Zacatecas

con una producción de 562, 556 y 348 mil toneladas por año respectivamente (SAGARPA, 2015).

En el contexto anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar los efectos de los metales pesados no esenciales Cd, Tl y V en parámetros de germinación y en el crecimiento radicular y de vástago de tres variedades de chile (*Capsicum annuum* L.) de importancia económica y social en México.

1.2. MATERIALES Y MÉTODOS

1.2.1. Material vegetal

Se utilizaron semillas híbridas de chile (*Capsicum annuum* L.) de las siguientes tres variedades:

- Jalapeño “Emperador” NUN 70030.
- Poblano “Capulín”, facilitado por el Dr. Higinio López Sánchez. Del Colegio de Postgraduados, campus Puebla, México.
- Serrano “Coloso” proporcionado por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Las Huastecas-CIRNE del Lote 2015-1.

1.2.2. Desinfección de semillas

Para evitar la presencia de patógenos, se remojaron las semillas en solución de hipoclorito de sodio al 2% (0.33 mL L⁻¹) durante 15 min, posteriormente se hicieron 6 enjuagues con agua destilada estéril.

1.2.3. Diseño de tratamientos y diseño experimental

Se realizaron nueve experimentos independientes, cada uno de ellos correspondiente a uno de los metales evaluados a tres concentraciones en cada variedad (**Cuadro 1.1**).

Cuadro 1.1. Experimentos realizados con sus respectivos tratamientos durante la fase de germinación de semillas.

| Variedad | Experimento uno | | | | Experimento cuatro | | | | Experimento siete | | |
|----------|--------------------------|----|----|--|-------------------------|----|----|--|---------------------------|----|----|
| Jalapeño | Cadmio (μM) | | | | Talio (μM) | | | | Vanadio (μM) | | |
| | 0 | 25 | 50 | | 0 | 25 | 50 | | 0 | 25 | 50 |
| Variedad | Experimento dos | | | | Experimento cinco | | | | Experimento ocho | | |
| Poblano | Cadmio (μM) | | | | Talio (μM) | | | | Vanadio (μM) | | |
| | 0 | 25 | 50 | | 0 | 25 | 50 | | 0 | 25 | 50 |
| Variedad | Experimento tres | | | | Experimento seis | | | | Experimento nueve | | |
| Serrano | Cadmio (μM) | | | | Talio (μM) | | | | Vanadio (μM) | | |
| | 0 | 25 | 50 | | 0 | 25 | 50 | | 0 | 25 | 50 |

Se utilizaron cloruro de cadmio (CdCl_2 , CAS 10108-64, Sigma Aldrich), acetato de talio (CH_3COOTl , CAS 563-68-5 Sigma Aldrich), metavanadato de amonio (NH_4VO_3 , CAS 7803-55-6, Alfa Aesar), como fuentes de Cd, Tl y V, respectivamente.

Cada tratamiento tuvo cuatro repeticiones. La unidad experimental consistió en una caja Petri con 10 semillas. Las cajas Petri se distribuyeron completamente al azar dentro de una cámara de germinación (Thermo scientific, modelo 310M, USA) a 32 °C donde se mantuvieron debidamente hidratadas con la solución correspondiente al tratamiento asignado, durante 15 días.

1.2.4. Variables evaluadas

1.2.4.1. Porcentaje de germinación (PG), es el porcentaje real de todas las semillas que han germinado durante el ensayo. Esta variable se midió durante 15 días a intervalos de 24 h.

Después de 15 días de incubación de las semillas se realizaron las determinaciones de las siguientes variables:

1.2.4.2. Índice de germinación (IG), se estimó empleando la siguiente fórmula

$$IG = \frac{PRG \times CRR}{(100)}$$

Donde: **PRG**= Porcentaje relativo de germinación. Es el porcentaje de semillas germinadas en el tratamiento con respecto al control.

CRR= Es el crecimiento relativo de radícula.

1.2.4.3. Coeficiente de velocidad de germinación (CVG), se calculó empleando la fórmula:

$$CVG = \frac{\text{Número total de semillas germinadas por caja Petri}}{A_1T_1 + A_2T_2 + A_xT_x}$$

Donde: **A**= El número de semillas emergidas en un número de días en particular, los números **1, 2, ... X** son el número respectivo de semillas germinadas por cada respectivo día después del inicio de la incubación.

1.2.4.4. Longitud de radícula (LR) y longitud de vástago (LV). Se midió con una regla de 20 cm la longitud de la radícula y la longitud del vástago.

1.2.4.5. Peso fresco de plántulas (PFP). El peso individual de cada plántula se determinó usando una balanza analítica (OHAUS, modelo Adventurer Pro AV213C, USA).

1.2.4.6. Peso seco de plántulas (PSP). Las plántulas fueron secadas en una estufa de aire forzado (Riossa, modelo HCF-125, México) por 48 h a 70 °C. Posteriormente se pesaron nuevamente en una balanza analítica (OHAUS, modelo Adventurer Pro AV213C, USA).

1.2.5. Análisis estadístico

Con los resultados obtenidos se realizaron análisis de varianza y pruebas de comparación de medias (LSD, $P \leq 0.05$), éstos independientes para cada metal y variedad, usando el software SAS ([SAS, 2011](#)).

1.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los tres experimentos son presentados de manera conjunta por variable. De esta manera es posible evidenciar de manera más clara los efectos de cada uno de los metales en las variables evaluadas en las tres variedades de Chile.

1.3.1. Porcentaje de germinación (PG)

El porcentaje de germinación de semillas de las tres variedades de chile evaluadas no fue afectado de manera significativa por los tratamientos con Cd, TI y V (**Figura 1.1**).

En plantas superiores el Cd es un elemento conocido por inhibir la germinación de la semillas y el crecimiento de raíces, e induce aberraciones cromosómicas y formación de micro núcleos (Aslam *et al.*, 2014). Las semillas de chile Jalapeño tratadas con Cd (25 y 30 μM) presentaron una media de porcentaje de germinación de 96.3%, mientras que en el testigo fue de 97.5% (**Figura 1.1a**). Khan y Moheman (2006) evaluaron los efectos de Cd^{2+} en la germinación de semillas de *Capsicum frutescens*, concluyeron que en esta especie este metal pesado es fitotóxico en el intervalo de 75 a 600 mg kg^{-1} de suelo; si bien estas concentraciones son superiores a las aquí evaluadas, debe considerarse que el suelo tiene capacidad amortiguadora que reduce en gran medida la disponibilidad de este elemento; sin embargo, los efectos negativos del Cd han sido reportados solo cuando éste se abastece a altas concentraciones, que es cuando ocasiona estrés oxidativo (Kranner y Colville, 2011).

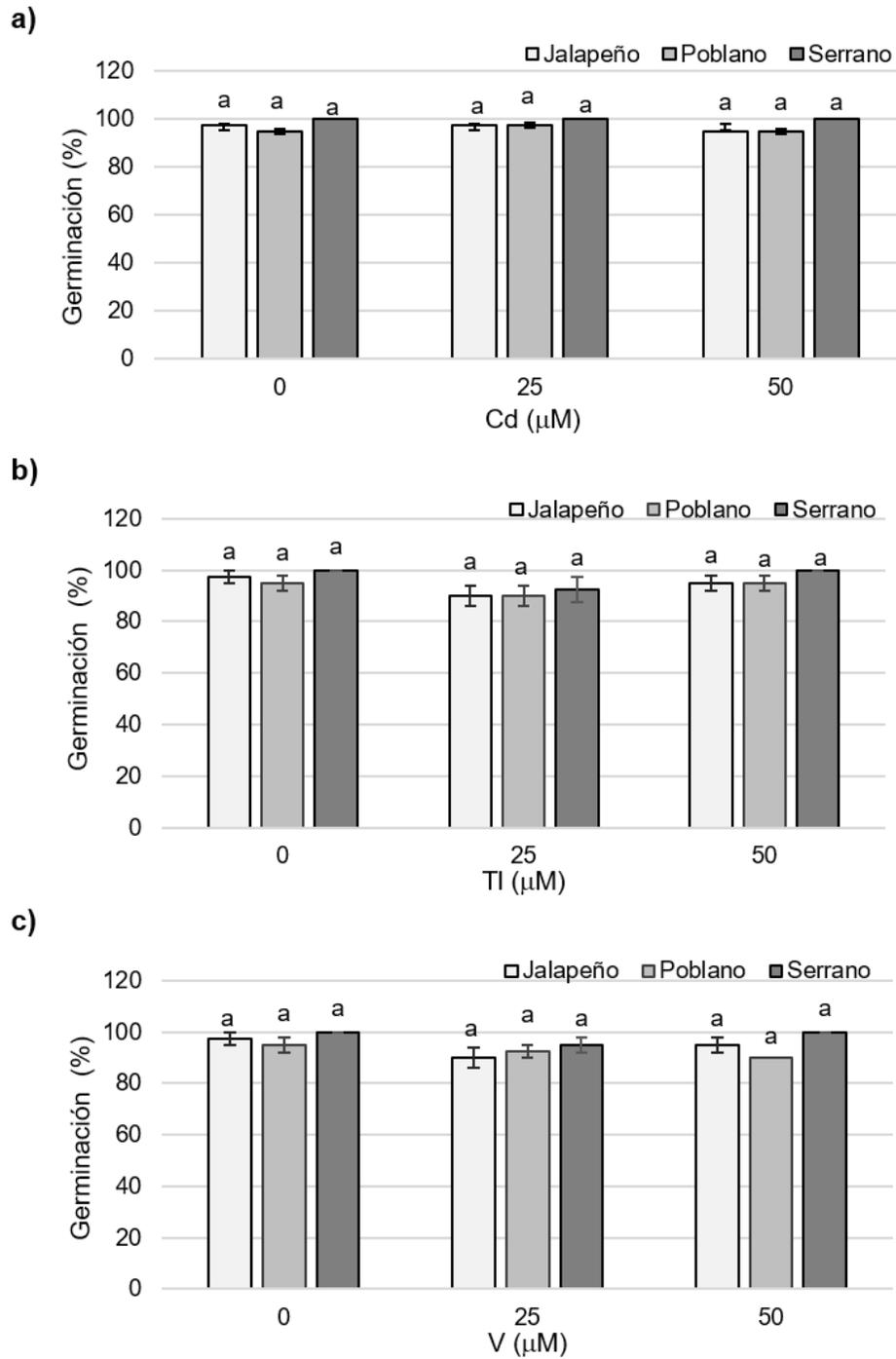


Figura 1.1. Porcentaje de germinación de semillas de tres variedades de chile tratadas con Cd (a), TI (b) y V (c). Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad por subfigura indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

Las semillas de Poblano tratadas con Cd tuvieron un promedio de germinación del 96.3%, mientras que en el testigo fue de 95%. En el caso del chile Serrano, sus semillas mostraron una germinación 100%, tanto en el testigo como con las dos concentraciones de Cd evaluadas (**Figura 1.1a**). El alto porcentaje de germinación de las tres variedades de chile contrasta con lo reportado para otras especies, ya que con la concentración más baja utilizada (25 μM), en acelga, lechuga y espinaca, la germinación se vio afectada en 46, 97 y 8%, respectivamente ([Bautista et al., 2013](#)). Así mismo los tratamientos de 10, 30, 50, 70 y 90 $\mu\text{mol Cd L}^{-1}$ disminuyeron la germinación de semillas de *Albizia lebbbeck* L., en comparación con el testigo, este resultado es debido posiblemente a la degradación acelerada de sustancias alimenticias almacenadas en las semillas ([Farooqi et al., 2009](#)).

Como se observa en la **Figura 1.1b** las tres variedades tratadas De manera interesante, en las tres variedades tratadas con TI, a pesar de no existir diferencias estadísticas significativas, se observaron los menores porcentajes de germinación con la concentración de 25 μM , con decrementos del orden de 7.7, 5.3 y 7.5% en las variedades Jalapeño, Poblano y Serrano, respectivamente, en comparación con sus respectivos testigos. Con la dosis alta de TI (50 μM), el porcentaje de germinación registrado en las variedades Poblano y Serrano fue el mismo que en los testigos de éstas (**Figura 1.1b**). [Yao et al. \(2008\)](#) reportan que en semillas de arroz (*Oryza sativa* L.), el tratamiento con TI en el intervalo 0.1 a 10 mg L^{-1} no tuvo influencia en la germinación de las semillas. Infortunadamente en la literatura los reportes acerca del efecto del TI en la germinación son escasos.

En este caso se observa que el usar una concentración de 25 μM de V la reducción en la germinación fue de 7.5, 2.5 y 5% en las variedades Jalapeño, Poblano y Serrano, respectivamente, en comparación con los testigos (**Figura 1.1c**). Los estudios del efecto del V en la germinación son escasos y los existentes se han realizado en gran medida en cereales. En centeno y trigo se demostró que el tratamiento con 0.1 μM de vanadato tuvo efectos leves en la germinación de semillas ([Kasai et al., 1999](#)). Contrario a lo aquí observado, [Zhao et al. \(2007\)](#) refieren que en dos tipos de arroz (*Oryza sativa* L.), el V en bajas concentraciones aceleró la germinación; mientras que, ésta fue inhibida a una concentración alta. Semillas de garbanzo incubadas durante 6 días con soluciones de NaVO_3 de 410 a 1640 μM , presentaron un porcentaje de germinación superior al 99% ([Zhang et al., 2012](#)).

1.3.2. Porcentaje relativo de germinación (PRG)

El porcentaje relativo de germinación de semillas de las tres variedades en estudio no fue afectado de manera significativa por los tratamientos con Cd, TI y V (**Figura 1.2**).

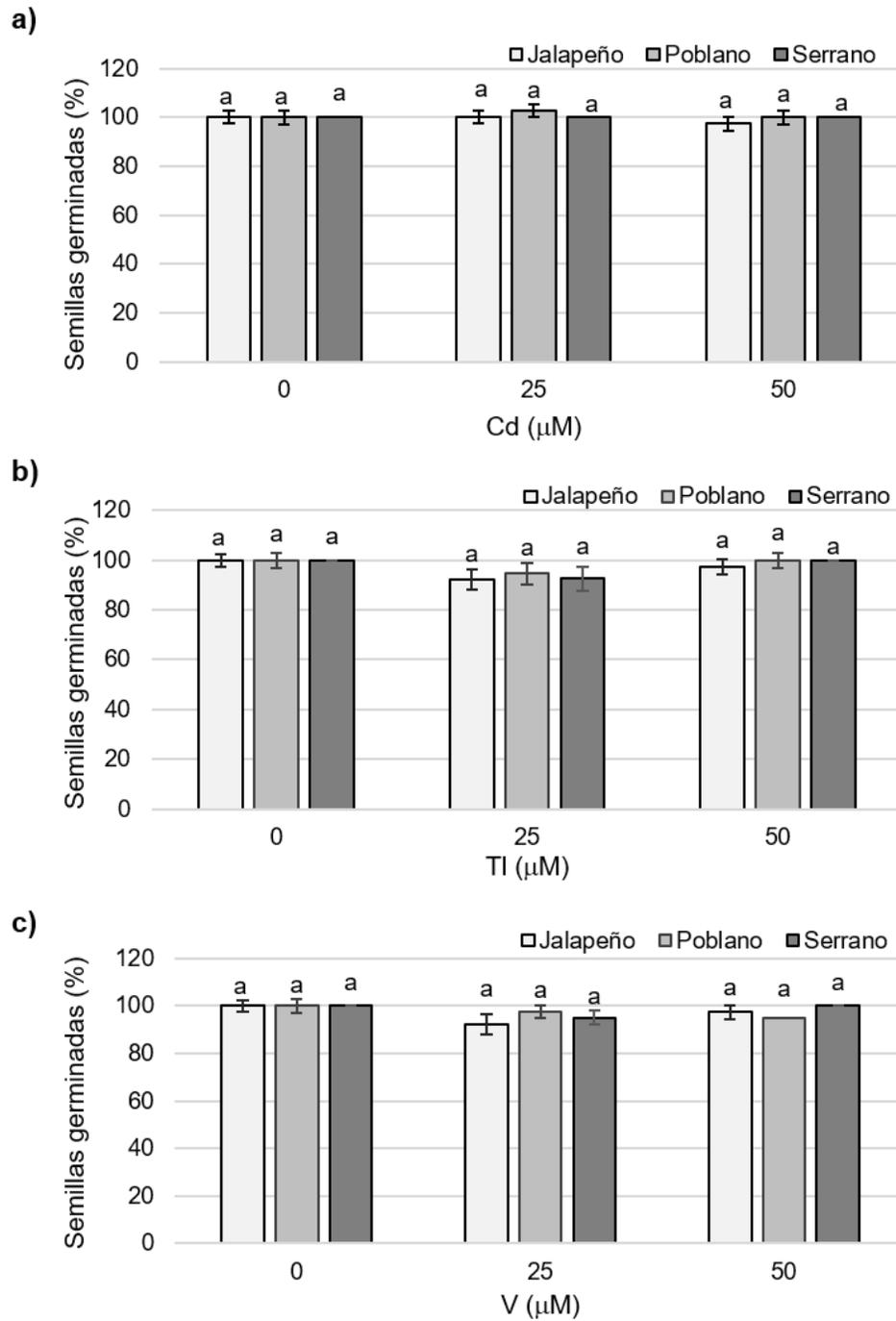


Figura 1.2. Porcentaje relativo de germinación de semillas de tres variedades de chile tratadas con Cd (a), TI (b) y V (c). Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad por subfigura indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

Las semillas de chile Jalapeño tratadas con Cd presentaron una media de porcentaje relativo de germinación de 98.7%. Las semillas de Poblano y Serrano tratadas con Cd al presentaron 100% de germinación relativa (**Figura 1.2a**). El efecto que produce el Cd a 250 μM en el porcentaje de germinación de semillas de trigo es inhibitorio (30%) en la variedad Galaxy y del 25% en la variedad NARC-11 ([Idrees et al., 2015](#)). También, se reporta que concentraciones de Cd entre 1 y 6 mg L^{-1} (8.9 a 53.4 μM) inhiben de 18 a 88% el porcentaje de germinación en romerito ([Liu et al., 2012](#)).

Por otra parte, en las tres variedades de chile tratadas con TI no existen diferencias significativas, sin embargo existe un menor porcentaje relativo de germinación en la concentración de 25 μM , con decrementos de 7.6, 5.2 y 7.5% en las variedades Jalapeño, Poblano y Serrano respectivamente. Mientras que a dosis alta de (50 μM) de TI el porcentaje relativo de germinación registrado en las variedades Poblano y Serrano fue el mismo que en los testigos, sin embargo para la variedad de Jalapeño si existe una disminución del 2.5% con respecto al testigo (**Figura 1.2b**). En la literatura no existen reportes de estudio que evalúan el efecto del TI en semillas.

En el caso de las variedades de semillas tratadas con V no se observaron diferencias estadísticas significativas en el porcentaje relativo de germinación; sin embargo, existe un decremento en esta variable de 7.6, 2.6 y 5% en Jalapeño, Poblano y Serrano, respectivamente, cuando son tratadas con 25 μM V. Mientras que, con la dosis alta de V (50 μM) se presenta una reducción en el porcentaje relativo de germinación de 2.5 y 5.2% en las variedades de Jalapeño y Poblano. Estos resultados evidencian que de manera general, el V aún suministrado a bajas concentraciones, reduce en mayor proporción el porcentaje relativo de germinación (**Figura 1.2c**). Los estudios del efecto

del V en la germinación son escasos, sin embargo se reporta que este elemento inhibe el porcentaje de germinación de semillas de trigo, cebada, arroz y soya es reducido en 52, 65, 4 y 6%, respectivamente, cuando éstas son tratadas con 50 $\mu\text{g V mL}^{-1}$; y con el tratamiento de 100 $\mu\text{g mL}^{-1}$ el porcentaje de germinación relativa se redujo en 90, 85, 5, y 6%, respectivamente (Tham *et al.*, 2001).

1.3.3. Índice de germinación (IG)

El IG de semillas de las variedades Jalapeño y Serrano no fue afectado de manera significativa cuando se trataron con Cd; por el contrario, en la variedad Poblano este indicador fue reducido de manera significativa cuando las semillas se trataron con ambas concentraciones de Cd (**Figura 1.3a**). El efecto del Cd observado en la variedad Poblano, es similar al reportado en *Suaeda salsa*, donde el IG disminuyó significativamente con la dosis de 0.1 mg Cd L⁻¹ (Liu *et al.*, 2012). Así mismo, en semillas de *Albizia lebbbeck* L., la germinación de semillas mostró una disminución gradual con el aumento de la concentración de Cd (10 a 90 $\mu\text{mol L}^{-1}$), en comparación con el testigo (Farooqi *et al.*, 2009).

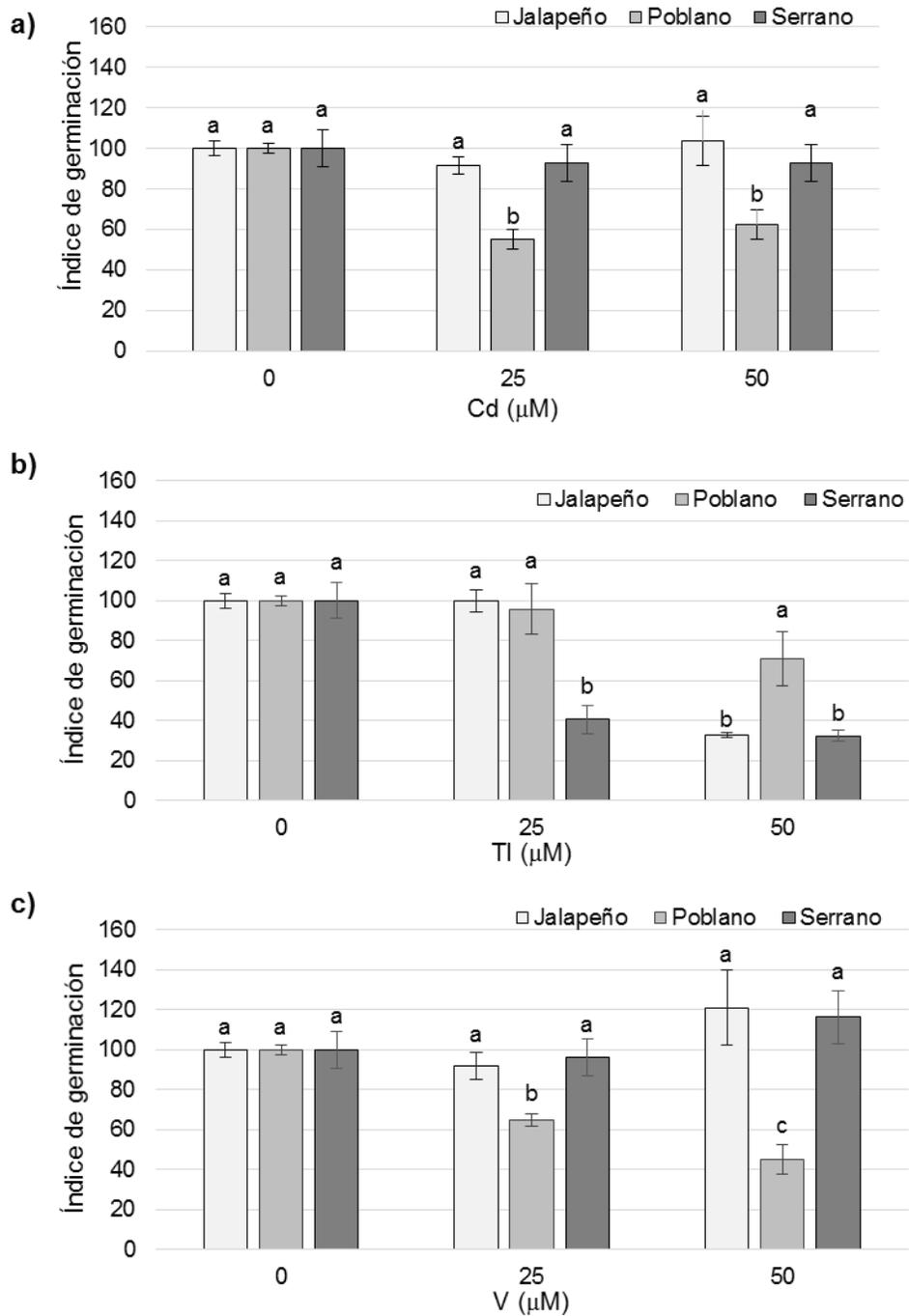


Figura 1.3. Índice de germinación (IG) de semillas de tres variedades de chile tratadas con Cd (a), TI (b) y V (c). Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad por subfigura indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

Las semillas de las variedades Jalapeño y Serrano mostraron susceptibilidad diferencial al TI; en Jalapeño el tratamiento con 50 μM TI redujo el índice de germinación a 32.7%; mientras que en Serrano el tratamiento con 25 y 50 μM TI ocasionó índices de germinación de solo 40.7 y 32.3%, respectivamente. Por el contrario, el TI no afectó el índice de germinación de las semillas de chile Poblano (**Figura 1.3b**).

En las variedades Jalapeño y Serrano, el índice de germinación no fue afectado de manera significativa cuando las semillas fueron tratadas con V. Sin embargo, la concentración alta de V (50 μM) incremento ligeramente el índice de germinación con respecto al testigo en un (21 y 16.2% en Jalapeño y Serrano, respectivamente); por el contrario, la concentración baja de V (25 μM) redujo ligeramente los índices de germinación (8 y 4% en Jalapeño y Serrano, respectivamente con respecto al testigo). En la variedad Poblano, los índices de germinación fueron reducidos de manera significativa con el tratamiento con 25 y 50 μM , con valores de 64.8 y 45.1%, respectivamente (**Figura 1.3c**).

El índice de germinación es usado en diversos estudios como un indicador de fitotoxicidad. Los valores del IG menores al 50% indican una alta fitotoxicidad; valores oscilando entre 50 y 80% sugieren una fitotoxicidad moderada; mientras que valores superiores a 80 y menores 100% indican que no existe fitotoxicidad. Si el valor del IG excede el 100%, se considera que el material o tratamiento empleado es un fitonutriente o bien un fitoestimulante ([Emino y Warman, 2004](#)). En este contexto, el Cd solo fue moderadamente fitotóxico en las concentraciones ensayadas en la variedad Poblano; el TI fue altamente fitotóxico en la variedad Serrano. El V tuvo efectos diferenciales entre variedades; en Jalapeño y Serrano actuó como un bioestimulante; por

el contrario en la variedad Poblano, el V tuvo efectos moderadamente tóxicos y altamente tóxicos cuando se suministró a concentraciones de 25 y 50 μM , respectivamente.

1.3.4. Coeficiente de velocidad de germinación (CVG)

El coeficiente de velocidad de germinación de las variedades Jalapeño, Poblano y Serrano presenta diferencias significativas con respecto a su testigo cuando son tratadas con Cd, TI y V (**Figura 1.4**).

En las semillas de chile Serrano, el CVG fue afectado por el Cd de manera significativa. Las concentraciones de 25 y 50 μM de Cd redujeron en 19.2 y 18.4%, respectivamente, en comparación con el testigo (**Figura 1.4a**).

Con respecto a las variedades tratadas con TI, se observó que con la dosis (25 μM), el CVG disminuyó Jalapeño y Serrano en 7.1 y 15.5% respectivamente, comparado con los testigos de cada variedad. En el caso de la dosis alta de 50 μM de TI, el CVG presenta una disminución de 14.2 y 12.1% en las variedades Jalapeño y Serano, respectivamente en comparación con el testigo; estas reducciones fueron significativas. En la variedad Poblano, el tratamiento con TI no afectó el CVG en ninguna de las dos dosis utilizadas (**Figura 1.4b**).

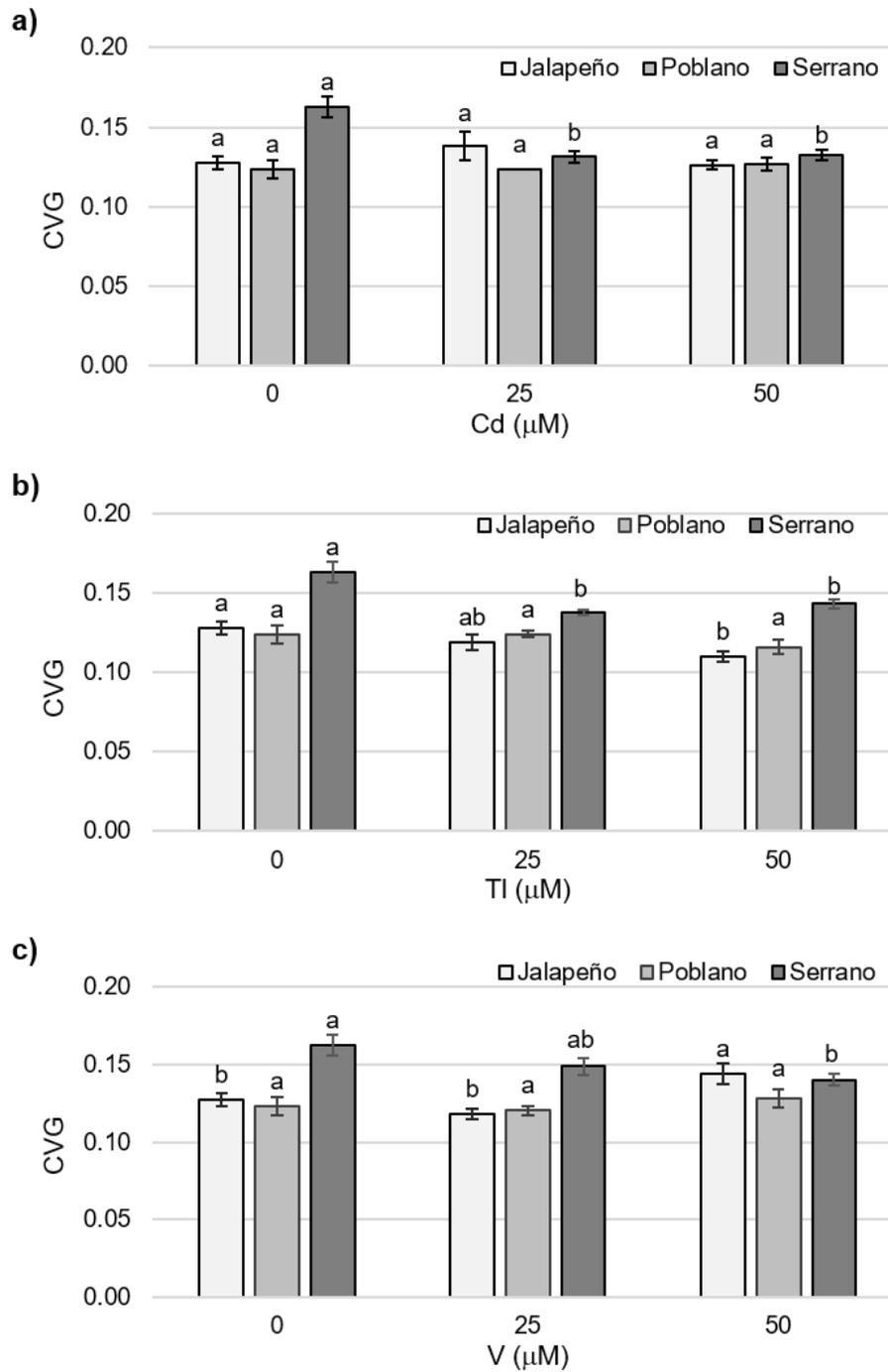


Figura 1.4. Coeficiente de velocidad de germinación (CVG) de semillas de tres variedades de chile tratadas con Cd (a), TI (b) y V (c). Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad por subfigura indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

El efecto del V en las variedades de chile evaluadas afectó de manera diferencial el CVG. En la variedad Poblano, el V no afectó los CVG de las semillas. En las semillas de Jalapeño, Poblano y Serrano tratadas con V se observó que a dosis bajas de 25 μM el CVG disminuye en 7.4, 2.4 y 8.5%, respectivamente comparado con sus testigos; sin que estas reducciones sean significativas. Por otra parte, con la dosis de V (50 μM), el CVG presenta un aumento significativo del orden de 22% en las semillas de la variedad Jalapeño en comparación con el testigo (**Figura 1.4c**).

La velocidad de emergencia es de suma importancia dado que define el tiempo de instalación en el campo de las plántulas provenientes de semilleros o viveros ([Sobrevilla-Solis et al., 2013](#)). El CVG es un indicador que permite definir si la germinación de una semilla es lenta o rápida. Los valores de CVG oscilan de 0 a 1, que corresponden a la no germinación y a rápida germinación, respectivamente ([Sánchez et al., 2015](#)). Asimismo, es importante considerar que el CVG es el recíproco del tiempo promedio de germinación ([Ranal y García, 2006](#)), y por tanto es independiente del porcentaje de germinación final ([Kader, 2005](#)). En este sentido se concluye que cuando las semillas no son tratadas con los metales (Cd, TI y V), el tiempo de germinación tiene el orden siguiente: Serrano < Jalapeño < Poblano; lo que indica que las semillas de la variedad Poblano tardaron mayor tiempo en germinar que las semillas de las otras dos variedades. Asimismo, los resultados muestran que el coeficiente de la velocidad de germinación de las semillas de Jalapeño no fue afectado por los tratamientos con Cd; el TI la retrasó y el V la incrementó. La velocidad de germinación de las semillas de Poblano no fue influenciada por Cd, TI y V. Por el contrario, la variedad Serrano fue más sensible a los metales, al reducirse significativamente el CVG en presencia de éstos.

1.3.5. Longitud de radícula

La longitud de radícula de las tres variedades de chile evaluadas y tratadas con Cd, TI y V fue estadísticamente diferente (**Figura 1.5**).

Las plántulas de chile Jalapeño y Serrano tratadas con ambas concentraciones de Cd no presentaron cambios significativos en la longitud de radícula en comparación con el testigo. Por el contrario, la longitud de la radícula de la variedad Poblano se vio severamente afectada con las concentraciones de 25 y 50 μM Cd, se observaron reducciones del 46 y 38%, respectivamente, en comparación con el testigo (**Figura 1.5a**).

Estudios sobre el efecto del Cd en la germinación reportan que concentraciones de 10, 30, 50, 70 y 90 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de este elemento provocan reducción significativa del crecimiento de raíces de *Albizia lebbbeck* L. al compararlo con el grupo testigo. Esto puede deberse a la afectación del metabolismo celular de las raíces, ocasionando una reducción en la formación de nuevas células y en la elongación de la región de crecimiento de la raíz ([Farooqi et al., 2009](#)).

Los tratamientos con TI no afectaron de manera significativa la longitud de radícula en plántulas de la variedad Poblano. Por otra parte, las plántulas de chile Jalapeño tuvieron inhibición significativa en el crecimiento de su radícula solo con la concentración alta de TI (50 μM), con decrementos del 66.2%. La variedad más sensible al TI considerando la longitud de la radícula fue la de Serrano, que mostró inhibiciones significativas en el crecimiento de la radícula, que se relacionaron de manera positiva con la dosis de TI; siendo éstas del orden de 56.6 y 67.7% con 25 y 50 μM TI, en comparación con el testigo (**Figura 1.5b**). Este efecto se reporta en col, lechuga, mijo, rábano, nabo y trigo tratados con soluciones de 0 a 40 mg L^{-1} de TI y V, donde se encontró que el TI y V causan

reducción en la elongación de la raíz (Carlson *et al.*, 1991). Así mismo se reporta que concentraciones de TI de 510 mg L⁻¹ disminuyen significativamente la longitud de la radícula y el eje embrionario de semillas de *Oryza sativa* L. (Yao *et al.*, 2008).

Los tratamiento con V ocasionaron tendencias crecientes en longitud de radícula de plántulas de las variedades Jalapeño y Serrano; sin embargo estos incrementos no son significativos desde el punto de vista estadístico. En el caso de la variedad Poblano, se observaron efectos negativos del tratamiento con V, al reducirse la longitud de la radícula en 33.3 y 52.3% cuando recibieron las dosis de 25 y 50 µM, respecto al testigo (**Figura 1.5c**).

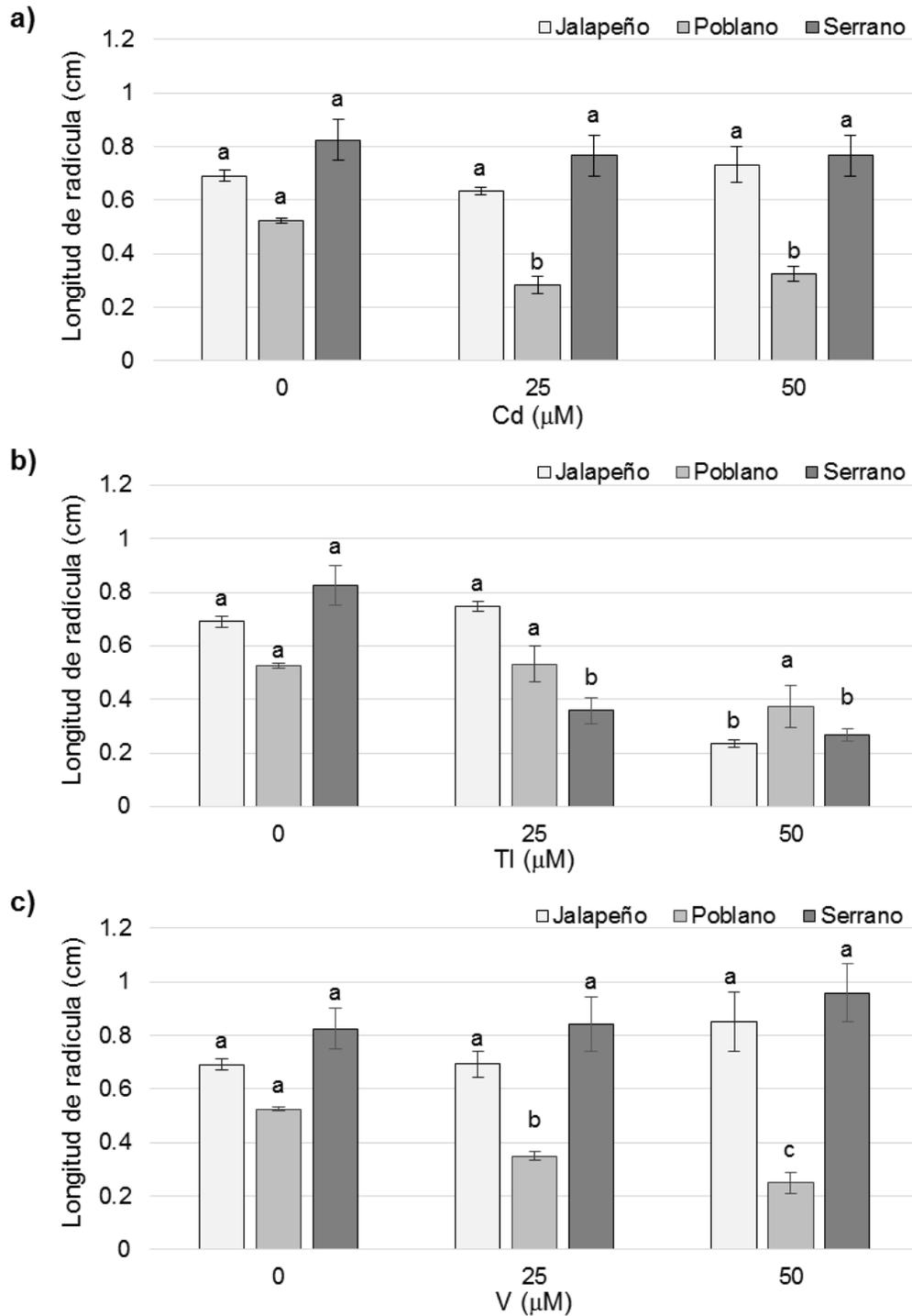


Figura 1.5. Longitud de radícula de plántulas obtenidas a partir de semillas de tres variedades de chile tratadas con Cd (a), TI (b) y V (c). Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad por subfigura indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

1.3.6. Longitud de vástago

La longitud de vástago de las variedades evaluadas es estadísticamente diferente a sus testigos respectivos, cuando son tratadas con Cd, TI y V (**Figura 1.6**).

El Cd no tuvo efecto en la longitud de vástago de las variedades Jalapeño y Serrano. Mientras que, el crecimiento del vástago en la variedad Poblano fue estimulado con la aplicación de Cd a dosis de 25 y 50 μM en 67.7 y 96.8%, respectivamente, en comparación con el testigo (**Figura 1.6a**). En contraste con lo anterior, se reporta que tratamientos de 10 a 90 $\mu\text{mol Cd L}^{-1}$ afectan el crecimiento de las plántulas de *Albizia lebbek L.*, en comparación con su grupo testigo ([Farooqi et al., 2009](#)). Por otra parte se reporta que tratamientos de 0.25 mM Cd inhiben significativamente el crecimiento de la plúmula de semillas de *Pisum sativum* ([Chugh y Sawhney, 1996](#)).

El TI afectó de manera diferencial la longitud de vástago en las tres variedades de Chile. En las variedades Jalapeño y Poblano, el tratamiento con 25 $\mu\text{M Cd}$ estimuló el crecimiento del vástago en 46.2 y 31.2%, respectivamente, en comparación con los testigos respectivos.

Por el contrario, el TI en las dos concentraciones suministradas redujo de manera significativa el crecimiento de parte aérea de las plántulas de Chile Serrano; estas reducciones fueron de 61.2% con 25 $\mu\text{M TI}$ y de 65.5% con 50 $\mu\text{M TI}$, en ambos casos respecto al testigo (**Figura 1.6b**). [Siegel y Siegel \(1976\)](#) reportan reducción y sensibilidad del epicótilo e hipocótilo en plántulas de pepino al ser expuestas a 10 mM TI, sugiriendo que los procesos de desarrollo dependientes de la división celular pueden ser más sensibles al TI que los que implican la ampliación y diferenciación celular.

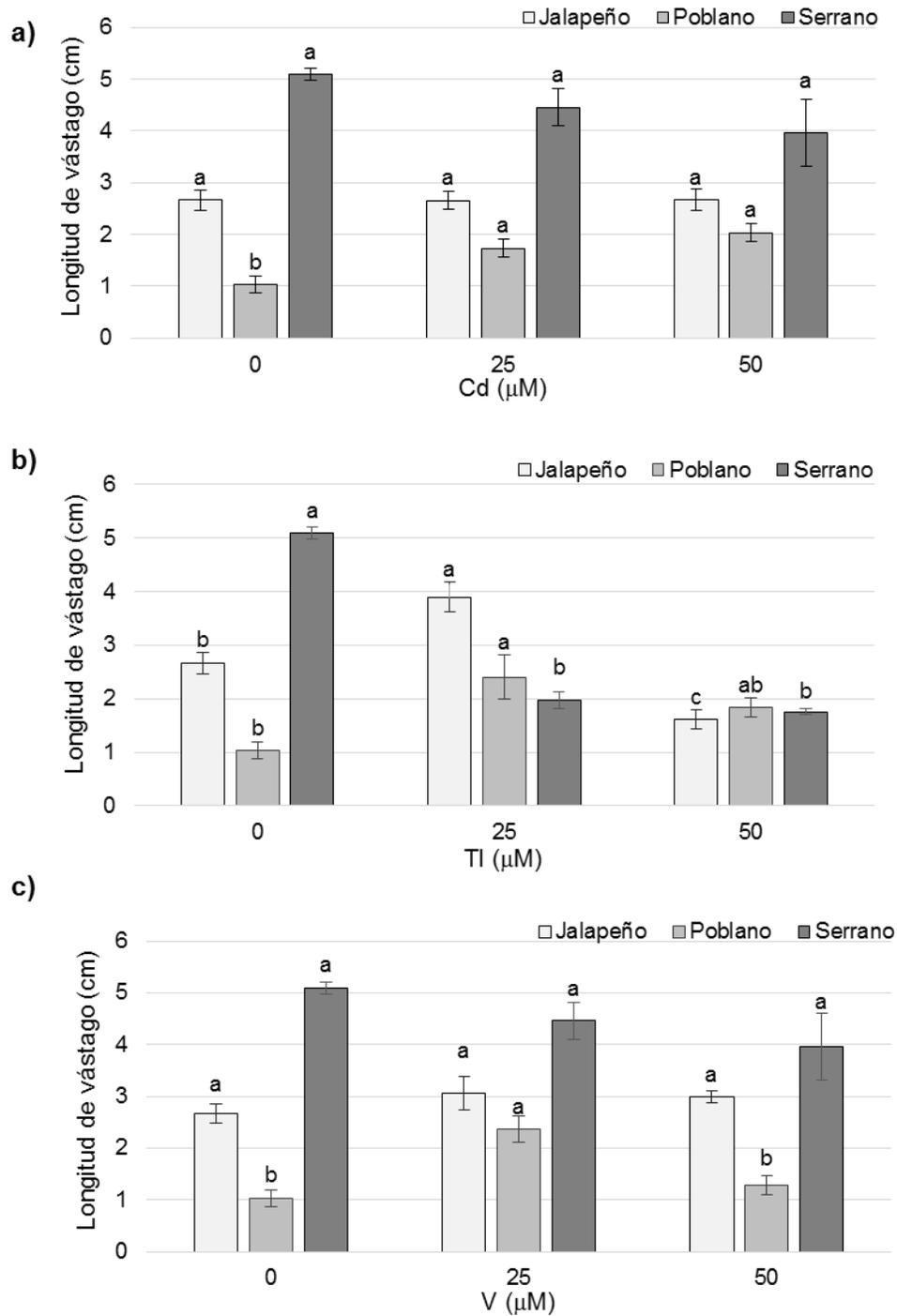


Figura 1.6. Longitud de vástago de plántulas de semillas de tres variedades de chile tratadas con Cd (a), TI (b) y V (c). Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad por subfigura indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

En las semillas tratadas con V, no se encontraron diferencias significativas en la longitud de vástago de las variedades Jalapeño y Serrano. Por el contrario, en chile Poblano con la dosis de 25 μM la longitud de vástago fue mayor en 56.3% a aquella registrada en el testigo, y superior en 45.8% al tratamiento con 50 μM V (**Figura 1.6c**).

1.3.7. Crecimiento relativo de radícula (CRR)

El crecimiento relativo de radícula fue afectado por el suministro de Cd solo en la variedad Poblano; donde ambas dosis de este elemento lo redujeron de manera significativa; en promedio el CRR con los tratamientos con 25 y 50 μM Cd fue 57.9% en cada uno (**Figura 1.7a**).

En la variedad Jalapeño, el CRR fue menor al 40% con el tratamiento de 50 μM TI; mientras que en la variedad Serrano las concentraciones de 25 y 50 μM de TI, el CRR fueron menores al 50 y 40%, respectivamente. En la variedad Poblano se observa que el TI reduce ligeramente el CRR, pero dichas reducciones no son significativas (**Figura 1.7b**).

En semillas tratadas con V, solamente se observaron diferencias estadísticas significativas en el valor del CRR en la variedad Poblano, registrándose decrementos del 33.3 y 52.3% con la dosis 25 μM y 50 μM , respectivamente; lo anterior indica que el efecto que provoca el V es más severo en esta variedad debido a que presenta mayor susceptibilidad a dicho elemento (**Figura 1.7c**).

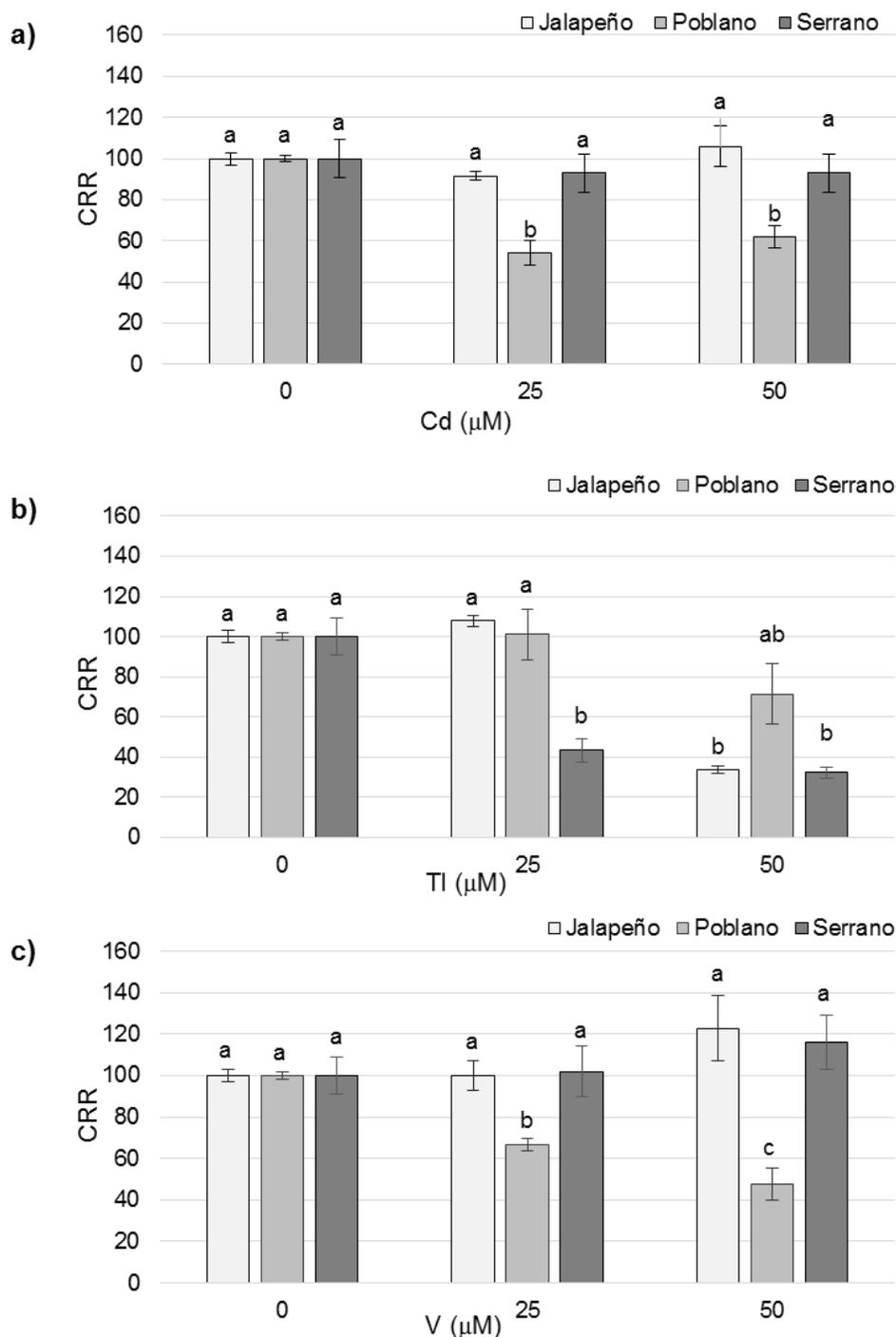


Figura 1.7. Crecimiento relativo de radícula (CRR) de plántulas obtenidas de semillas de tres variedades de chile tratadas con Cd (a), TI (b) y V (c). Medias \pm DE con letras distintas en cada variedad por subfigura indican que existen diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

1.3.8. Peso fresco de plántula (PFP)

Las plántulas provenientes de semillas de chile Jalapeño tratadas con 25 y 50 μM de Cd presentaron una disminución en su peso fresco de 5 y 1 % con respecto a la media del testigo; sin que estas reducciones sean significativas. Asimismo, las plántula de chile Poblano tratadas con 25 y 50 μM de Cd presentaron una disminución en el peso fresco de 4.1 y 7.2 % con respecto a la media del testigo, pero no existieron diferencias estadísticas significativas. Por otra parte, solo en la variedad Serrano los efectos ocasionados por el tratamiento con Cd fueron significativos en esta variable; el Cd en concentraciones de 25 y 50 μM redujo el peso de la biomasa fresca de plántula en 18.6% en ambas concentraciones con respecto a la media del testigo (**Cuadro 1.2.**).

Cuadro 1.2. Peso de biomasa fresca de plántulas provenientes de semillas de tres variedades de chile tratadas con Cd.

| Variedad | Jalapeño | Poblano | Serrano |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Cd (μM) | g por plántula | | |
| 0 | 0.033 \pm 0.0006 a | 0.024 \pm 0.0013 a | 0.044 \pm 0.0036 a |
| 25 | 0.031 \pm 0.0008 a | 0.023 \pm 0.0016 a | 0.036 \pm 0.0019 b |
| 50 | 0.032 \pm 0.0040 a | 0.022 \pm 0.0014 a | 0.036 \pm 0.0019 b |

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

En las tres variedades de chile tratadas con TI, se presentan diferencias estadísticas significativas en el peso de biomasa fresca de plántulas como se muestra en el **Cuadro**

1.3. Se observa que la dosis de 25 μM reduce en 44.7, 11.7 y 61.2% el peso en fresco de las plántulas de Jalapeño, Poblano y Serrano, respectivamente, en comparación con los testigos respectivos. Con la dosis alta de TI (50 μM) la reducción en las biomásas frescas son del orden de 52.9, 22 y 58.2% en las variedades Jalapeño Poblano y Serrano, respectivamente, comparado con la media de los testigos (**Cuadro 1.3.**).

Cuadro 1.3. Peso de biomasa fresca de plántulas provenientes de semillas de tres variedades de chile tratadas con TI.

| Variedad | Jalapeño | Poblano | Serrano |
|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| TI (μM) | g por plántula | | |
| 0 | 0.033 \pm 0.0006 a | 0.024 \pm 0.0013 a | 0.044 \pm 0.0036 a |
| 25 | 0.018 \pm 0.0004 b | 0.021 \pm 0.0012 ab | 0.017 \pm 0.0017 b |
| 50 | 0.015 \pm 0.0006 c | 0.019 \pm 0.0018 b | 0.019 \pm 0.0039 b |

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

Las biomásas secas de plántulas de las tres variedades de chile en función de la concentración de V se presentan en el **Cuadro 1.4.**

Cuadro 1.4. Peso de biomasa fresca de plántulas provenientes de semillas de tres variedades de chile tratadas con V.

| Variedad | Jalapeño | Poblano | Serrano |
|-------------------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| V (μM) | g por plántula | | |
| 0 | 0.033 \pm 0.0006 a | 0.024 \pm 0.0013 a | 0.044 \pm 0.0036 a |
| 25 | 0.035 \pm 0.0048 a | 0.023 \pm 0.0024 a | 0.030 \pm 0.0019 b |
| 50 | 0.034 \pm 0.0018 a | 0.016 \pm 0.0009 b | 0.032 \pm 0.0038 b |

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

El peso de la biomasa seca de plántulas de chile Jalapeño no fue afectado de manera significativa por los tratamientos con V. La dosis de 25 μM de V presentó decremento en el peso de biomasa seca de plántula en 5.1 y 32.3% en las variedades Poblano y Serrano, respetivamente. Este efecto negativo del V también se observa con la dosis de (50 μM) donde en Poblano y Serrano se registraron reducción de 34.1 y 28.5% en el peso de biomasa fresca de plántula, respectivamente, comparados todos con la media de sus testigos. (**Cuadro 1.4**).

1.3.9. Peso seco de plántula

El peso seco de plántula no fue afectado por los tratamientos con Cd en las variedades Poblano y Serrano. En la variedad Jalapeño, se observó un efecto positivo de este elemento en la dosis de 50 μM al incrementar el peso de biomasa seca en 30.9%, respecto al testigo (**Cuadro 1.5**).

Cuadro 1.5. Peso de biomasa seca de plántulas provenientes de semillas de tres variedades de chile tratadas con Cd.

| Variedad | Jalapeño | Poblano | Serrano |
|--------------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Cd (μM) | g por plántula | | |
| 0 | 0.0039 \pm 0.0004 b | 0.0040 \pm 0.0003 a | 0.0031 \pm 0.0001 a |
| 25 | 0.0047 \pm 0.0001 ab | 0.0039 \pm 0.0003 a | 0.0035 \pm 0.0001 a |
| 50 | 0.0051 \pm 0.0003 a | 0.0042 \pm 0.0002 a | 0.0030 \pm 0.0002 a |

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

Los pesos de biomasa seca de plántulas de las tres variedades de chile evaluadas no mostraron diferencia estadística por las concentraciones de TI; sin embargo, se observa una tendencia creciente en esta variable a medida que la concentración de TI se incrementa; por ejemplo, con la dosis alta de TI (50 μM), el peso de biomasa seca de plántula se incrementa en 13% y 11.7% en las variedades Jalapeño y Serrano, respectivamente, en comparación con el testigo; la excepción se presenta en la variedad Poblano donde esta dosis alta de TI disminuye el peso seco de plántula en 2.3%, respecto al testigo (**Cuadro 1.6.**).

Respecto al efecto que produce el Cd en biomasa seca se ha reportado que tratamientos de 10 a 90 $\mu\text{mol Cd L}^{-1}$ afectan la biomasa seca de las plántulas de *Albizia lebbbeck* L. en comparación el testigo (Farooqi *et al.*, 2009).

Por su parte, Shukla *et al.* (2003), reportan que la biomasa de hojas disminuye progresivamente con el aumento en la concentración de Cd (0.5 a 5 mg L^{-1}).

Cuadro 1.6. Peso de biomasa seca de plántulas provenientes de semillas de tres variedades de chile tratadas con TI.

| Variedad | Jalapeño | Poblano | Serrano |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| TI (μM) | g por plántula | | |
| 0 | 0.0039 \pm 0.0004 a | 0.0040 \pm 0.0003 a | 0.0031 \pm 0.0001 a |
| 25 | 0.0043 \pm 0.0004 a | 0.0045 \pm 0.0002 a | 0.0032 \pm 0.0004 a |
| 50 | 0.0044 \pm 0.0003 a | 0.0039 \pm 0.0004 a | 0.0035 \pm 0.0009 a |

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

El tratamiento con V a la dosis de 25 μM se presentaron incrementos no significativos en el peso de biomasa seca de plántula de 21.9, 18.9 y 5% en las variedades Jalapeño, Poblano y Serrano, respectivamente, comparado con los testigos correspondientes. Asimismo, con el tratamiento con 50 μM V se incrementó en 49% el peso seco de plántula en la variedad Jalapeño, respecto al control, siendo éste estadísticamente significativo (**Figura 1.7.**).

Cuadro 1.7. Peso de biomasa seca de plántulas provenientes de semillas de tres variedades de chile tratadas con V.

| Variedad | Jalapeño | Poblano | Serrano |
|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| V (μM) | g por plántula | | |
| 0 | 0.0039 \pm 0.0004 b | 0.0040 \pm 0.0003 a | 0.0031 \pm 0.0001 a |
| 25 | 0.0048 \pm 0.0002 b | 0.0047 \pm 0.0005 a | 0.0033 \pm 0.0004 a |
| 50 | 0.0058 \pm 0.0002 a | 0.0037 \pm 0.0004 a | 0.0029 \pm 0.0002 a |

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

1.4. CONCLUSIONES

- El Cd, TI y V producen efectos diferenciales en la germinación de semillas y crecimiento inicial de las plántulas de chile; tales diferencias obedecen tanto a la variedad de chile evaluada (Jalapeño, Poblano y Serrano), como a las concentraciones evaluadas de estos metales; asimismo el efecto es dependiente de la variable evaluada.
- Las variables porcentaje de germinación y el porcentaje relativo de germinación no fueron afectadas por las concentraciones de Cd, TI y V suministradas; por el contrario, los efectos de éstos fueron advertidos en parámetros relacionados con el crecimiento inicial de la plántula.
- El orden de tolerancia de las variedades de chile evaluadas es Jalapeño > Poblano > Serrano. En chile Serrano ninguna de las variables evaluadas fue afectada de manera positiva por los tratamientos con metales utilizados en este estudio.

- El elemento que afectó de manera negativa un mayor número de las variables evaluadas en la variedad más tolerante (Jalapeño) fue el tallo.
- Efectos positivos de las concentraciones de Cd estudiadas se presentaron el peso de biomasa seca de plántula de Jalapeño y en la longitud de vástago de Chile Poblano.
- El tallo en la dosis ensayadas incrementó la longitud de vástago en las variedades Jalapeño y Poblano.
- Efectos positivos del V se observaron en el coeficiente de velocidad de germinación y el peso seco de plántula del Chile Jalapeño; así como en la longitud de vástago del Chile Poblano.

1.5. LITERATURA CITADA

- Aina R, Labra M, Fumagalli P, Vannini C, Marsoni M, Cucchi U, Bracale M, Sgorbati S, Citterio S. 2007. Thiol-peptide level and proteomic changes in response to cadmium toxicity in *Oryza sativa* L. roots. *Environmental and Experimental Botany*, 59(3): 381-392. doi:10.1016/j.envexpbot.2006.04.010
- Álvarez- Menéndez MD, Mateos-Martín J, Peinado De Diego MV, Capo-Martí MA. 2006. *Vicia faba* L.: Capacidad bioindicadora de contaminación de agua por metilmercurio. *Observatorio Medioambiental*, 9: 111-123.
- Aslam R, Ansari MYK, Choudhary S, Bhat TM, 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 Science*, 21(5): 465-472. doi: 10.1016/j.sjbs.2014.07.005
- Babić M, Radić S, Cvjetko P, Roje V, Pevalek-Kozlina B, Pavlica M. 2009. Antioxidative response of *Lemna minor* plants exposed to thallium (I)-acetate. *Aquatic Botany*, 91(3): 166-172. doi:10.1016/j.aquabot.2009.05.005

- Bae J, Benoit DL, Watson AK. 2016. Effect of heavy metals on seed germination and seedling growth of common ragweed and roadside ground cover legumes. *Environmental Pollution*, 213: 112-118. doi:10.1016/j.envpol.2015.11.041
- Bautista VO, Fischer G, Cárdenas JF. 2013. Cadmium and chromium effects on seed germination and root elongation in lettuce, spinach and Swiss chard. *Agronomía Colombiana*, 31(1): 48-57.
- Carlson CL, Adriano DC, Sajwan KS, Abels SL, Thoma DP, Driver JT. 1991. Effects of selected trace metals on germinating seeds of six plant species. *Water, Air and Soil Pollution*, 59(3): 231-240. doi: 10.1007/BF00211832
- Chugh LK, Sawhney SK. 1996. Effect of cadmium on germination, amylases and rate of respiration of germinating pea seeds. *Environmental Pollution*, 92(1): 1-5.
- Di Candito M, Ranalli P, Re D. 2004. Heavy metal tolerance and uptake of Cd, Pb and Tl by hemp. *Advances in Horticultural Science*, 18(3): 138-144.
- Emino E, Warman PR, 2004. Biological assay for compost quality. *Compost Science & Utilization*, 12: 342-348. doi: 10.1080/1065657X.2004.10702203
- Farooqi ZR, Iqbal MZ, Kabir M, Shafiq M. 2009. Toxic effects of lead and cadmium on germination and seedling growth of *Albizia lebbek* (L.) Benth. *Pakistan Journal of Botany*, 41(1): 27-33.
- Herrera JA, Alizaga R, Guevara E, Jiménez V, Mora FN, Badilla JR, Salazar W. 2006. *In: Germinación y crecimiento de la planta*. Herrera JA (ed.). (No. 571.82 G374). Universidad de Costa Rica, San José (Costa Rica).
- Iannacone O, Alvariano F. 2005. Efecto ecotoxicológico de tres metales pesados sobre el crecimiento radicular de cuatro plantas vasculares. *Agricultura Técnica*, 65(2): 198-203.
- Idrees S, Shabir S, Ilyas Noshin, Batool Nazima, Kanwal. 2015. Assesment of cadmium on wheat (*Triticum aestivum* L.) in hydroponics medium. *Agrociencia*, 49: 917-929.
- Kader MA. 2005. A comparison of seed germination calculation formula and the associated interpretation of resulting data. *J. Proc. Royal Soc. New South Wales*, 138: 65-75.
- Kasai M, Yamazaki J, Kikuchi M, Iwaya M, Sawada S. 1999. Concentration of vanadium in soil water and its effect on growth and metabolism of rye and wheat plants. *Communication in Sol Science and Plant Analysis*, 30(7-8): 971-982. doi: 10.1080/00103629909370261

- Khan SU, Moheman A. 2006. Effect of heavy metals (cadmium and nickel) on the seed germination, growth and metals uptake by chilli (*Capsicum frutescens*) and sunflower plants (*Helianthus annuus*). *Pollution Research*, 25(1): 99-104.
- Kranner I, Colville L. 2011. Metals and seeds: Biochemical and molecular implications and their significance for seed germination. *Environmental and Experimental Botany*, 72: 93-105. doi: 10.1016/j.envexpbot.2010.05.005
- Liu S, Yang C, Xie W, Xia Ch, Fan P. 2012. The effects of cadmium on germination and seedling growth of *Saueda salsa*. *Procedia Environmental Sciences*, 16: 293-298.
- Márquez-García B, Márquez C, Sanjosé I, Nieva FJJ, Rodríguez-Rubio P, Muñoz-Rodríguez AF. 2013. The effects of heavy metals on germination and seedling characteristics in two halophyte species in Mediterranean marshes. *Marine Pollution Bulletin*, 70(1): 119-124. doi:10.1016/j.marpolbul.2013.02.019
- Navarro-Aviñó JP, Alonso IA, López-Moya JR. 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Revista Ecosistemas*, 16(2): 10-25.
- Ranal MA, García DSD. 2006. How and why to measure the germination process? *Brazilian Journal of Botany*, 29(1): 1-11. doi: 10.1590/S0100-84042006000100002
- Ruiz-Huerta EA, Armenta-Hernández MA. 2012. Acumulación de arsénico y metales pesados en maíz en suelos cercanos a jales o residuos mineros. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(2): 103-117.
- SAGARPA, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2015) Producción de Chile mexicano. (25 de febrero de 2017). Disponible en línea en: <http://www.gob.mx/sagarpa/articulos/produccion-del-chile-mexicano>, consultado: julio 1, 2016.
- Sánchez JA, Montejo L, Gamboa A, Albert-Puentes D, Hernández F. 2015. Germinación y dormancia de arbustos y trepadoras del bosque siempreverde de la Sierra del Rosario, Cuba. *Pastos y Forrajes*, 38(1): 11-28.
- SAS. 2011. SAS Institute Inc., SAS/STAT Users Guide, Version 9.3. SAS Institute Inc. Cary, N. C., USA.
- Shukla UC, Singh J, Joshi PC, Kakkar P. 2003. Effect of bioaccumulation of cadmium on biomass productivity, essential trace elements, chlorophyll biosynthesis, and macromolecules of wheat seedlings. *Biological Trace Element Research*, 92(3): 257-273.

- Siegel BZ y Siegel SM. 1976. Effect of potassium on thallium toxicity in cucumber seedlings: further evidence for potassium-thallium ion antagonism. *Bioinorganic Chemistry*, 6(4): 341-345.
- Sobrero MC, Ronco A. 2004. Ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.). *In*: Castillo G. (ed.). Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas. Estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones. IDRC, IMTA, Canadá. pp. 71-79.
- Sobrevilla-Solis JA, López-Herrera M, López-Escamilla AL, Romero-Bautista L. 2013. Evaluación de diferentes tratamientos pregerminativo y osmóticos en la germinación de semillas *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. Ex Willd) M. C. Johnston. *En: Estudios científicos en el estado de Hidalgo y zonas aledañas, Volumen II, Pulido-Flores G, Monks S (eds.). Lincoln, NE: Zea Books.*
- Tangahu BV, Sheikh ASR, Basri H, Idris M, Anuar N, Mukhlisin M. 2011. A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation. *International Journal of Chemical Engineering*. Article ID939161. doi: 10.1155/2011/939161
- Tham LX, Nagasawa N, Matsushashi S, Ishioka NS, Ito T, Kume T. 2001. Effect of radiation-degraded chitosan on plants stressed with vanadium. *Radiation Physics and Chemistry*, 61(2): 171-175. doi:10.1016/S0969-806X(00)00388-1
- Wang XF, Zhou QX. 2005. Ecotoxicological effects of cadmium on three ornamentals plants. *Chemosphere*, 60: 16-21. doi:10.1016/j.chemosphere.2004.12.031
- Yao Y, Zhang P, Chen XY, Chen J, WU T, Chen YH. 2008. Effects of thallium on seed germination and plant growth of *Oryza sativa* L. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 23(1): 138-140. doi:10.7668/hbnxb.2008.01.030
- Zhang L, Mao X, Xia Z. 2012. Effects of sodium metavanadate and germination on the sprouting of chickpeas and its content of vanadium, formononetin and biochanin a in the sprouts. *Journal of Dietary Supplements*, 9(1): 34-44. doi: 10.3109/19390211.2011.639858
- Zhao T, Tie B-q, Yang S-w. 2007. Effect of vanadium on seed germination and seedling growth. *Environmental Science and Technology*, 30(5): 3-5.

CAPÍTULO II. CADMIO, TALIO Y VANADIO EN EL CICLO PRODUCTIVO DE TRES VARIEDADES DE CHILE (*Capsicum annuum* L.)

2.1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los procesos naturales y las actividades antropogénicas han ocasionado la dispersión de contaminantes, entre ellos se encuentran los metales pesados ([Rascio y Navari-Izzo, 2011](#)). Estos metales pueden acumularse y permanecer en los organismos (plantas y animales) a través de la cadena alimentaria y provocar efectos graves a la salud humana ([Méndez et al., 2009](#)).

Actualmente los estudios de toxicidad por metales pesados se realizan a través de bioensayos empleando plantas vasculares, los cuales son recomendadas por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés, Environmental Protection Agency) y la Administración de Alimentos y Drogas de los Estados Unidos (FDA, por sus siglas en inglés, Food and Drug Administration) como una herramienta que proporciona un alto grado de sensibilidad ([Méndez et al., 2009](#)).

Por otra parte, el chile, es un fruto originario de Mesoamérica, forma parte de la cocina mexicana e internacional principalmente por su sabor y por ser fuente de vitaminas. Existen cinco especies domesticadas, *Capsicum annuum*, *C. frutescens*, *C. baccatum*, *C. pubescens*, y *C. chinense*., siendo *Capsicum annuum* L., la más ampliamente conocida y la de mayor importancia económica ([Aguilar-Meléndez et al., 2009](#)).

En México, el cultivo de chile es importante debido a su diversidad genética y a su morfología, la producción anual de chile en el 2015 fue de 2.2 millones de toneladas de

fruto fresco, de las cuales se exportan cerca de 900 mil toneladas de chiles frescos, secos y en preparaciones a Canadá, Japón, Estados Unidos, Alemania y Gran Bretaña. Dicha producción se obtiene principalmente de Chihuahua, Sinaloa y Zacatecas con una producción de 562, 556 y 348 mil toneladas por año respectivamente ([SAGARPA, 2015](#)). México cuenta con más de cien variedades de chile clasificadas en 22 grupos de verdes y 12 grupos de secos; entre los picantes destacan por el volumen y el valor de la producción el Jalapeño, Poblano y el Serrano ([SIAP, 2010](#)).

En los estados de la república mexicana donde se produce la mayor cantidad de chile, no existe un control de contaminantes en los campos agrícolas, aunque existen reportes de la presencia de metales pesados en estas áreas. Tal es el caso de la producción en Chihuahua, donde el riego de cultivos con aguas residuales es común, aun cuando se han reportado altas concentraciones de metales pesados ([Maldonado et al., 2008](#)). Asimismo en Sinaloa, el cultivo intensivo con aguas que provienen de ríos industriales y municipales que contienen sedimentos ricos en metales ([Frías-Espericueta et al., 2009](#)) es común. En Zacatecas, se encuentra una de las zonas mineras de mayor importancia del país, donde la explotación de minas por más de 450 años ha causado un impacto muy fuerte al suelo por la acumulación de residuos metálicos que son transportados a ríos y zonas llanas de los valles que mayormente son utilizadas para el riego del cultivos ([González Dávila et al., 2012](#)).

Las plantas que crecen en suelos que presentan niveles tóxicos de metales pesados como el cadmio, talio y vanadio pueden presentar acumulación de estos elementos en sus tejidos, causando alteraciones bioquímicas, fisiológicas y desequilibrios en la absorción y transporte de nutrimentos que podría dar como resultado plantas más

pequeñas, la reducción del rendimiento y de la calidad (Barceló y Poschenrieder, 1992). Por su parte, Iannacone y Alvaríño (2005) reportan que la acumulación, tolerancia y desintoxicación de los metales pesados es diferente entre especies vegetales y hasta entre variedades, asimismo es influenciada por factores genéticos y fisiológicos que presenta la planta.

En el contexto anterior, esta investigación tuvo como objetivo evaluar los efectos que el tratamiento con los metales pesados cadmio (Cd), talio (Tl) y vanadio (V) bajo condiciones de invernadero, tiene en componentes del rendimiento (número de frutos por planta, rendimiento por planta, longitud media y ancho medio de fruto) y en la concentración foliar de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) de tres materiales genéticos híbridos de Chile de importancia nacional: Jalapeño, Poblano y Serrano.

2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.2.1. Material vegetal

Se utilizaron semillas híbridas de Chile (*Capsicum annuum* L.) de tres variedades: Jalapeño “Emperador” NUN 70030; Poblano “Capulín”; y Serrano “Coloso” del Lote 2015-1.

2.2.2. Ubicación del experimento

Este estudio se realizó en el ciclo de cultivo 2016-2017, en un invernadero de estructura metálica y cubierta de polietileno, dentro del Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo, ubicado en el municipio de Texcoco, Estado de México, a una altitud de 2250 m, 19° 29' LN y 98° 54' LW.

2.2.3. Desinfección de semillas

Antes de llevar a cabo la siembra y con el objetivo de eliminar la presencia de patógenos, se remojaron las semillas en solución de hipoclorito de sodio al 2% (0.33 mL L^{-1}) durante 15 min, posteriormente se hicieron seis enjuagues con agua destilada estéril.

2.2.4. Producción de plántulas

Semillas de las tres variedades de chile se sembraron el 9 de mayo de 2016, en charolas de unicel de 200 cavidades con turba como sustrato, en donde se aplicaron riegos ligeros de agua cada tercer día hasta obtener plántulas sanas de entre 15 y 20 cm de longitud.

2.2.5. Trasplante

El trasplante se hizo en bolsas de plástico negro (7 L de capacidad), las cuales se colocaron a 60 cm entre hileras y a 42 cm entre macetas, usando tezontle rojo como sustrato con tamaño medio de partícula de 0.5 mm, el cual fue previamente desinfectado con solución de hipoclorito de sodio al 6% (1 mL L^{-1}).

2.2.6. Sistema de riego

Se establecieron tanques de plástico de 200 L (para cada uno de los tratamientos) a los cuales se conectaron bombas de agua de $\frac{1}{2}$ HP, y éstas a su vez, fueron adaptadas a un sistema de riego por goteo.

A partir del trasplante, las plantas fueron regadas con la solución nutritiva de Steiner (Steiner, 1984), cuya composición de macronutrientes es en $\text{mol}_{(+)} \text{ m}^{-3}$: 12 NO_3^- , $1 \text{ H}_2\text{PO}_2^-$, 7 SO_4^{2-} , 7 K^+ , 9 Ca^{2+} y 4 Mg^{2+} . Las fuentes de macronutrientes utilizadas fueron

$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, KH_2PO_4 , K_2SO_4 y KNO_3 ; todas grado reactivo analítico (ACS) de la marca J. T. Baker. La solución nutritiva fue complementada con micronutrientes a partir del producto comercial Tradecorp AZ, aportando las concentraciones siguientes de éstos a la solución nutritiva en mg L^{-1} : 5 Fe, 2.33 Mn, 0.47 Zn, 0.19 Cu, 0.43 B y 0.17 Mo. El pH de la solución nutritiva fue ajustado a un valor de 5.5.

2.2.7. Diseño de tratamientos y experimental

Se evaluó de manera independiente cada variedad de chile y cada metal pesado. Las concentraciones evaluadas de Cd, Tl y V fueron adicionadas a la solución nutritiva de Steiner empleada para el riego durante el ciclo de producción.

Las concentraciones de Cd ensayadas fueron 0, 5 y 10 μM , que fueron adicionadas a la solución nutritiva a partir de cloruro de cadmio (CdCl_2 , Sigma Aldrich). Por otro lado, las concentraciones de Tl evaluadas fueron 0, 0.0055 y 0.011 μM , suministradas éstas a partir acetato de talio (CH_3COOTl , Sigma Aldrich). Finalmente, las concentraciones de V ensayadas fueron 0, 0.75 y 1.5 μM empleando como fuente el metavanadato de amonio (NH_4VO_3 , Sigma Aldrich). Como se indicó previamente, el pH de las soluciones nutritivas fue ajustado a 5.5.

Las unidades experimentales fueron las bolsas con capacidad de 7 L conteniendo una planta, mismas que fueron distribuidas en un diseño completamente al azar. Cada tratamiento por variedad tuvo seis repeticiones.

2.2.8. Variables evaluadas

Después de 80 días de tratamientos y de cuatro cortes de fruto realizados, se midieron las variables respuesta que se describen a continuación.

2.2.8.1. Componentes del rendimiento

Número de frutos por planta. Se contabilizaron los frutos de cada variedad por tratamiento por corte; los frutos de los cuatro cortes fueron sumados.

Rendimiento por planta. En esta variable se consideró el peso de los frutos por planta cosechados en cada corte de cada tratamiento; los pesos de cada corte por planta fueron sumados.

Longitud media de fruto. Se evaluó midiendo desde la base hasta el ápice de frutos al momento del corte.

Ancho medio de fruto. En cada corte de fruto se midió a un tercio de la base del fruto.

2.2.8.2. Concentración foliar de N, P y K

El análisis de concentración de N, P y K se realizó en la totalidad de hojas por planta, mismas que fueron secadas durante 48 h a 72 °C en una estufa de aire forzado (Riossa

modelo HCF-125D; Monterrey, N. L., México). Después del secado, las muestras se molieron en un molino tipo Wiley.

Concentración de nitrógeno (N). Se determinando utilizando el método Semi-micro Kjeldhal. El extracto resultante de la digestión mezcla de ácido sulfúrico-salicílico se destiló y se tituló con H_2SO_4 0.05 N.

Concentración de fósforo (P) y potasio (K). Se determinó en el extracto producto de la digestión de material vegetal seco y molido con ácido perclórico y ácido nítrico siguiendo la metodología descrita por [Alcántar y Sandoval \(1999\)](#), usando equipo de espectroscopía de emisión atómica de inducción por plasma acoplado (ICP-Varian 725-ES).

2.2.9. Análisis estadístico

Con los resultados obtenidos se realizaron análisis de varianza y pruebas de comparación de medias con la prueba LSD ($P \leq 0.05$), para cada metal y variedad evaluados, usando el software SAS ([SAS, 2011](#)).

2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3.1. Número de frutos cosechados por planta

En los **Cuadros 1, 2 y 3** se presentan los efectos que el tratamiento con Cd, Tl y V tuvieron en el número de frutos cosechados. Entre variedades se observa que

independientemente del tratamiento recibido, el número de frutos producidos es mayor en Serrano, seguido de Jalapeño y por último el Poblano.

El tratamiento con Cd solo redujo de manera significativa el número de frutos en la variedad Jalapeño, con decrementos de 43.4% respecto al testigo. En las variedades Poblano y Serrano, si bien el Cd redujo el número de frutos, estas reducciones no fueron significativas desde el punto de vista estadístico (**Cuadro 2.1**). De manera coincidente con los efectos observados en la variedad Jalapeño, [Mozafaruyan et al. \(2014\)](#), reportan que el tratamiento con 0.5 mM Cd (500 μ M), redujo de manera significativa el número de frutos, esta respuesta fue ocasionada por el incremento en la abscisión floral bajo estas condiciones. [Singh \(2013\)](#), reporta que el Cd²⁺, tiene efectos deletéreos en la producción de número de vainas y semillas en el gandul o frijol de palo (*Cajanus cajan*). En este caso, la reducción podría deberse al efecto adverso del Cadmio en diversos procesos fisiológicos y metabólicos como la fotosíntesis, la fijación de nitrógeno y la distribución del carbono y nitrógeno en la planta.

Cuadro 2.1. Frutos totales por planta de tres variedades de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano) tratadas con Cd en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero.

| Cd (μM) | Jalapeño | Poblano | Serrano |
|-------------------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| 0 | 20.33 \pm 2.04 a | 1.17 \pm 1.20 a | 90.50 \pm 12.76 a |
| 5 | 11.50 \pm 1.60 b | 1.50 \pm 1.04 a | 83.67 \pm 8.12 a |
| 10 | 11.50 \pm 3.24 b | 0.50 \pm 0.27 a | 78.50 \pm 15.97 a |

Medias \pm DE en cada columna con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (LSD, $P \leq 0.05$).

Las concentraciones de TI evaluadas no tuvieron influencia significativa en el número de frutos; sin embargo se observan tendencias opuestas entre variedades. Por un lado, el TI tiende a disminuir el número de frutos en las variedades Jalapeño y Serrano; mientras que en Poblano tiende a aumentarlo en más de cuatro veces como se observa en el **Cuadro 2.2.**

Cuadro 2.2. Frutos totales por planta de tres variedades de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano) tratadas con TI en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero.

| TI (μM) | Jalapeño | Poblano | Serrano |
|----------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| 0.0000 | 20.33 \pm 2.04 a | 1.17 \pm 1.20 a | 90.50 \pm 12.76 a |
| 0.0055 | 12.83 \pm 5.36 a | 5.67 \pm 2.86 a | 60.67 \pm 8.35 a |
| 0.0110 | 10.67 \pm 4.00 a | 5.17 \pm 2.08 a | 83.50 \pm 16.40 a |

Medias \pm DE en cada columna con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (LSD, $P \leq 0.05$).

Los tratamientos con V en Serrano, no afectaron el número de frutos; mientras que en la variedad Jalapeño, éstos tuvieron un efecto negativo, particularmente a la concentración de 0.75 μM , con reducciones significativas en el número de frutos de 34.4%, respecto al testigo. De manera importante destacan los aumentos significativos en el número de frutos de la variedad Poblano con los tratamientos con 0.75 y 1.50 μM V, que superan al testigo en más de 6 y 8 veces, respectivamente (**Cuadro 2.3**).

Cuadro 2.3. Frutos totales por planta de tres variedades de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano) tratadas con V en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero.

| V (μM) | Jalapeño | Poblano | Serrano |
|---------------------|---------------------|-------------------|----------------------|
| 0.00 | 20.33 \pm 2.04 a | 1.17 \pm 1.20 b | 90.50 \pm 12.76 a |
| 0.75 | 13.33 \pm 2.09 b | 6.83 \pm 1.66 a | 106.83 \pm 11.33 a |
| 1.50 | 17.83 \pm 3.32 ab | 8.50 \pm 1.81 a | 93.50 \pm 10.13 a |

Medias \pm DE en cada columna con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (LSD, $P \leq 0.05$).

2.3.2. Rendimiento por planta

En el **Cuadro 2.4** el rendimiento registrado de las variedades Jalapeño, Poblano y Serrano, al ser tratados con dos concentraciones de Cd y su respectivo testigo. Las concentraciones de Cd no tuvieron un efecto significativo en las variedades Poblano y Serrano; por el contrario, en Jalapeño existen diferencias significativas para la concentración de 5 y 10 μM comparado con el testigo, encontrándose una disminución del rendimiento de 51 y 60% respectivamente, en comparación con el testigo. Este mismo efecto se ha observado al comparar el rendimiento de fibra de tres genotipos de algodón expuestos a 1 μM de Cd, donde se presentan reducciones significativas con respecto al control ([Wu et al., 2004](#)).

Cuadro 2.4. Rendimiento por planta después de cuatro cortes, en tres variedades de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano) tratadas con Cd en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero.

| Cd (μM) | Jalapeño | Poblano | Serrano |
|--------------------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| 0 | 540.86 \pm 94.88 a | 71.03 \pm 59.64 a | 592.06 \pm 75.66 a |
| 5 | 275.90 \pm 46.49 b | 67.31 \pm 44.84 a | 523.57 \pm 51.67 a |
| 10 | 326.88 \pm 60.39 b | 28.26 \pm 15.77 a | 547.20 \pm 96.74 a |

Medias \pm DE en cada columna con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (LSD, $P \leq 0.05$).

El tratamiento con TI no tuvo efecto en el rendimiento por planta en la variedad de chile Jalapeño. Por otra parte, en Poblano, la adición de 0.011 μM V incrementó significativamente el rendimiento, con aumentos de 366%. En la variedad Serrano, la concentración 0.0055 μM V redujo el rendimiento en 64% en comparación con el testigo (**Cuadro 2.5**).

Cuadro 2.5. Rendimiento por planta después de cuatro cortes, en tres variedades de chile de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano) tratadas con TI en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero.

| TI (μM) | Jalapeño | Poblano | Serrano |
|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|
| 0.0000 | 540.86 \pm 94.88 a | 71.03 \pm 59.64 b | 592.06 \pm 75.66 a |
| 0.0055 | 350.72 \pm 144.19 a | 311.38 \pm 127.78 ab | 380.75 \pm 38.19 b |
| 0.0110 | 269.91 \pm 114.08 a | 331.00 \pm 115.81 a | 565.58 \pm 87.81 a |

Medias \pm DE en cada columna con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (LSD, $P \leq 0.05$).

En el **Cuadro 2.6** se muestran el rendimiento de chiles Jalapeño, Poblano y Serrano tratados con diferentes concentraciones de V. Estos tratamientos no tuvieron un efecto significativo en la variedad Serrano; por el contrario, en el caso de la variedad Jalapeño existen diferencias significativas para la concentración de 0.75 μM V, que ocasionó una reducción del 60% con respecto al testigo. Por otra parte, la variedad Poblano presenta un aumento significativo del rendimiento con el tratamiento con ambas concentraciones de V comparadas con el testigo. Estudios realizados en soya, mostraron una disminución del rendimiento del orden de 20% cuando se trataron con V (Olness *et al.*, 2000). Asimismo, Singh (1971) determinó que concentraciones de V superiores a 0.05 ppm son perjudiciales para el cultivo de maíz; mientras que, concentraciones por debajo de esta concentración, aumentan significativamente el rendimiento de grano. Por su parte, Gil *et al.* (1995) reporta que en plantas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) cultivadas en soluciones nutritivas con 0.1, 0.2, 0.5 y 1 mg V kg^{-1} , disminuye el rendimiento conforme aumenta la concentración de V.

Cuadro 2.6. Rendimiento por planta después de cuatro cortes, en tres variedades de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano) tratadas con V en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero.

| V (μM) | Jalapeño | Poblano | Serrano |
|---------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| 0.00 | 540.86 \pm 94.88 a | 71.03 \pm 59.64 b | 592.06 \pm 75.66 a |
| 0.75 | 327.89 \pm 49.90 b | 464.52 \pm 82.90 a | 691.21 \pm 65.20 a |
| 1.50 | 463.50 \pm 91.89 ab | 317.14 \pm 78.34 a | 560.68 \pm 49.50 a |

Medias \pm DE en cada columna con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (LSD, $P \leq 0.05$).

2.3.3. Ancho de fruto

Los valores promedio del ancho de frutos para las variedades Jalapeño, Poblano y Serrano tratados con dos dosis de Cd no muestran diferencias significativas respecto al control, no obstante en la variedad Serrano (10 μM) se aprecia un incremento tres veces mayor con respecto al testigo, sin embargo éste no es significativo (**Cuadro 2.7**).

Cuadro 2.7. Ancho promedio de frutos (mm) de tres variedades de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano) tratadas con Cd en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero.

| Cd (μM) | Jalapeño | Poblano | Serrano |
|----------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| 0 | 28.49 \pm 1.76 a | 3.48 \pm 3.56 a | 12.70 \pm 0.82 a |
| 5 | 24.27 \pm 1.74 a | 14.46 \pm 9.10 a | 13.37 \pm 0.21 a |
| 10 | 26.80 \pm 2.28 a | 6.71 \pm 3.68 a | 42.96 \pm 36.80 a |

Medias \pm DE en cada columna con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (LSD, $P \leq 0.05$).

Los valores promedio del ancho de frutos de las variedades Jalapeño y Serrano tratadas con TI no muestran diferencias significativas con el tratamiento con TI respecto al control. En la variedad Poblano, por el contrario, el tratamiento con 0.0055 y 0.0110 μM TI incrementó significativamente el ancho de los frutos, en comparación con el testigo (**Cuadro 2.8**).

Cuadro 2.8. Ancho promedio de frutos (mm) de tres variedades de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano) tratadas con TI en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero.

| TI (μM) | Jalapeño | Poblano | Serrano |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0.0000 | 28.49 \pm 1.76 a | 3.48 \pm 3.56 b | 12.70 \pm 0.82 a |
| 0.0055 | 22.81 \pm 3.74 a | 38.00 \pm 8.65 a | 14.00 \pm 1.37 a |
| 0.0110 | 19.94 \pm 5.27 a | 29.73 \pm 9.85 a | 13.24 \pm 0.30 a |

Medias \pm DE en cada columna con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (LSD, $P \leq 0.05$).

Los valores promedio del ancho de frutos de plantas tratadas con V no muestran diferencias significativas en las variedades Jalapeño y Serrano. En el caso de Poblano se presentan diferencias estadísticamente significativas en 0.75 y 1.50 μM V, evidenciándose un marcado aumento en el ancho de los frutos tratados (46.06 y 39.5 mm, respectivamente), con respecto a los frutos de plantas del tratamiento testigo que fue de 3.48 (**Cuadro 2.9**).

Cuadro 2.9. Ancho promedio de frutos (mm) de tres variedades de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano) tratadas con V en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero.

| V (μM) | Jalapeño | Poblano | Serrano |
|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0.00 | 28.49 \pm 1.76 a | 3.48 \pm 3.56 b | 12.70 \pm 0.82 a |
| 0.75 | 26.53 \pm 3.20 a | 46.06 \pm 6.92 a | 16.55 \pm 4.85 a |
| 1.50 | 26.63 \pm 2.49 a | 39.50 \pm 7.84 a | 12.41 \pm 0.97 a |

Medias \pm DE en cada columna con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (LSD, $P \leq 0.05$).

2.3.4. Longitud de fruto

El tratamiento con ambas concentraciones de Cd redujo significativamente la longitud de frutos de la variedad Jalapeño, con reducciones medias de 21.3% respecto al control. En Poblano, el Cd no tuvo influencia en la longitud de fruto; mientras que en Serrano, solo la concentración de 5 μM Cd tuvo efectos negativos en esta variable (**Cuadro 2.10**).

No existen reportes específicos a cerca del efecto del Cd en el ancho y longitud de fruto de chile; no obstante, sin embargo se reportan algunos efectos con la aplicación de Cd en leguminosas, donde se encontró que el Cd ocasionó la disminución del número de vainas por planta, menor número de semillas por vaina, mayor proporción de vainas vacías y menor peso de la semilla (Singh, 2013).

Cuadro 2.10. Longitud promedio de frutos (cm) de tres variedades de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano) tratadas con Cd en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero.

| Cd (μM) | Jalapeño | Poblano | Serrano |
|----------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 0 | 7.83 \pm 0.64 a | 3.13 \pm 2.41 a | 7.01 \pm 0.36 ab |
| 5 | 5.87 \pm 0.43 b | 4.07 \pm 2.56 a | 6.78 \pm 0.13 b |
| 10 | 6.45 \pm 0.57 b | 1.45 \pm 0.79 a | 7.50 \pm 0.14 a |

Medias \pm DE en cada columna con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (LSD, $P \leq 0.05$).

La longitud promedio de los frutos de chile Jalapeño, Poblano y Serrano tratados con TI no muestran diferencias significativas en la variedad Serrano; por lo contrario, con la dosis 0.0011 μM , en Jalapeño y Poblano presentan diferencias estadísticamente

significativas al compararla con el testigo; en Jalapeño se reduce la longitud de fruto en 33.6%, y en Poblano se incrementa en 113.4% (**Cuadro 2.11**).

Cuadro 2.11. Longitud promedio de frutos (cm) de tres variedades de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano) tratadas con TI en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero.

| TI (μM) | Jalapeño | Poblano | Serrano |
|----------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 0.0000 | 7.83 \pm 0.64 a | 3.13 \pm 2.41 b | 7.01 \pm 0.36 a |
| 0.0055 | 6.08 \pm 0.94 ab | 8.63 \pm 1.88 ab | 7.54 \pm 0.73 a |
| 0.0110 | 5.20 \pm 1.36 b | 6.68 \pm 2.25 a | 7.10 \pm 0.17 a |

Medias \pm DE en cada columna con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (LSD, $P \leq 0.05$).

Los tratamientos con V no afectaron la longitud de fruto de las variedades Jalapeño y Serrano. Por el contrario, en Poblano, este elemento suministrado a la concentración baja evaluada en este estudio (0.75 μM) incrementó en 351% (**Cuadro 2.12**).

Cuadro 2.12. Longitud promedio de frutos (cm) de tres variedades de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano) tratadas con V en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero.

| V (μM) | Jalapeño | Poblano | Serrano |
|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| 0.00 | 7.83 \pm 0.64 a | 3.13 \pm 2.41 b | 7.01 \pm 0.36 a |
| 0.75 | 6.64 \pm 0.77 a | 14.90 \pm 6.26 a | 6.80 \pm 0.43 a |
| 1.50 | 7.11 \pm 0.64 a | 10.29 \pm 1.59 ab | 6.67 \pm 0.35 a |

Medias \pm DE en cada columna con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (LSD, $P \leq 0.05$).

2.3.5. Concentración foliar de N

Las concentraciones foliares de N en chile Serrano “Tampiqueño, después de 80 d del trasplante, reportadas por [Cruz-Crespo et al. \(2014\)](#) oscilaron entre 37.8 y 45.7 g kg⁻¹ de materia seca. En este intervalo se encuentran las concentraciones para chile Serrano registradas en este estudio, independiente del tratamiento con metales como se observa en los **Cuadros 2.13, 2.14 y 2.15**. Por otro lado, el intervalo de suficiencia para N en hojas en etapa de fructificación reportado por [Mills y Jones \(1996\)](#), oscila de 35 a 50 g kg⁻¹ de materia seca. Dentro de este intervalo se ubican las concentraciones foliares de N en las tres variedades evaluadas tratadas con las diferentes concentraciones de Cd, Tl y V.

En el **Cuadro 2.13** se observa que los tratamientos con Cd no afectaron las concentraciones foliares de N en las tres variedades de chile estudiadas.

Cuadro 2.13. Concentración foliar de N (g kg⁻¹ de materia seca), en plantas de tres variedades de chile tratadas durante el ciclo de producción con Cd en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero.

| Cd (µM) | Variedades | | |
|---------|----------------|----------------|----------------|
| | Jalapeño | Poblano | Serrano |
| 0 | 39.49 ± 1.09 a | 38.97 ± 1.26 a | 41.94 ± 1.16 a |
| 5 | 41.24 ± 1.44 a | 37.86 ± 1.09 a | 41.94 ± 1.38 a |
| 10 | 39.67 ± 1.45 a | 38.15 ± 1.47 a | 39.49 ± 1.29 a |
| DMS | 3.30 | 3.15 | 3.15 |

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

En las variedades Jalapeño y Serrano, el tratamiento con TI no tuvo influencia en la concentración foliar de N. Efectos positivos del TI fueron observados en la concentración foliar de N en la variedad de chile Poblano, dado que el tratamiento con 0.0055 y 0.0110 μM de este elemento, la incrementa en 3 y 10.6%, respecto al testigo (**Cuadro 2.14**).

Cuadro 2.14. Concentración foliar de N (g kg^{-1} de materia seca), en plantas de tres variedades de chile tratada durante el ciclo de producción con TI en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero.

| TI (μM) | Variedades | | |
|----------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| | Jalapeño | Poblano | Serrano |
| 0.0000 | 39.49 \pm 1.09 a | 38.97 \pm 1.26 b | 41.94 \pm 1.16 a |
| 0.0055 | 39.20 \pm 1.17 a | 40.13 \pm 0.59 ab | 41.59 \pm 0.73 a |
| 0.0110 | 39.96 \pm 1.33 a | 43.11 \pm 2.10 a | 40.72 \pm 1.01 a |
| DMS | 2.95 | 3.57 | 2.41 |

Medias \pm DE en cada columna con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (LSD, $P \leq 0.05$).

En el **Cuadro 2.15** se muestran las concentraciones de N en hojas para las variedades de chile Jalapeño, Poblano y Serrano tratadas con V. En las variedades Jalapeño y Poblano, se observa una respuesta positiva de la adición de 0.75 μM V en la concentración foliar de N adicionado a la solución nutritiva Steiner, con incrementos de 5 y 16.2%, respectivamente, en comparación con el testigo.

Cuadro 2.15. Concentración foliar de N (g kg^{-1} de materia seca), en plantas de tres variedades de chile tratada durante el ciclo de producción con V en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero.

| V (μM) | Variedades | | |
|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| | Jalapeño | Poblano | Serrano |
| 0.00 | 39.49 ± 1.09 ab | 38.97 ± 1.26 b | 41.94 ± 1.15 a |
| 0.75 | 41.48 ± 0.63 a | 45.27 ± 2.13 a | 45.44 ± 1.92 a |
| 1.50 | 37.98 ± 1.28 b | 40.72 ± 0.98 b | 44.39 ± 3.56 a |
| DMS | 2.55 | 3.78 | 5.98 |

Medias \pm DE en cada columna con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (LSD, $P \leq 0.05$).

2.3.6. Concentración foliar de P

El rango de suficiencia para P en hojas de chile de plantas en fructificación va de 2.2 a 7 g kg^{-1} de materia seca (Mills y Jones, 1996); en este intervalo se encuentran los resultados obtenidos en este estudio (**Cuadros 2.16, 2.17 y 2.18**).

El Cd no tuvo efecto en la concentración de P en hojas de plantas de chile Poblano. Asimismo, con la dosis baja de este elemento adicionada a la solución nutritiva (5 μM Cd), la concentración foliar de P en Jalapeño se redujo en 22.4%, mientras que en Serrano, ésta se incrementó en 20.4%; en ambos casos respecto al testigo (**Cuadro 2.16**).

Cuadro 2.16. Concentración foliar de P (g kg^{-1} de materia seca), en plantas de tres variedades de chile tratada durante el ciclo de producción con cadmio en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero.

| Cd (μM) | Variedades | | |
|----------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| | Jalapeño | Poblano | Serrano |
| 0 | 2.63 ± 0.23 a | 2.54 ± 0.16 a | 1.62 ± 0.14 b |
| 5 | 2.04 ± 0.08 b | 2.60 ± 0.14 a | 1.95 ± 0.08 a |
| 10 | 2.32 ± 0.07 ab | 2.56 ± 0.22 a | 1.72 ± 0.07 ab |
| DMS | 0.35 | 0.43 | 0.24 |

Medias \pm DE en cada columna con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (LSD, $P \leq 0.05$).

La concentración foliar de P no fue afectada por los tratamientos con TI en tres variedades de chile como se observa en el **Cuadro 2.17**.

Cuadro 2.17. Concentración foliar de P (g kg^{-1} de materia seca), en plantas de tres variedades de chile tratada durante el ciclo de producción con talio en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero.

| TI (μM) | Variedades | | |
|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | Jalapeño | Poblano | Serrano |
| 0.0000 | 2.63 ± 0.23 a | 2.54 ± 0.16 a | 1.62 ± 0.14 a |
| 0.0055 | 2.72 ± 0.22 a | 2.39 ± 0.17 a | 1.92 ± 0.18 a |
| 0.0110 | 2.65 ± 0.13 a | 2.52 ± 0.10 a | 1.69 ± 0.13 a |
| DMS | 0.48 | 0.35 | 0.37 |

Medias \pm DE en cada columna con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (LSD, $P \leq 0.05$).

El V no tuvo efecto en las concentraciones foliares de P en las tres variedades de Chile evaluadas (**Cuadro 2.18**).

Cuadro 2.18. Concentración foliar de P (g kg^{-1} de materia seca), en plantas de tres variedades de Chile tratada durante el ciclo de producción con Vanadio en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero.

| V (μM) | Variedades | | |
|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | Jalapeño | Poblano | Serrano |
| 0.00 | 2.63 \pm 0.23 a | 2.54 \pm 0.16 a | 1.62 \pm 0.13 a |
| 0.75 | 2.40 \pm 0.11 a | 2.62 \pm 0.13 a | 1.90 \pm 0.07 a |
| 1.50 | 2.53 \pm 0.19 a | 2.70 \pm 0.16 a | 1.69 \pm 0.13 a |
| DMS | 0.45 | 0.36 | 0.29 |

Medias \pm DE en cada columna con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (LSD, $P \leq 0.05$).

2.3.7. Concentración foliar de K

El rango de concentración de suficiencia para K en hojas de plantas de Chile en etapa reproductiva oscila de 35 a 45 g kg^{-1} de materia seca (Mill y Jones, 1996). Las concentraciones de K en hojas de plantas de la variedad Jalapeño aquí obtenidas son superiores a este intervalo, independiente del tratamiento recibido. Los resultados en Poblano y Serrano, de manera general, se encuentran dentro del rango de suficiencia (**Cuadros 2.19, 2.20 y 2.21**).

En el **Cuadro 2.19** se observa que el Cd solo tuvo efectos significativos en la concentración de K en hojas de plantas de la variedad Poblano, con un incremento significativo de 15.8% con la concentración 5 μM , respecto al testigo.

Cuadro 2.19. Concentración foliar de K (g kg^{-1} de materia seca), en plantas de tres variedades de chile tratada durante el ciclo de producción con cadmio.

| Cd (μM) | Variedades | | |
|----------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| | Jalapeño | Poblano | Serrano |
| 0 | 52.84 \pm 2.29 a | 39.42 \pm 2.18 b | 45.02 \pm 1.63 a |
| 5 | 49.28 \pm 2.80 a | 45.66 \pm 2.80 a | 46.34 \pm 2.55 a |
| 10 | 50.79 \pm 1.44 a | 40.20 \pm 2.52 ab | 40.09 \pm 4.35 a |
| DMS | 5.53 | 6.18 | 7.52 |

Medias \pm DE en cada columna con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (LSD, $P \leq 0.05$).

Las concentraciones de K en hoja no presentan diferencias significativas en las variedades Poblano y Serrano con los tratamientos con TI. En la variedad Jalapeño se incrementa la concentración de K con la concentración de 0.011 μM TI, en comparación con el testigo (**Cuadro 2.20**).

Cuadro 2.20. Concentración foliar de K (g kg^{-1} de materia seca), en plantas de tres variedades de chile tratada durante el ciclo de producción con talio.

| TI (μM) | Variedades | | |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | Jalapeño | Poblano | Serrano |
| 0.0000 | 52.84 \pm 2.29 a | 39.42 \pm 2.18 a | 45.02 \pm 1.63 a |
| 0.0055 | 43.69 \pm 2.22 b | 35.21 \pm 4.78 a | 38.80 \pm 3.94 a |
| 0.0110 | 49.13 \pm 1.23 a | 37.91 \pm 1.46 a | 43.98 \pm 1.45 a |
| DMS | 4.85 | 7.75 | 6.40 |

Medias \pm DE en cada columna con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (LSD, $P \leq 0.05$).

La concentración foliar de K de chile Jalapeño y Serrano no fueron afectadas por los tratamientos con V. Por el contrario, en la variedad Poblano el tratamiento con 0.75 μM V incrementa significativamente la concentración de K en hojas (**Cuadro 2.21**).

Cuadro 2.21. Concentración foliar de K (g kg^{-1} de materia seca), en plantas de tres variedades de chile tratada durante el ciclo de producción con vanadio en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero.

| V (μM) | Variedades | | |
|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| | Jalapeño | Poblano | Serrano |
| 0.00 | 52.84 \pm 2.29 a | 39.42 \pm 2.18 b | 45.02 \pm 1.63 a |
| 0.75 | 50.29 \pm 5.33 a | 45.68 \pm 1.82 a | 44.86 \pm 2.42 a |
| 1.50 | 46.78 \pm 2.25 a | 42.28 \pm 1.83 ab | 41.97 \pm 4.14 a |
| DMS | 8.84 | 4.80 | 7.21 |

Medias \pm DE en cada columna con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (LSD, $P \leq 0.05$).

2.4. CONCLUSIONES

El Cd redujo el número de frutos por planta, el rendimiento y la longitud de fruto en la variedad Jalapeño; asimismo la dosis baja de Cd (5 μM) incrementó de manera significativa la concentración foliar de K en las variedades Poblano; mientras que redujo las de P en las variedades Jalapeño y Serrano. La dosis baja de Cd (5 μM) redujo de manera significativa la longitud de frutos de la variedad Serrano. En la variedad Poblano, el TI estimuló el rendimiento, e incrementó la longitud y el ancho del fruto, así como la concentración foliar de N. En la variedad Serrano, el TI redujo el rendimiento con la dosis baja (0.0055 μM); mientras que con ambas concentraciones evaluadas redujo la longitud

de fruto. En la variedad Jalapeño, la dosis baja de TI redujo significativamente la concentración foliar de K. En la variedad Poblano, el V incrementó el número de frutos por planta, rendimiento, longitud y ancho del fruto, y la concentración foliar de N; con la dosis baja de V aumentó también la concentración foliar de K en esta variedad. En la variedad Jalapeño, el V redujo rendimiento y concentración de N en hojas; la dosis baja de V evaluada redujo también de manera significativa el número de frutos por planta.

2.5. LITERATURA CITADA

- Aguilar-Meléndez A, Morrell PL, Roose ML, Kim SC. 2009. Genetic diversity and structure in semiwild and domesticated chiles (*Capsicum annuum*; Solanaceae) from Mexico. *American Journal of Botany*, 96(6): 1190-1202. doi:10.3732/ajb.0800155
- Alcántar GG, Sandoval VM. 1999. Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C. Publicación especial No. 10. Chapingo, México.
- Barceló J, Poschenrieder C. 1992. Respuestas de las plantas a la contaminación por metales pesados. *Suelo y Planta*, 2(2): 345-361.
- Cruz-Crespo E, Can-Chulim A, 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.
- Frías-Espericueta MG, Osuna-López I, Banuelos-Vargas I, López-López G, Muy-Rangel MD, Izaguirre-Fierro G, Rubio-Carrasco W, Meza-Guerrero PC, Voltolina D. 2009. Cadmium, copper, lead and zinc contents of the mangrove oyster, *Crassostrea corteziensis*, of seven coastal lagoons of NW Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 83(4): 595-599. doi: 10.1007/s00128-009-9828-z
- Gil J, Alvarez CE, Martinez MC, Perez N. 1995. Effect of vanadium on lettuce growth, cationic nutrition, and yield. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 30(1): 73-87.
- González Dávila O, Gómez-Bernal JM, Ruíz-Huerta EA. 2012. Plants and soil contamination with heavy metals in agricultural areas of Guadalupe, Zacatecas, Mexico. *In: Srivastava J (ed). Environmental Contamination. InTech. ISBN: 978-953-51-0120-8.*

- Iannacone O, Alvaríño F. 2005. Efecto ecotoxicológico de tres metales pesados sobre el crecimiento radicular de cuatro plantas vasculares. *Agricultura Técnica*, 65(2): 198-203.
- Maldonado VM, Rubio Arias HO, Quintana R, Saucedo RA, Gutierrez M, Ortega JA, Nevarez GV. 2008. Heavy metal content in soils under different wastewater irrigation patterns in Chihuahua, Mexico. *International journal of environmental research and public health*, 5(5): 441-449.
- Méndez JP, Ramírez CAG, Gutiérrez ADR, García FP. 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1): 29-44.
- Mills HA, Jones JBJr. 1996. *Plant Analysis Handbook II*. MicroMacro Publishing, Inc. Athens, Georgia, USA.
- Mozafariyan M, Shekari L, Hawrylak-Nowak B, Kamelmanesh MM. 2014. Protective role of selenium on pepper exposed to cadmium stress during reproductive stage. *Biological Trace Element Research*, 160: 97-107. doi: 10.1007/s12011-014-0028-2
- 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. doi: 10.1046/j.1439-037x.2000.00429.x
- Rascio N, Navari-Izzo F. 2011. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science*, 180(2): 169-181. doi:10.1016/j.plantsci.2010.08.016
- SAGARPA, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2015) Producción de chile mexicano. (25 de febrero de 2017). Disponible en línea en: <https://www.gob.mx/sagarpa/articulos/produccion-del-chile-mexicano>, consultado: julio 1, 2017.
- SAS Institute Inc. 2011. *SAS/STAT Users Guide*. Version 9.3. SAS Institute Inc., Cary, N. C., USA.
- SIAP. 2010 Un panorama del cultivo. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en línea en: <http://infosiap.siap.gob.mx/images/stories/infogramas/100705-monografia-chile.pdf>, consultado: julio 7, 2017.
- Singh A. 2013. Effect of Heavy Metal Cadmium on Growth and Yield of Pigeonpea. *International Journal for Scientific Research and Development*, 1(10): 2306-2314.
- Singh BB. 1971. Effect of vanadium on the growth, yield and chemical composition of maize (*Zea mays* L.). *Plant and Soil*, 34(1): 209-213. doi:10.1007/BF01372773
- Steiner AA. 1984. The universal nutrient solution. 6th international congress on soilless culture. Wageningen, Holanda. pp. 633-650

Wu F, Wu H, Zhang G, Bachir DM. 2004. Differences in growth and yield in response to cadmium toxicity in cotton genotypes. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 167(1): 85-90. doi: 10.1002/jpln.200320320