

Determinación de la capacidad de bioacumulación de cadmio en *Vicia faba* L. y su efecto en la raíz y el crecimiento vegetativo

Determination cadmium bioaccumulation capacity in *Vicia faba* L. and his effect on vegetative growth and the root

María Yesenia Sánchez-Zepeda<sup>1</sup>, Maritza López-Herrera<sup>2</sup>, Leticia Romero-Bautista<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica de Tecamac, Tecamac, Estado de México.

<sup>2</sup>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Centro de Investigaciones Biológicas.

NOTA SOBRE LOS AUTORES

María Yesenia Sánchez-Zepeda: [yessanchezzepeda@gmail.com](mailto:yessanchezzepeda@gmail.com)

Maritza López-Herrera: [maritzal@uaeh.edu.mx](mailto:maritzal@uaeh.edu.mx),  <https://orcid.org/0000-0002-1801-406X>

Leticia Romero-Bautista: [romerob@uaeh.edu.mx](mailto:romerob@uaeh.edu.mx),  <https://orcid.org/0000-0002-6343-4098>

Esta investigación fue financiada con recursos de los autores.

Los autores no tienen ningún conflicto de interés al haber hecho esta investigación.

Remita cualquier duda sobre este artículo a Maritza López-Herrera.

RESUMEN

Con el fin de fortalecer el uso del haba como bioensayo para estudios de monitoreo ambiental asociado con la presencia de cadmio, se evaluó la bioacumulación y el efecto de este contaminante en el crecimiento y ganancia de biomasa de raíz, tallo y hojas de plantas de haba (*Vicia faba* L.) var. Major desarrolladas en cultivo hidropónico y expuestas a una concentración de  $\text{CdSO}_4$  de 0.112 ppm; Los resultados muestran que la exposición al cadmio generó una disminución estadísticamente significativa en el crecimiento de la parte vegetativa, en la longitud de la raíz y en

la producción de biomasa en las plantas sometidas al contaminante; la raíz fue órgano en donde se acumuló la mayor parte del cadmio seguido de hojas y tallo. Las raíces mostraron un oscurecimiento y engrosamiento, muestra de un daño oxidativo, lo cual altera el funcionamiento del tejido radicular afectando la absorción de nutrientes, generando un pobre desarrollo de las plantas sometidas al contaminante. Evidenciándose que las respuestas biológicas de crecimiento y sintomatología de la raíz, pueden ser buenos biomarcadores de toxicidad al cadmio en plantas.

**Palabras clave:** Cadmio, *Vicia faba*, bioacumulación.

### ABSTRACT

In order to contribute to the use of broad beans to evaluate bioaccumulation and biological effect associated with exposure to cadmium, bioaccumulation and the effect of cadmium on growth and biomass gain in broad bean plants (*Vicia faba* L.) var. Major in root, stem and leaf samples, developed in hydroponic cultivation and exposed to a CdSO<sub>4</sub> concentration of 0.112 ppm; The results show that the exposure to cadmium generated a statistically significant decrease in the growth of the vegetative part, in the length of the root and in the biomass production in the plants subjected to the pollutant; the root was an organ where most of the cadmium accumulated followed by leaves and stem. The roots showed a darkening and thickening. The oxidative damage alters the functioning of the root tissue, affecting the absorption of nutrients, generating a poor development of the plants subjected to the pollutant. Evidenced that the biological responses of growth and root symptoms can be good biomarkers of toxicity for plants.

**Keywords:** Cadmium, *Vicia faba*, bioaccumulation.

### INTRODUCCIÓN

Los contaminantes ambientales, liberados por actividades antropocéntricas, entre los que se incluyen gases nocivos, pesticidas y metales pesados, representan una amenaza para la biota en todo el mundo. Entre estos, la contaminación por metales pesados de los suelos agrícolas es una seria amenaza ambiental que afecta a muchos procesos fisiológicos y metabólicos en las plantas, disminuyendo el crecimiento de las plantas (Adrees *et al.*, 2015; Keller *et al.*, 2015; Rizwan *et al.*, 2015).

Entre los metales pesados, el cadmio (Cd<sup>2+</sup>) es un elemento altamente peligroso con efectos fitotóxicos derivados de su gran solubilidad en el agua que además no tiene una función biológica en plantas y animales. La absorción de Cd<sup>2+</sup> por las plantas es un paso importante para la entrada de éste en la cadena alimentaria, su absorción y posterior bioacumulación en la planta

dependen de las características del metal y de las propiedades fisicoquímicas del suelo (Prieto *et al.*, 2009). El Cd<sup>2+</sup> es fácilmente asimilable por las raíces de las plantas y transportado a las hojas a través del xilema, la mayoría de las plantas son sensible a bajas concentraciones de este contaminante (Leita *et al.*, 1996).

El estrés por Cd<sup>2+</sup> también disminuye la absorción y distribución de elementos esenciales en plantas (Ahmad *et al.*, 2011; Hediji *et al.*, 2015). Al absorber las plantas este metal, la fitotoxicidad se expresa por la reducción de su crecimiento y elongación de las raíces, en parte debido a la interferencia de Cd<sup>2+</sup> con la nutrición mineral, debido a que dificulta la absorción y traslocación de elementos esenciales como Ca, Cu, Mn y Fe. Este contaminante causa inhibición de procesos fisiológicos tales como la fotosíntesis, respiración, elongación celular, relaciones hídricas de la planta y en la asimilación de nitrógeno, sulfuros y fosfatos, dando como resultado un pobre crecimiento y desarrollo de la planta (Mishra *et al.*, 2006).

A pesar de que este no es un metal redox activo, si puede causar estrés oxidativo en las plantas debido a la formación de especies reactivas de oxígeno (ROS) entre las que se incluyen el anión superóxido (O<sup>2-</sup>) y el peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), entre otras (Zhang *et al.*, 2009). Una sobreproducción de ROS puede causar desórdenes fisiológicos en las plantas que pueden dar como resultado una reducción en el crecimiento y la biomasa (Ahmad *et al.*, 2011; Saidi *et al.*, 2013; Arshad *et al.*, 2015; Farooq *et al.*, 2016).

El objetivo de esta investigación fue evaluar la capacidad de bioacumulación y el efecto del cadmio en el crecimiento y ganancia de biomasa en plantas de haba (*Vicia faba* L.) var. Major en muestras de raíz, tallo y hojas.

## METODOLOGÍA

Se utilizaron semillas certificadas de haba (*Vicia faba* L.) var. Major, mismas que se conservaron en un lugar fresco y seco hasta el inicio de la experimentación.

### Desarrollo del experimento

Se pusieron a germinar 36 semillas colocándolas en charolas de unicel entre dos capas de algodón humedecido en agua bajo condiciones controladas de laboratorio (25 ± 1° C, y en obscuridad), cuando la radícula alcanzó 1 cm de longitud, se trasplantaron a un sustrato inerte (peatmost, vermiculita y agrolita, 1:1:1) y fueron regadas con solución nutritiva comercial hasta que alcanzaron una longitud del tallo entre 15 y 20 cm; se seleccionaron 12 plántulas que fueron trasplantadas a un sistema hidropónico con solución nutritiva comercial; se usaron dos

contenedores (80 cm x 45 cm x 25 cm) con 6 plántulas cada uno, que contenían 23 l de solución; un contenedor se mantuvo solamente con solución nutritiva comercial, y al otro se le agregaron 92  $\mu$ l de solución de  $\text{CdSO}_4$  a una concentración de 0.112 ppm, valor límite establecido por la Norma Oficial Mexicana (NOM-001-ECOL-1996); ambos contenedores fueron monitoreados diariamente y la cantidad de solución nutritiva se mantuvo constante durante todo el periodo de experimentación (siete semanas, tiempo del desarrollo vegetativo de la planta).

Al término del periodo de experimentación, se cosecharon las 12 plantas, se separaron en raíz, tallo y hojas; se midió la longitud de los diferentes órganos de la planta con una cinta métrica y una regla graduada; se obtuvo además, el peso fresco y seco de la raíz, tallo y hojas, para lo cual las muestras se secaron en una estufa a 70° C por 72 h; este material se utilizó para determinar la ganancia de biomasa y la bioacumulación de  $\text{Cd}^{2+}$  en cada órgano de la planta.

A medida de determinar el efecto del contaminante en el desarrollo inicial del sistema radicular, se realizó un segundo experimento en donde se sometieron plántulas de *V. faba* con una altura de 15-20 cm a tres concentraciones de  $\text{CdSO}_4$  (0.028 ppm, 0.056 ppm, 0.112 ppm y un control). Las plantas se mantuvieron en condiciones controladas de laboratorio ( $25 \pm 1^\circ$  C, y en presencia de luz), por dos semanas, y se midió lo largo de la raíz primaria, desde la punta hasta el inicio del hipocótilo.

### Determinación de la bioacumulación del $\text{Cd}^{2+}$

La determinación de la bioacumulación del  $\text{Cd}^{2+}$  se realizó por medio de un Espectrofotómetro de Absorción Atómica de Flama (marca Perkin Elmer modelo PinAAcle 900T), se empleó una lámpara para  $\text{Cd}^{2+}$  con una longitud de onda de 228.8 nm; para las determinaciones se pesaron 2 gr de muestra vegetal (raíz, tallo y hojas) sometidas al contaminante y del testigo, se consideraron tres repeticiones de cada tejido.

Las determinaciones se realizaron en Laboratorio de Análisis y Monitoreo Ambiental del CIEMAD IPN (Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto Politécnico Nacional).

### Diseño experimental y estadístico

Se utilizó un diseño completamente al azar con dos tratamientos (testigo negativo y solución de 0.112 ppm de  $\text{CdSO}_4$ ) con tres repeticiones cada una. Los datos se analizaron mediante el programa estadístico Past 3.2. Se probó la normalidad de los datos con la prueba de Shapiro-Wilk y se realizó un ANOVA de una vía y una comparación múltiple de medias Tukey con una  $P < 0,05$ .

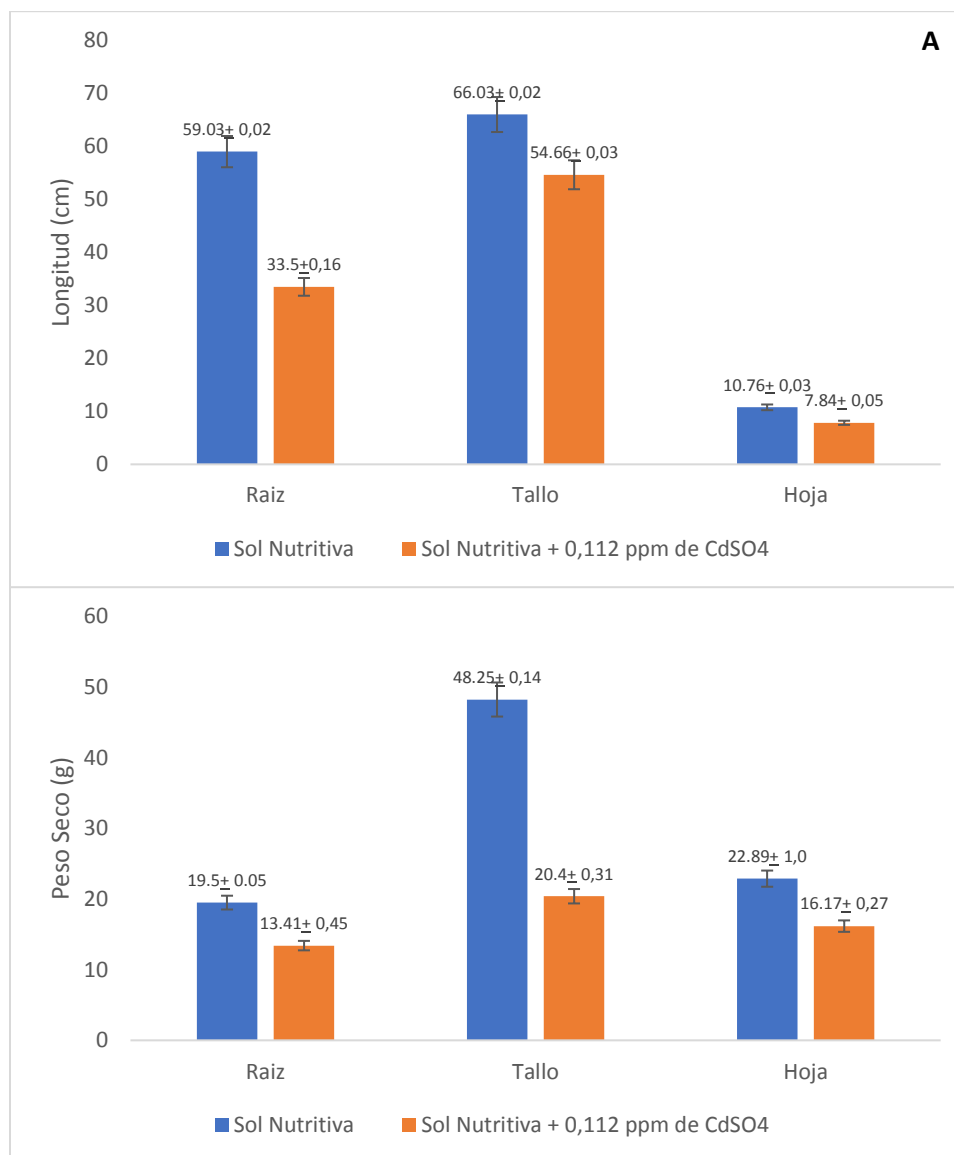
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis estadístico muestra diferencias significativas ( $P < 0.001$ ) en el crecimiento y biomasa entre las plantas sometidas al contaminante y el control. Las plantas sometidas al  $\text{Cd}^{2+}$  (0.112 ppm), presentaron una reducción importante en el crecimiento y la ganancia de biomasa por efecto del metal en los tres órganos evaluados (raíz, tallo y hojas), con respecto al control, el crecimiento de la raíz fue 43% menor, seguido del tallo (20%) y hoja (27%) (Figura 1 A y B), lo cual también se ve reflejado en el peso seco o ganancia de biomasa.

La acumulación de  $\text{Cd}^{2+}$  en los tejidos de las plantas puede causar alteraciones importantes en diversos procesos fisiológicos lo cual resulta en un pobre crecimiento, desarrollo y productividad de las plantas (Rodríguez-Serrano *et al.*, 2009; Siddiqui *et al.*, 2012). Esta inhibición del crecimiento puede ser una consecuencia de alteraciones en la tasa fotosintética y la asimilación de nutrientes esenciales generada por el  $\text{Cd}^{2+}$  (Benavides *et al.*, 2005; Kurtyka *et al.*, 2008).

Pramanik y colaboradores (2018) han documentado que uno de los efectos provocados por el cadmio en las plantas son las alteraciones fisiológicas y morfológicas como la inhibición de la germinación de semillas, el retraso en crecimiento de la raíz–brote y clorosis en hojas, entre otros. Se sabe también que las alteraciones bioquímicas pueden afectar el proceso de fotosíntesis, aumentar el estrés oxidativo, provocar interrupción de la actividad hormonal e interferencia en la absorción de oligoelementos esenciales y estimular la senescencia.

El cadmio inhibe la entrada, transporte y utilización de elementos esenciales (Ca, Mg, P y K) y del agua, lo que origina desequilibrios nutricionales e hídricos en la planta (Rodríguez *et al.*, 2008). Además, inhibe la formación de raíces laterales y provoca alteraciones en la raíz principal, haciendo que ésta se vuelva rígida y que tome una coloración marrón, lo que resulta en la reducción del crecimiento e incluso la muerte de la planta (Espanany *et al.*, 2015).



**Figura 1.** Longitud final de tallo, hojas y raíz (A) y peso seco (ganancia de biomasa) (B) de plantas de *Vicia faba* L. sometidas a solución nutritiva comercial, sin cadmio y solución nutritiva comercial adicionada con 0.112 ppm de CdSO<sub>4</sub>.

Altas concentraciones de Cd<sup>2+</sup> (100 mg Cd<sup>2+</sup> kg<sup>-1</sup>) disminuyen el área foliar y en contenido de materia seca además de la tasa fotosintética, conductancia estomática, el contenido de anhídrido carbónico, la actividad de la enzima nitrato reductasa y el contenido de N. Sin embargo, existe un incremento importante en el contenido y actividad de las enzimas antioxidantes tales como la superóxido dismutasa, catalasa, ascorbato peroxidasa y glutatión reductasa. La disminución en la actividad de la enzima nitrato reductasa y el contenido de N, mostró que el Cd<sup>2+</sup> afecta el metabolismo del nitrógeno de manera negativa (Rodríguez *et al.*, 2008).

El análisis estadístico mostró diferencias significativas ( $P < 0.001$ ) con respecto a la bioacumulación del  $\text{Cd}^{2+}$ , en los diferentes órganos de las plantas (raíz, tallo y hojas). Los resultados indican que el  $\text{Cd}^{2+}$ , se bioacumuló principalmente en la raíz de la planta ( $475.22 \text{ mg kg}^{-1}$ ), seguida de las hojas ( $7.8 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y el tallo ( $11.2 \text{ mg kg}^{-1}$ ) respectivamente, las concentraciones de  $\text{Cd}^{2+}$  en tallo, hoja fueron 98% y 92% menores que lo bioacumulado en raíz (figura 2). Es evidente que la raíz es el sitio de mayor bioacumulación mostrando a la vez una baja translocación del metal a la parte aérea.

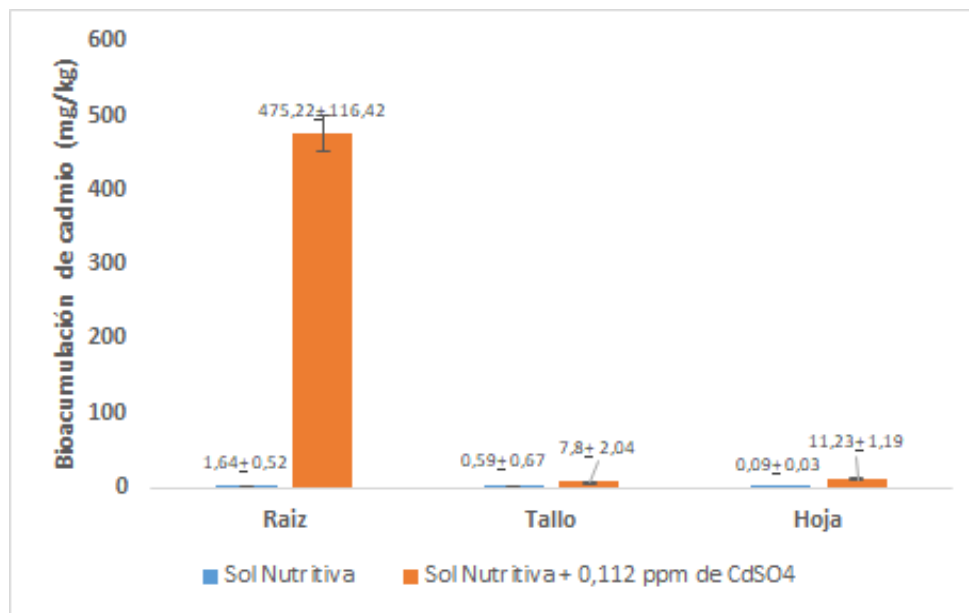


Figura 2. Bioacumulación de  $\text{Cd}^{2+}$ , en los diferentes órganos (tallo, hojas y raíces) de plantas de *Vicia faba* L., sometidas a dos concentraciones de  $\text{CdSO}_4$  (0.0 ppm y 0.112 ppm) durante siete semanas.

El  $\text{Cd}^{2+}$  se acumuló proporcionalmente a la concentración suministrada exógenamente en las raíces, además, es de suponer que esta bioacumulación está también relacionada con el tiempo al que fueron sometidas las plantas al contaminante. Según Rodríguez *et al.* (2008), la raíz actúa como una barrera de defensa de la planta ante la presencia del cadmio, lo cual se produce a través de la inmovilización de este metal por las pectinas de la pared celular, es decir, este órgano posee la capacidad de atrapar cadmio tratando de evitar que este se distribuya al resto de la planta, por esta razón la radícula se ve mayormente afectada por el cadmio.

El cadmio analizado se encontró tanto en las plantas sometidas a cadmio como en las que no se sometieron a él, estas últimas a una concentración muy baja ( $1.64 \text{ mg/Kg}$ ); el  $\text{Cd}^{2+}$ , aun

cuando no es un elemento esencial, puede encontrarse en la planta en bajas concentraciones ( $<1 \text{ mg kg}^{-1}$ ), siendo fácilmente absorbido y acumulado por las raíces, limitando su transporte a la parte aérea (Almagro *et al.*, 2015).

Lo anterior corrobora lo mencionado por Rodríguez y colaboradores en el 2008, en donde menciona que, de manera natural, el cadmio es capturado por la vacuola de las células acumulándose mayoritariamente en la raíz, solo una pequeña fracción es trasladada a la parte aérea de la planta distribuyéndose de manera decreciente en la estructura de la planta (tallos, hojas, frutos y semillas).

Un efecto atribuible a la contaminación por cadmio en las raíces fue un oscurecimiento y engrosamiento del tejido radicular e inhibición de la ramificación. Estas siete semanas que se mantuvieron las plantas sometidas al contaminante ( $\text{CdSO}_4$ ) provocaron los síntomas conocidos y relacionados con alta toxicidad en las raíces de *V. faba*, estos síntomas consisten en un fuerte pardeamiento, engrosamiento del tejido radicular e inhibición de la ramificación (Figura 3). Las raíces laterales también se vieron afectadas en términos de tamaño y color.

Esta característica que se observa en las raíces ya ha sido mencionada en otros trabajos realizados con *V. faba* en donde plántulas de esta especie se sometieron a diferentes concentraciones de cadmio durante 48 h, observándose al final del experimento este oscurecimiento característico (Pedrosa *et al.*, 2011; Souguir *et al.*, 2011), según Sharma y colaboradores (2012) estas características pueden ser síntoma de un proceso oxidativo generado por la presencia de los metales en las plantas que favorece la generación de ROS (Especies Reactivas de Oxígeno) y una alta concentración de estas genera una peroxidación de los lípidos de la membrana celular, la oxidación de proteínas y una inhibición enzimática, lo cual justificaría nuevas líneas de investigación para comprobarlo.

El cadmio como metal es capaz de unirse a los grupos sulfhídricos de las proteínas, inhibiendo su actividad o generando la ruptura de su estructura; además, puede desplazar elementos esenciales para las plantas como el Fe, Mg, Mn y Ca generando especies reactivas de oxígeno (ROS), lo cual provoca la obstrucción de las funciones fisiológicas y bioquímicas de las células (Pedrosa *et al.*, 2011; García *et al.*, 2012; Méndez-Hurtado *et al.*, 2013; Pernía, 2013). Como consecuencia de esto se observa también una reducción en el alargamiento de la raíz, posiblemente relacionado con la disminución de la actividad del meristemo apical y el alargamiento celular.





**Figura 3.** Plantas de *V. faba* L. en cultivo hidropónico sometidas a 0.112 ppm de  $\text{CdSO}_4$  (izquierda) y el control (derecha) (A), síntomas del efecto del  $\text{Cd}^{2+}$  en la raíz sometida a 0.112 ppm (B) y control (C).

Se ha destacado la afinidad que tienen los metales pesados, como principales ligandos, por grupos sulfhidrilos, radicales amino, fosfato, carboxilo e hidroxilo, el resultado de estas uniones ligando-metal puede ser muy perjudicial para la célula, por una lado provocan una acción genérica sobre proteínas por inhibición de la actividad o por disrupción en la estructura de las mismas, lo cual puede promover el desplazamiento de elementos esenciales de su metabolismo estándar, produciendo efectos de deficiencia, y finalmente este tipo de uniones favorece la catálisis de reacciones de generación de moléculas ROS (Especies Reactivas de Oxígeno) o radicales libres que provocan fenómenos de estrés oxidativo, todo esto en conjunto, generaría un menor crecimiento y desarrollo de las plantas, aunado a esto, se sabe que el  $\text{Cd}^{2+}$ , puede llegar a

sustituir el átomo de Mg, que forma parte de la molécula de clorofila, trayendo como consecuencia una disminución en la actividad fotosintética afectando la producción de biomasa de las plantas expuestas al contaminante (Navarro-Aviña *et al.*, 2007; He *et al.*, 2008).

En el segundo ensayo realizado, en donde se evaluó el crecimiento inicial de la raíz en tres concentraciones de Cd<sup>2+</sup> (0.028, 0.056 y 0.112 ppm) se observó que en la concentración más baja, el crecimiento radicular fue mayor que en el testigo, lo cual podría indicar que el Cd<sup>2+</sup> en bajas concentraciones puede promover la elongación y división celular; lo contrario sucede con las raíces sometidas a las restantes concentraciones (0.056 y 0.112 ppm) en donde se observa una disminución del crecimiento comparado con el testigo (figura 4), pues se mantuvieron a lo largo de las dos semanas de tratamiento, con un promedio de crecimiento por debajo de los niveles del testigo (6.09 y 5.08 cm respectivamente) (Figura 4).

En un trabajo realizado con plántulas de diferentes variedades de arroz y lenteja, expuestas a 0,25, 0,5 y 1 mg/L de Cd<sup>2+</sup> se observó un estímulo de crecimiento en plántulas expuestas a bajas concentraciones de Cd<sup>2+</sup> obteniendo inclusive longitudes superiores al control (Añazco, 2019). Pramanik *et al.* (2018) encontró un comportamiento similar en arroz mencionando que la absorción de bajas concentraciones de cadmio en arroz estimulaba el crecimiento de las plántulas.

Los resultados de esta investigación se corroboran con lo mencionado por estos autores, en donde la concentración más baja de cadmio promovió un incremento en el crecimiento. Ciertas plantas poseen la capacidad de tolerar el cadmio a bajas concentraciones sin mostrar ningún síntoma de toxicidad (Chávez *et al.*, 2015).

En esta investigación, se observa un mayor crecimiento de la raíz en plántulas sometidas a bajas concentraciones de cadmio (0.028 ppm), lo que hace suponer que a esa concentración el contaminante es un estimulador del crecimiento; este comportamiento de la plántula de haba puede describirse como un efecto de hormesis, el cual se interpreta como un estímulo del crecimiento de las plántulas expuestas a bajas concentraciones y una inhibición para aquellas plántulas expuestas a mayores concentraciones (Belz *et al.*, 2018)

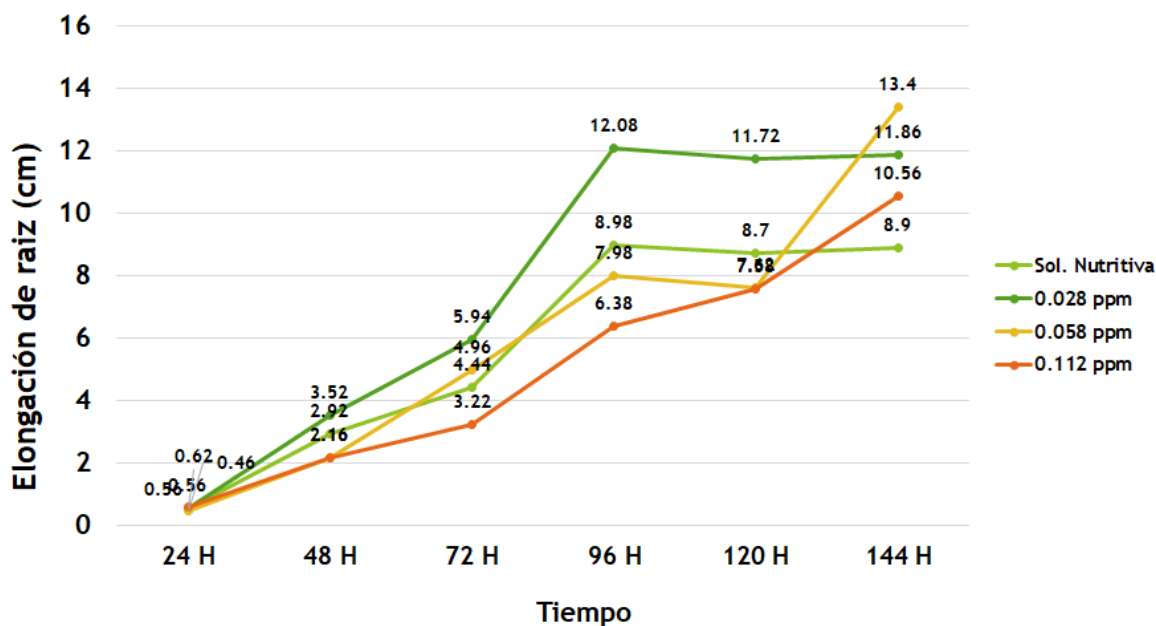


Figura 4. Elongación de la raíz de plántulas de *V. faba*, desarrolladas en cultivo hidropónico con tres concentraciones de  $\text{CdSO}_4$  (0.028, 0.056 y 0.112 ppm) a lo largo de 144 h (dos semanas).

## CONCLUSIÓN

La raíz fue el órgano en donde se acumuló la mayor parte del cadmio seguido de hojas y tallo, como resultado de esto, las raíces presentaron una alteración morfológica, adquiriendo una coloración oscura y un engrosamiento del tejido, lo cual es indicativo de un daño oxidativo generado por la presencia de ROS (especies reactivas de oxígeno).

El efecto del  $\text{Cd}^{2+}$  sobre las proteínas de la membrana celular promueve el desplazamiento de elementos esenciales en la planta, produciendo efectos de deficiencia, afectando la capacidad de absorción de nutrientes lo que se ve reflejado en un bajo desarrollo de la planta y una disminución en la biomasa total.

Estas respuestas biológicas (crecimiento y sintomatología de la raíz) pueden ser buenos biomarcadores de toxicidad para plantas expuestas al  $\text{Cd}^{2+}$  y ser propuestas como una herramienta para estudios de monitoreo ambiental.

## AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial al Ing. Evanibaldo González Gómez, por su invaluable apoyo en los análisis de bioacumulación realizados en el CIEMAD-IPN.

## REFERENCIAS

- Adrees, M., Ali, S., Iqbal, M., Bharwana, S.A., Siddiqi, Z., Farid, M., Ali, Q., Saeed, R., Rizwan, M., 2015. Mannitol alleviates chromium toxicity in wheat plants in relation to growth, yield, stimulation of anti-oxidative enzymes, oxidative stress and Cr uptake in sand and soil media. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 122: 1–8.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.07.003>
- Ahmad, P., Nabi, G., Ashraf, M., 2011. Cadmium-induced oxidative damage in mustard [*Brassica juncea* (L.) Czern. & Coss.] plants can be alleviated by salicylic acid. *South African Journal of Botany* 77: 36–44.  
<https://doi.org/10.1016/j.sajb.2010.05.003>
- Almagro, L., Segura-Reinaldos A.M., Pedreño M.A., Bernal M.P. 2015. Tolerancia y acumulación de metales pesados y As en diferentes especies de *Cistus* L. *Anales de Biología* 37:143-153.  
<https://doi.org/10.6018/analesbio.37.16>
- Añazco, K.V.R. 2019. Efecto del cadmio sobre la germinación y crecimiento de *Lens culinaris* Medik. (Lenteja), *Oryza sativa* (Arroz) y *Phaseolus vulgaris* L. (Frejol). Tesis de Licenciatura, Universidad de Guayaquil, Colombia. 89 p.
- Arshad, M., Ali, S., Noman, A., Ali, Q., Rizwan, M., Farid, M., Irshad, M.K. 2015. Phosphorus amendment decreased cadmium (Cd) uptake and ameliorates chlorophyll contents, gas exchange attributes, antioxidants and mineral nutrients in wheat (*Triticum aestivum* L.) under Cd stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*.  
<http://dx.doi.org/10.1080/03650340.2015.1064903>
- Belz, R., Patama, M. y Sinkkonen, A. 2018. Low doses of six toxicants change plant size distribution in dense populations of *Lactuca sativa*. *Science of the Total Environment*, 510-523.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.336>
- Benavides, M.P., Gallego, S.M., Tomaro, M. 2005. Cadmium toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17: 21–34.
- Chávez, E., He, Z., Stoofella, P., Mylavarapu, R., Li, Y. y Moyano, B. 2015. Concentration of cadmium in cacao beans and its relationship with soil cadmium in southern Ecuador. *Science of the Total Environment*, 533: 205-214.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.106>
- Espanany, A., Fallah, S., Tadayyon, A. (2015). Seed priming improves seed germination and reduces oxidative stress in black cumin (*Nigella sativa*) in presence of cadmium. *Industrial Crops and Products*.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.11.016>

- Farooq, M.A., Ali, S., Hameed, A., Bharwana, S.A., Rizwan, M., Isgaque, W., Farid, M., 2016. Cadmium stress in cotton seedling: physiological, photosynthesis and oxidative damage alleviated by glicinbetaine. *South African Journal of Botany*, 104: 61-68.  
<https://doi.org/10.1016/j.sajb.2015.11.006>
- García, E. G., García, E. N., Juárez, L. F. S., Juárez, L.S., Montiel, J. M. R. G., Gómez, M. A. C. 2012. La respuesta de haba (*Vicia faba* L.) cultivada en un suelo contaminado con diferentes concentraciones de cadmio. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 28 (2): 119-126.
- He, J. Y., Ren, Y.F., Hu, C.Z., Yan, Y. P., Jiang, D.A. 2008. Effect of Cd on growth, photosynthetic gas exchange, and chlorophyll fluorescence of wild and Cd sensitive mutant rice. *Photosynthetica* 46: 466-470.  
<https://doi.org/10.1007/s11099-008-0080-2>
- Hediji, H., Djebali, W., Belkadhi, A., Cabasso, C., Moing, A., Rolin, D., Brouquiss, R., Gallusci, P., Chaïbi, W. 2015. Impact of long-term cadmium exposure on mineral content of *Solanum lycopersicum* plants: Consequences on fruit production. *South African Journal of Botany* 97: 176–181.  
<https://doi.org/10.1007/s00425-014-2220-1>
- Keller, C., Rizwan, M., Davidian, J.C., Pokrovsky, O.S., Bovet, N., Chaurand, P., Meunier, J.D. 2015. Effect of silicon on wheat seedlings (*Triticum turgidum* L.) grown in hydroponics under Cu stress. *Planta* 241, 847–860.  
<https://doi.org/10.1007/s00425-014-2220-1>
- Kurtyka, R.; Małkowski, E.; Kita, A.; Karcz, W. 2008. Effect of calcium and cadmium on growth and accumulation of cadmium, calcium, potassium and sodium in maize seedlings. *Polish J. Environ. Stud.*, 17: 51–56.
- Leita, L., de Nobili, M., Cesco, C., Mondini, C. 1996. Analysis of intercellular cadmium forms in roots and leaves of bush bean. *Journal Plant Nutrition*, 19: 527–533.  
<https://doi.org/10.1080/01904169609365140>
- Mishra, S., Srivastava, S., Tripathi, R.D., Govindarajan, R., Kuriakose, S.V., Prasad, M.N.V. 2006. Phytochelatin synthesis and response of antioxidants during cadmium stress in *Bacopa monnieri* L. *Plant Physiology Biochemistry*, 44: 25–37.  
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2006.01.007>
- Méndez-Hurtado, A., Rangel-Mendez, R., Yáñez-Espinoza, L., Flores, J. 2013. Tolerance cadmium of agave lechuguilla (Agavaceae) seeds and seedlings from sites contaminated with heavy

- metals. The Scientific World Journal. Article ID 167834, 11 pages. doi:10.1155/2013/167834
- Navarro-Aviña, J.P., Aguilar, I.A., López-Moya, J.R. 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas*, 16(2): 1-17.
- Norma Oficial Mexicana (NOM-001-ECOL- 1996). Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales, DOF 06/01/1997. [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4863829&fecha=06/01/1997](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4863829&fecha=06/01/1997). Consultado: 25 de febrero 2018.
- Pedrosa, G. M., Lara Lanza de Sá e Melo Marques, T. C., Goncales, N. M de O., De Castro, E. M., Soares, A. M. 2011. Ecophysiological and anatomical changes due to uptake and accumulation of heavy metal in *Brachiria decumbens*. *Science Agricola* 68(5) p. 566-573. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162011000500009>
- Pernía, B. 2013. Respuestas a la exposición al cadmio y su tasa de acumulación en plantas de *Amaranthus lividus*, *Phaseolus vulgaris* y *Wedelia trilobata* (Tesis doctoral). Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162011000500009>
- Pramanik, K., Mitra, S., Sarkar, A., Kanti, T. 2018. Alleviation of phytotoxic effects of cadmium on rice seedlings by cadmium resistant PGPR strain *Enterobacter aerogenes* MCC 3092. *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.03.009>
- Prieto, M. J., González, R. C. A., Román, G. A. D., Prieto, G. F. 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10, 29-44.
- Rizwan, M., Meunier, J.D., Davidian, J.C., Pokrovsky, O.S., Bovet, N., Keller, C. 2015. Silicon alleviates Cd stress of wheat seedlings (*Triticum turgidum* L. cv. Claudio) grown in hydroponics. *Environmental Science and Pollution Research* <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-015-5351-4>
- Rodríguez, M., Martínez, N., Romero, M., Del Río, L., Sandalio, L. 2008. Toxicidad del cadmio en plantas. *Ecosistemas*, 17(3), 139-146.
- Rodríguez-Serrano, M.; Romero-Puertas, M.C.; Pazmiño, D.M.; Testillano, P.S.; Risueño, M.C., del Río, L.A., Sandalio, L.M. 2009. Cellular response of pea plants to cadmium toxicity: Cross.



talk between reactive oxygen species, nitric oxide, and calcium. *Plant Physiology*, 150: 229–243.

<https://doi.org/10.1104/pp.108.131524>

Saidi, I., Ayouni, M., Dhieb, A., Chtourou, Y., Chaïbi, W., Djebali, W. 2013. Oxidative damages induced by short-term exposure to cadmium in bean plants: Protective role of salicylic acid. *South African Journal of Botany* 85: 32–38.

<https://doi.org/10.1016/j.sajb.2012.12.002>

Sharma, P., Bhushan, A.J., Dubey, R.S., Pessaraki, M. 2012. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. *Journal of Botany*.

<https://doi.org/doi:10.1155/2012/217037>

Siddiqui, M.H., Al-Whaibi, M.H., Sakran, A.M., Basalah, M.O., Ali, H.M. 2012. Effect of calcium and potassium on antioxidant system of *Vicia faba* L. under cadmium stress. *Journal Molecular Science*, 13: 6604-6619.

<https://doi.org/10.3390/ijms13066604>

Souguir, D., Ferjani, E., Ledoigt, G., Goupil, P. 2011. Sequential effects of cadmium on genotoxicity and lipoperoxidation in *Vicia faba* roots. *Ecotoxicology*, 20: 329–336.

<https://doi.org/10.1007/s10646-010-0582-0>

Zhang, F.Q., Zhang, H.X., Wang, G.P., Xu, L.L., She, Z.G. 2009. Cadmium-induced accumulation of hydrogen peroxide in the leaf apoplast of *Phaseolus aureus* and *Vicia sativa* and the roles of different antioxidant enzymes. *Journal of Hazardous Materials* 168: 76–84.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.002>

Copyright (c) 2021 María Yesenia Sánchez-Zepeda, Maritza López-Herrera y Leticia Romero-Bautista.



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para **Compartir** —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y **Adaptar** el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

**Atribución:** Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)