

**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE BIOLOGÍA**



Determinación de la capacidad fitorremediadora de  
*Lupinus mutabilis* Sweet “chocho o tarwi” en suelos  
contaminados con cadmio (Cd).

Tesis para optar el Título Profesional de  
Licenciada en Biología

Luisa Fernanda Maguiña Castillo

Lima - Perú  
2017

## **DEDICATORIA**

A las dos personas más influyentes en mi vida, mi mamá Claudia, quien además de su rol de mamá siempre es mi amiga y a mi mamá Violeta quien siempre me ha apoyado en todo, gracias a las dos por todo su amor y todas sus enseñanzas, las amo son las mujeres más valientes y dedicadas que conozco.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, siempre a Dios, quien puso en mi vida a tantas personas buenas y por enseñarme que cada día es un regalo.

Gracias a mis padres Juan Carlos y Claudia, por siempre alentarme a cumplir mis metas, por su preocupación, confianza y amor. A mi hermanito Sebas, por siempre sacarme una sonrisa.

A mi abuela Violeta y mi tía Marina por siempre tener un consejo para mí, por todo su amor desde que era niña.

A Carlos Lu por su apoyo incondicional y su confianza.

A mi asesor de tesis, Ph D. Mauro Quiñones por sus recomendaciones y asesorías durante todo el desarrollo de la tesis.

A los profesores de mi facultad, profesor Puicon, profesora Haydee Montoya, profesora Flor de María, profesora Lidia Cruz, por el tiempo invertido en este trabajo y por sus consejos para ayudarme a mejorar el mismo.

Al Centro de Investigación de la Universidad Ricardo Palma, el cual ayudo con el financiamiento de este proyecto de tesis.

Mis compañeros de laboratorio, mis amigos de promoción de universidad, por su aliento y su compañía durante todas las etapas de este trabajo.

## ÍNDICE

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	6
2. CAPÍTULO II: ANTECEDENTES .....	8
2.1 Generalidades de <i>Lupinus mutabilis</i> Sweet .....	8
2.2 Biorremediación.....	12
2.3 Contaminación de suelos y cadmio.....	16
3. CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS .....	22
3.1 Lugar de investigación.....	22
3.2 Germinación de semillas.....	22
3.3 Establecimiento de los tratamientos con cadmio en el invernadero ..	23
3.5 Análisis morfológico e histológico.....	24
3.6 Índice de tolerancia.....	26
3.7 Análisis de Cd por espectrofotometría de absorción atómica.....	27
4. CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....	28
4.1 Germinación de semillas.....	28
4.2 Tasa de supervivencia.....	28
4.3 Análisis morfológico .....	29
4.4 Análisis histológico.....	43
4.5 Índice de tolerancia.....	46
4.6 Análisis de Cd por espectrofotometría de adsorción atómica.....	47
5. CAPÍTULO V: DISCUSIÓN.....	49
5.1 Germinación de semillas.....	49
5.2 Tasa de supervivencia.....	50
5.3 Análisis morfológico .....	51
5.4 Análisis histológico.....	53
5.5 Índice de tolerancia.....	54
5.6 Análisis de espectrofotometría de absorción atómica de llama.....	55
6. CONCLUSIONES .....	57
7. RECOMENDACIONES .....	59
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	60
9. ANEXOS.....	68

## RESUMEN

Las actividades antropogénicas ocasionan el incremento de metales pesados en los suelos, para mitigar esta contaminación se vienen implementando métodos como la fitorremediación. El objetivo de la investigación fue determinar la capacidad fitorremediadora de *Lupinus mutabilis* Sweet en suelos contaminados con cadmio. Los ensayos se realizaron en un invernadero bajo condiciones controladas. Las plantas fueron sometidas a cuatro tratamientos: T<sub>1</sub> – 4 mg, T<sub>2</sub> – 8 mg, T<sub>3</sub> – 12 mg, T<sub>4</sub> – 16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L respectivamente y un control T<sub>0</sub>, aplicados en diferentes periodos. El efecto del cadmio a nivel morfológico fue determinado evaluando el daño ocasionado en la raíz, tallos y foliolos. Los cortes histológicos fueron realizados en un micrótomo manual Leica, la tinción desarrollada con hematoxilina-eosina y luego fueron visualizados en un microscopio ocular Leica. La tasa de supervivencia se calculó mediante la relación entre el número de plantas en un determinado tiempo y el número de plantas iniciales. El índice de tolerancia se obtuvo mediante la proporción de la biomasa del vástago de las plantas tratadas y la biomasa del vástago de las plantas control. La concentración de cadmio en la planta y el sustrato se obtuvo mediante espectrofotometría de absorción atómica de llama. La mayor acumulación de cadmio fue de 3.13 mg/kg en las raíces, 0.15 mg/kg en tallo y 0.13 mg/kg en foliolos, en el tratamiento T<sub>4</sub>, donde también se evidenció la mayor reducción de cadmio en el sustrato. El efecto morfológico e histológico fue notorio en el sistema radicular a los 20 días de exposición mientras que en el tallo y los foliolos a los 50 días de exposición. El índice de tolerancia se determinó en un rango entre 68.29% (T<sub>1</sub>) y 28.36% (T<sub>4</sub>). La tasa de supervivencia más baja fue de 0.33 en el tratamiento T<sub>4</sub>. El índice de tolerancia, la tasa de supervivencia y el efecto del cadmio a nivel morfológico e histológico, demostraron que existe una capacidad fitorremediadora reducida, la cual se ve afectada con el aumento del cadmio.

**Palabras clave:** Fitorremediación, *Lupinus mutabilis* Sweet “chocho o tarwi”, cadmio (Cd).

## ABSTRACT

The anthropogenic activities cause the increase of heavy metals in the soils, to mitigate this contamination are being implemented methods such as phytoremediation. The objective of the research was to determine the phytoremediative capacity of *Lupinus mutabilis* Sweet in soils contaminated with cadmium. The tests were carried out in a greenhouse under controlled conditions. The plants were submitted to four treatments: : T<sub>1</sub> – 4 mg, T<sub>2</sub> – 8 mg, T<sub>3</sub> – 12 mg, T<sub>4</sub> – 16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L respectively and a T<sub>0</sub> control, applied at different periods. The effect of cadmium at morphological level was determined by evaluating the damage caused on roots, stems and leaflets. The histological sections were performed on a Leica microtome, the staining developed with hematoxylin-eosin and then visualized on a Leica ocular microscope. The survival rate was calculated by the ratio between the number of plants in a certain time and the number of initial plants. The tolerance index was obtained by the proportion of the biomass of the stem of the treated plants and the biomass of the stem of the control plants. The concentration of cadmium in the plant and the substrate was obtained by flame atomic absorption spectrophotometry. The highest accumulation of cadmium was 3.13 mg/kg in the roots, 0.15 mg/kg in stem and 0.13 mg/kg in leaves, in the T<sub>4</sub> treatment, where also showed the greatest reduction of cadmium in the substrate. The morphological and histological effect was notorious in the root system at 20 days of exposure while in the stem and leaflets at 50 days of exposure. The tolerance index was determined between 68.29% (T<sub>1</sub>) and 28.36% (T<sub>4</sub>). The lowest survival rate was 0.33 in the T<sub>4</sub> treatment. The tolerance index, the survival rate and the effect of cadmium at the morphological and histological level showed that there is a reduced phytoremediative capacity, which is affected by the increase of cadmium.

**Key words:** Phytoremediation, *Lupinus mutabilis* Sweet “chocho o tarwi”, cadmium (Cd).

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El incremento de las actividades agrícolas, industriales y urbanas vienen produciendo diversos problemas ambientales por el incremento de metales pesados presentes en los suelos. Entre estos se encuentra el cadmio, utilizado como componente principal en los fertilizantes fosfóricos, y que, en pequeñas concentraciones, llega a ser uno de los elementos más contaminantes para el ambiente y tóxico para la salud.

La acumulación del cadmio en los suelos es un problema agroindustrial con alta incidencia en Perú, ya que los cultivos absorben y acumulan este compuesto en sus frutos y/o semillas haciendo que estos no cumplan con los estándares de calidad para consumo y exportación, debido a que este elemento ocasiona efectos negativos en la salud afectando órganos como los riñones y pulmones.

Para el control de la contaminación de cadmio en los suelos se utilizan tratamientos químicos o físicos, los cuales son costosos, requieren de mucha inversión, y son de alto consumo de energía. Actualmente se viene desarrollando a nivel mundial una alternativa más amigable con el ambiente y mucho más rentable; la remediación utilizando plantas silvestres o cultivadas, conocida como fitorremediación, que consiste en acumular, estabilizar, degradar y/o volatilizar los metales pesados de los suelos, mitigando así la contaminación ambiental y reduciendo la concentración de sustancias peligrosas en los productos agrícolas.

Numerosos estudios vienen demostrando la capacidad fitorremediadora de diversas especies de leguminosas, entre ellas el género *Lupinus*, que además de mejorar la fertilidad de los suelos por su capacidad de fijar nitrógeno atmosférico, acumula metales pesados en diferentes órganos de la planta, permitiendo la disminución de contaminantes en los suelos.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo evidenciar la capacidad fitorremediadora de *Lupinus mutabilis* Sweet “chocho o tarwi” en suelos contaminados con cadmio, mediante el análisis de distribución del contaminante en los diferentes órganos de la planta.

## CAPÍTULO II: ANTECEDENTES

### 2.1 Generalidades de *Lupinus mutabilis* Sweet

#### 2.1.1 Taxonomía y distribución

*Lupinus mutabilis* Sweet tiene distintos nombres comunes dependientes de la región donde se encuentre como chocho, chochito, tarwi, tarhui y ccequilla. (Jacobsen et al. 2006). Taxonómicamente pertenece a:

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Fabales

Familia: Fabaceae

Subfamilia: Papilionoideae

Género: *Lupinus* (Sbabou, 2010)

Especie: *Lupinus mutabilis* Sweet (1852)

Esta especie tiene una amplia distribución, sin embargo su centro de origen está ubicado en la región andina de Ecuador, Perú y Bolivia, ya que en ellas se encuentra la mayor variabilidad genética (Jacobsen et al. 2006). Debido a esta variabilidad, en la actualidad existe una problemática en relación a la definición taxonómica, ya que existen diversas hibridaciones interespecíficas como resultado del alto nivel de cruzamiento libre de estas especies (Tapia y Fries 2007), por lo que es indispensable una nueva definición taxonómica

(Camarena et al. 2012) y más estudios de la planta a nivel molecular (Chirinos-Arias 2015).

El consumo de semillas de tarwi aumenta de forma masiva a partir de la década del 90 en Perú, y resulta una actividad económica significativa por la diferencia del valor del producto y el precio de venta del mismo (Olórtegui et al. 2010), y con esto se fue descubriendo poco a poco las propiedades de esta planta.

La asamblea General de las Naciones Unidas proclamó el año 2016 como año Internacional de las Legumbres, lo que incentiva a realizar investigaciones y proyectos a fin de potencializar el valor de estas plantas, dando énfasis no solo en todas las propiedades nutricionales y agrológicas que posee sino también apreciando que es una especie nativa con otros potenciales aún desconocidos en nuestro país (Jorge 2016).

### **2.1.2 Características**

*Lupinus mutabilis* Sweet es una planta de tipo arbustivo generalmente anual, que puede alcanzar desde 0.8 m hasta más de dos metros de altura.

La germinación empieza entre 8 a 10 días después de la colocación de las semillas en tierra fértil, sin embargo esta germinación se ve afectada por la dormancia de la semilla, para la cual se han implementado diferentes métodos de inhibición teniéndose métodos como escarificación manual (Chico-ruiz et al. 2012) (Tapia et al. 2014), HCl (Orozco-cardona et al. 2010), H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Suarez y Melgarejo 2010) luz UV (Flores-córdova et al. 2016), shock térmico con agua caliente, aunque este tendría un efecto adverso si se emplean temperaturas muy altas siendo muy agresivo para el embrión aumentando la respiración y reduciendo las reservas (Muñoz et al. 2004) (Sanabria et al. 2001); y el uso de fitohormonas

(Barceló Col et al. 2008) (Mandujano et al. 2007) (Villalobos et al. 1992), donde además se menciona que este efecto no solo sería hormonal sino también hace que las membranas celulares sean más permeables a otras sustancias como el agua (De la Cuadra 2011).

La raíz se caracteriza por ser de bastante grosor y pivotante, además de presentar gran número de nódulos, pesando cada uno de estos 50 gr. por planta, los cuales son formados por bacterias *Rhizobium* que penetran por los pelos radiculares (Núñez 2000). La planta proporciona a la bacteria compuestos carbonados como fuente de energía y un entorno protector, a cambio recibe nitrógeno en una forma utilizable para la formación de proteínas. Esta simbiosis es específica en cada especie de leguminosa y bacteria (Gonzales 2002). Existen estudios que revelan que la bacteria específica asociada a *Lupinus mutabilis* Sweet es *Bradyrhizobium* (Lezama et al. 2014).

En la mayoría de las variedades hay un tallo único de forma cilíndrica, ligeramente aplanado, pero hay una alta variación en las ramificaciones que presenta, siendo en algunos casos escasos y en otros abundantes. Las hojas tienen forma de láminas de tipo digitado con un número variable de folíolos de 5 a 12, oblongos. Las flores se presentan en forma verticilada a modo de inflorescencia. El fruto está constituido por una vaina, con un tamaño variable entre 4-15 mm. (Tapia y Fries 2007).

Las plantas crecen desde los 1,350 hasta los 3,800 metros de altitud, con períodos vegetativos variables entre cuatro y ocho meses, según microclimas, variedades genéticas y manejo agronómico (Ceroni 2003) (Camarena 2015). Algunos estudios muestran que los ecotipos cultivados cerca de la línea ecuatorial y en los valles son más tardíos, mientras que aquellos cultivados a

mayor latitud y en las regiones más altas como el Altiplano son precoces (Tapia y Fries 2007).

La mayor tasa de supervivencia de estas plantas se da cuando el cultivo se encuentra en condiciones óptimas, pero a medida que los requerimientos de la planta disminuyen y/o agentes contaminantes aparecen, esta medida se reduce. Este índice de supervivencia es esencial en estudios de investigación, donde se toma en cuenta el número total de individuos y el número de individuos que sobreviven en un momento T (Arribalzaga 2007).

El lupino andino se adapta bien a suelos con textura gruesa, igualmente crece bien en suelos salinos de laderas y baja fertilidad. En suelos orgánicos el crecimiento se ve estimulado, retardándose la floración. En suelos arcillosos con poca aeración y mal drenaje, la asociación con *Rhizobium* se reduce (Tapia y Fries 2007).

*Lupinus mutabilis* “chocho” o “tarwi” es el cultivo leguminoso más valioso del Perú y posiblemente del mundo, por contener 44-47% de proteínas, 20-22% de aceite y una apreciable cantidad de alcaloides que dan cierto sabor amargo a los granos, pero que, una vez extraídos de éstos, mediante remojo y lavado, sirven para preparar excelentes controladores de plagas (Jorge 2016).

Una de sus más valiosas peculiaridades agronómicas es que en la raíz presenta un gran número de nudos formados por bacterias *Rhizobium*, las cuales pueden fijar nitrógeno del aire, aportando entre 40 - 80 kg/ha de nitrógeno (Tapia y Fries 2007). La fijación del nitrógeno, hace que la fertilidad de los suelos mejore sin necesidad de aplicar fertilizantes nitroquímicos, lo cual permite un ahorro en los costos de producción del cultivo (Jorge 2016)

## **2.2 Biorremediación**

Los procesos biotecnológicos que buscan proteger al ambiente vienen siendo usados por más de cien años, incluso antes de que se empleara el término “biotecnología” y uno de los más utilizados para remediar los suelos contaminados son los tratamientos biológicos o biorremediadores (Durant y Bennett 1999).

Este tratamiento remediador emplea sistemas biológicos para contrarrestar la contaminación en el aire, agua y/o suelos, ya sea por metales pesados como Cd, Cu, Zn, Ni, Co, Cr, Pb y As o por residuos peligrosos como relaves mineros, rellenos sanitarios y contaminantes producto de las actividades antropogénicas (Yadav 2010) (Rusyniak et al. 2012).

Esta tecnología presenta una ventaja amplia sobre las otras tecnologías (físicoquímicas y térmicas) por ser de bajo costo, efectiva, favorecedora con el ambiente y no necesitar de tratamientos posteriores (Sepúlveda y Trejo 2002).

Si la remediación se efectúa por medio de microorganismos como bacterias y hongos, se denomina remediación microbiana, mientras que, si se emplean plantas, se denomina fitorremediación. Existe además la degradación enzimática, la cual emplea enzimas en cantidades industriales a partir de bacterias que las producen naturalmente o que son modificadas genéticamente (Di Paola y Vicién 2010).

### **2.2.1 Fitorremediación**

La fitorremediación se define como el conjunto de tecnologías que reducen *in situ* o *ex situ* la concentración de diversos compuestos tóxicos, a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a ellas (De la Vega 2014).

Existen otros términos para dar lugar a la remediación por medio de plantas superiores como fitorrecuperación, fitocorrección, fitorrestauración o fitorrehabilitación (Carpena y Bernal 2007).

Se conocen 6 mecanismos o procesos para remediar las zonas contaminadas dependientes de la planta a utilizar (Miller 1996) (Oh et al. 2014) (Carpena, R.O. y Bernal 2007), fitoextracción, fitoestabilización, fitoinmovilización, fitovolatilización y fitodegradación.

La fitoextracción consiste en absorber los contaminantes y almacenarlos en hojas (foliolos), tallo y raíz, siendo estas últimas las más comunes, en la fitoestabilización las raíces principales y secundarias inmovilizan los contaminantes acumulando y precipitando por adsorción. En el caso de la fitodegradación las plantas secretan enzimas por las raíces descomponiendo contaminantes orgánicos, en cambio la fitoinmovilización o rizodegradación, las raíces de las plantas estimulan la microfauna del suelo, haciendo que estos degraden los contaminantes. Por último, en la fitovolatilización los contaminantes ingresa a la planta hasta las hojas donde se convierte en gas y se volatilizan a través de los estomas (Oh et al. 2014).

Esta tecnología verde se aplica principalmente a grandes extensiones de suelo donde existe contaminación superficial y tiene como ventaja respecto a otros métodos de remediación de suelos que es fácil de aplicar, tiene bajo costo y además es agradable estéticamente (De la Vega 2014).

Las plantas que tienen una alta tolerancia a un determinado metal, se les conoce como hiperacumuladoras, de las cuales se han identificado alrededor de 415 especies, distribuidas en 45 familias botánicas con esta capacidad. Estas son capaces de concentrar

más de 10 µg/g-1 Hg; 100 µg/g-1 Cd, etc. (Yang et al. 2004) (Boyd et al. 2008) (Delgadillo-López et al. 2011) (Marrero-Coto J. 2012) si esta tolerancia es menor también puede ser evaluada por medio del índice de tolerancia, la cual es calculada como la relación entre la biomasa aérea del tratamiento con cadmio y la biomasa aérea del tratamiento control (Watson et al. 2003).

Entre algunos de los géneros de plantas más utilizados para la remediación se encuentra: *Anthyllis vulneraria* para el zinc, cadmio y plomo; *Lupinus* para el cadmio y el arsénico, y *Brassica* para cadmio, zinc, cobre, manganeso, hierro y plomo (De la Vega 2014).

### 2.2.2 Aplicaciones de la fitorremediación

En la actualidad se ha demostrado mediante diferentes investigaciones la capacidad remediadora de algunas especies, entre ellas el género *Lupinus*.

Se realizó un trabajo en condiciones de invernadero en el distrito de Lachaqui, provincia de Canta, región Lima, donde evaluaron veinte tratamientos con un diseño factorial completo 5 x 4: 5 especies alto andinas, y 4 sustratos con 30%, 60%, 100% de relave de mina (RM) y suelo sin RM. Encontraron que la producción de biomasa disminuyó significativamente en *Solanum nitidum*, *Brassica rapa*, *Fuertesimalva echinata*, *Urticaurens* y *Lupinus ballianus*, con el tratamiento de 100% de relave de mina. La mayor eficiencia de acumulación de plomo y zinc fue obtenida en las raíces de *Fuertesimalva echinata* con el tratamiento de 100% de relave de mina, en las raíces de *L. ballianus* fue obtenida la más alta acumulación de cadmio con el tratamiento de 100% de relave de mina. *Fuertesimalva echinata* presentó el mayor índice de tolerancia (IT) al tratamiento de 100% de relave de mina, con un IT de 41.5%, pero, *S. nitidum* y *L. ballianus* presentaron el mayor IT al

tratamiento de 60% de relave de mina con IT de 68.5% y 67.9 (Jara Peña et al. 2014)

Se sembraron las especies *Cyperus rotundus*, *Wedelia trilobata* y *Cenchrus ciliaris* en un suelo petroquímico en Venezuela, para determinar su capacidad extractora de cadmio y cobre a través de la determinación de estos metales en la biomasa aérea por espectrofotometría de absorción. Donde *Cyperus rotundus* tiene mayor capacidad extractora de cadmio y cobre pero no es clasificada como hiperacumuladora (Díaz et al. 2011).

Se evaluó la respuesta de *Lupinus versicolor* como un agente biológico en suelos contaminados con Cu, Pb, Cd, Ni y Zn. El estudio fue desarrollado en un invernadero. El diseño experimental constó de bloques completamente aleatorios con 6 replicaciones. Los resultados mostraron que las plantas acumularon tanto como 0.12 mg Kg<sup>-1</sup> de Cu dentro del follaje, 0,94 mg kg<sup>-1</sup> de Pb, 0,31 mg kg<sup>-1</sup> de Cd y 1,03 mg kg<sup>-1</sup> de Ni dentro de los tallos, así como 2,46 mg kg<sup>-1</sup> de Zn en las hojas, siendo estos valores superiores a los encontrados por otros investigadores. En esta investigación, se obtuvieron resultados favorables para la acumulación de cadmio en las hojas (foliolos), níquel en los tallos y cobre en las raíces. Por lo tanto, consideraron que *L. versicolor* es una planta que puede ser considerada como una buena alternativa para remover suelos contaminados con metales pesados y para la fitoestabilización y revegetación de estos mismos suelos (Cruz-Landero et al. 2010).

Se realizó una investigación con el objetivo de explorar la acumulación y tolerancia de cadmio por *Lupinus uncinatus* en suelos contaminados. El experimento se llevó a cabo en macetas bajo condiciones de invernadero durante 18 semanas y se agregó CdCl<sub>2</sub>.21/2H<sub>2</sub>O después de 4, 12, y 15 semanas del crecimiento en las siguientes concentraciones (0, 3, 6, 9 mg Cd kg<sup>-1</sup> suelo) con

cuatro repeticiones. El cadmio inhibió altura de la planta y número de hojas e indujo un cambio significativo en el rendimiento de la materia seca de las raíces, hojas y tallos. El índice de tolerancia al metal fue 88, 82 y 49% para los tratamientos 9, 18 y 27 mg Cd kg<sup>-1</sup> respectivamente. Se detectó una concentración máxima en parte aérea (540 mg Cd kg<sup>-1</sup> materia seca) en el tratamiento 27 mg Cd kg<sup>-1</sup>. La translocación desde la raíz hacia el tallo fue pobre y la proporción del Cd en raíz:tallo fue <1. El presente trabajo es el primer reporte sobre el crecimiento de *L. uncinatus* bajo estrés de cadmio, su grado de tolerancia y su acumulación en la planta en respuesta a diferentes tratamientos del cadmio en el suelo, sugiriendo su uso en la fitoestabilización y revegetación de los suelos contaminados con cadmio (Ehsan et al. 2009) (Ehsan 2007).

Para cuantificar la concentración de metales pesados y otros elementos contaminantes evaluados en la fitorremediación se emplean diferentes métodos de espectrofotometría como la de dispersión de energía por rayos X (EDX) (Morales Fonseca 2008) y la de ICP- OES (Plasma de acoplamiento inductivo con espectrofotómetro de emisión óptico) (Castillo et al. 2005).

### **2.3 Contaminación de suelos y cadmio**

La presencia en los suelos de concentraciones nocivas de algunos elementos químicos y compuestos (contaminantes) es un tipo especial de degradación que se denomina contaminación (Gal y Baena 2008).

Dentro de los elementos más contaminantes, se encuentra el cadmio, metal pesado de color blanco con ligero matiz azulado, blando, dúctil, maleable y resistente a la corrosión, ubicado en el grupo IIB de la tabla periódica de elementos químicos, tiene como característica número atómico 48, masa atómica 111.4 y densidad relativa de 8,65, además de ser insoluble en agua y en disolventes orgánicos (Gonzales y Osorio 2014).

Se encuentra ampliamente distribuido en la corteza terrestre como componente natural de los suelos, Representa el 1.5% en peso de la corteza terrestre. Frecuentemente se presenta en pequeñas cantidades asociado a minerales de zinc, tales como la esfalerita (ZnS), minerales propios como la greenockita o blenda de cadmio (CdS), la otavita (CdCO<sub>3</sub>) y la monteponita (CdO) (Solano Marín 2005), sin embargo a medida que la concentración aumenta, se convierte en un elemento dañino, llegando a ser tan toxico como el plomo (Rodriguez Badiola et al. 1990).

Como la mayoría de metales pesados este también sigue pautas de movilidad general por no ser un elemento estático inalterable, como la movilización a las aguas superficiales o subterráneas, transferencia a la atmosfera por volatilización, absorción por las plantas e incorporación a las cadenas tróficas y retención de metales pesados en el suelo de distintas maneras: fijados o disueltos, retenidos por adsorción, complejación o precipitación (Navarro-Aviñó et al. 2007).

El tiempo de permanencia del cadmio en suelos es de hasta 300 años y el 90% permanece sin transformarse (La Dou 1999). Para los suelos con potencial agrícola, esta contaminación con cadmio es una de las principales amenazas, puesto que inhibe la actividad enzimática microbiana y reduce la diversidad de las poblaciones de flora y fauna, provocando infertilidad e incrementando los procesos erosivos (Diez Lázaro 2008) además este compuesto tiene como característica química, incrementar su solubilidad en suelos con pH bajo y facilidad para moverse desde las raíces a la parte aérea de las plantas cultivadas (Dalzell et al. 1987), el cual se da por la fuerza del proceso de osmosis y es movilizado por el tejido xilemático (Navarro-Aviñó et al. 2007).

El incremento de esta concentración de cadmio en suelos agrícolas se le atribuye a la aplicación de compost, lodos residuales (5%), deposiciones aéreas (41%) y en su mayoría al uso de fertilizantes

fosfórico (54%) (Ramírez 2002) , ya que en su fabricación existe un alto contenido de cadmio, estimándose un contenido medio de  $7 \text{ mgKg}^{-1}$ , una cantidad incluso mayor que el fosfato de amonio, componente dominante en la fabricación (Martí et al. 2002).

En un estudio realizado en los suelos agrícolas de Chile obtuvieron concentraciones elevadas de cadmio al utilizar fertilizantes fosforados como Alfisol , Ultisol, Ansisol, Inceptisol, siendo este último el que más cadmio aportó a los suelos, resaltando además que el cadmio liberado el primer día producto de la fertilización, permaneció disponible hasta el último día de medición, lo cual nos dice que no hubo translocación de la contaminación (Bonomelli et al. 2003).

Además este incremento se le atribuye a los tratamientos metalúrgicos asociados con zinc y plomo donde se produce formación de óxido de cadmio (Ramírez 2002), la generación de energía eléctrica (fabricación de baterías eléctricas de níquel - cadmio), su uso como pigmento en pinturas, esmaltes, plásticos, textiles, vidrios, tintas de impresión, caucho, lacas, etc. (Ramírez 2002), así como también su empleo en la industria farmacéutica, y como parte de residuos domésticos (García y Cruz 2012) (Saldívar et al. 1997), más conocido como contaminación antropogénica (Gal y Baena 2008) (Navarro-Aviñó et al. 2007).

Para el Perú, según normativa vigente el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) es la medida que establece el nivel de concentración de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas, siendo estas de diseño y aplicación obligatoria en los instrumentos de gestión ambiental. Dentro de los elementos inorgánicos delimitados se encuentra el cadmio total ( $\text{mg/kg}$  de materia seca) con 1.4 para suelos agrícolas, siendo el segundo elemento inorgánico con menor cantidad permisible (El Peruano 2013).

### 2.3.1 Toxicidad

Los metales pesados son considerados muy peligrosos para la salud de los seres vivos, debido a su gran toxicidad, la tendencia de bioacumularse, por la imposibilidad del organismo afectado para mantener los niveles de excreción necesarios y biomagnificarse, cuando pasa los eslabones tróficos. Una vez absorbido por el organismo, es transportado a los órganos diana por las proteínas metalotioneínas, desplazando además al calcio y al zinc en determinados complejos proteicos causando estrés oxidativo y como resultado daño severo en el ADN y en los lípidos, además de inhibición de las enzimas que se encuentran en el citoplasma y el estrés oxidativo, lo cual resulta en daños a las estructuras celulares e incluso muerte celular (Hasan et al. 2009).

Los efectos de la toxicidad del cadmio se dan por contaminación de suelos, agua y aire, para cuantificar el daño de este metal en las plantas se han evaluado parámetros morfológicos como raíz, tallo y hoja (Labra-Cardón et al. 2012), (Oliet Palá et al. 1997), (Oliet Palá et al. 2000), siendo los efectos más significativos en las raíces, ya que el sistema radicular cumple la función de retención de contaminante a fin de proteger los demás órganos de la planta (Wang et al. 2007) (Rodríguez Serrano et al. 2008) (Marcano et al. 2001), estos inmovilizan el cadmio por medio de las pectinas (Benavides 2005).

Para evaluar el daño de diferentes contaminantes también se toma en cuenta el área foliar o área de folíolos cuando la hoja sea compuesta, esta área sirve para estimar el índice de área, donde se compara la cobertura de las hojas o folíolos con la cobertura total de las plantaciones (Warnock et al. 2006) (Castañeda-Saucedo et al. 2013) (Galindo y Clavijo 2007).

Los efectos de la toxicidad por cadmio en humanos dependen del tipo de exposición, ya sea a través de la inhalación de aire contaminado, particularmente por fundidoras e incineradoras cercanas o por humo de cigarro, consumo de alimentos y agua contaminada. Además de la deficiencia de metales esenciales en el cuerpo como el hierro (Fe), Cobre (Cu), Zinc (Zn) y calcio (Ca), la absorción de cadmio se facilita. Se estima que entre un 10-50% de Cd se absorbe en pulmón, mientras que a nivel gastrointestinal la absorción es del 8% (Arroyo et al. 2013).

La ingesta de alimentos o bebidas contaminadas puede producir irritaciones estomacales, náuseas, vómito, diarrea, dolor abdominal y muscular, así como salivación. Los casos de intoxicación por inhalación son más graves y pueden llegar a provocar neumotitis química aguda y edema pulmonar (Saldívar et al. 1997).

Algunos de los efectos de la exposición crónica a cadmio se dan en el riñón, formado cálculos renales. Se ha observado que quienes trabajan en fábricas expuestos a niveles altos de cadmio en el aire son propensos a tener enfisema, además de que la exposición prolongada ocasiona cáncer pulmonar. Las pruebas en animales expuestos a cadmio dan como resultado presión arterial alta y en el sistema reproductivo se han observados efectos negativos (Saldívar et al. 1997).

La acumulación de cadmio en mamíferos se da en mayor porcentaje en riñones, hígado y órganos reproductores. Uno de los casos de envenenamiento mejor conocido y documentados es la enfermedad ita-ita producida en Japón (Navarro-Aviñó et al. 2007).

A pesar de conocer los efectos negativos que tiene el cadmio en la salud, la exposición a este metal pesado continua, incluso se ha incrementado en algunas partes del mundo y una de las razones es que los productos que contienen cadmio no son reciclables como las baterías recargables de níquel-cadmio, que se usan día a día en el hogar como fuente de energía de aparatos eléctricos, las emisiones de cadmio por consumo de cigarrillo, que no solo afecta a fumadores sino a las personas que comparten el mismo espacio y también en la comida y el agua (Jarup 2003).

### 3. CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

#### ugar de investigación

El presente proyecto de investigación se desarrolló en el Laboratorio e Invernadero de Biotecnología y Fisiología Vegetal de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Ricardo Palma, en el distrito de Surco- Lima (Coordenadas: 12°08'02.5"S 76°58'49.3"W).

Además, se realizaron los análisis histológicos en el Laboratorio de patología del Hospital San José del Callao (Coordenadas: 12°02'33.9"S 77°05'55.2"W) y los análisis químicos en la Unidad de servicios de análisis químico de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos en el distrito de Cercado de Lima (Coordenadas: 12°03'36.9"S 77°05'01"W).

#### 3.2 Germinación de semillas

Las semillas de *Lupinus mutabilis* Sweet “chocho o tarwi” fueron adquiridas en la Localidad de Bellapampa, ubicada en Huaraz (Coordenadas: 9°53'0.75" N 77°51'61.13" E) y conservadas en bolsas de polietileno con cierre hermético en el Laboratorio.

Éstas fueron analizadas visualmente, y las que presentaban buena apariencia fueron utilizadas en la germinación (Figura 1).

Se utilizaron 3 procedimientos para la germinación, utilizando 35 semillas por procedimiento: P1, el cual consistió en el lavado de las semillas con agua potable, P2 en el que se lavaron las semillas con detergente por 2 minutos seguido de 3 a 4 enjuagues con agua, para eliminar residuos de detergente, a continuación se realizó shock térmico con agua caliente (50-55°C) por 2 minutos, y P3, el cual constó del lavado de semillas con detergente por 2 minutos seguido de 3 a 4 enjuagues con agua, para eliminar residuos de detergente, a continuación se realizó shock térmico con agua caliente (50-55°C) por

2 minutos y finalmente se sumergió en ácido giberélico (50 ppm) por 5 minutos.

Terminado los procedimientos, las semillas fueron puestas a germinar en arena de cuarzo de 1/32" como sustrato, en condiciones de oscuridad, con una temperatura y humedad relativa controlada mediante un higrotermómetro Extech Modelo: 444732.

Se evaluó el porcentaje y el tiempo de germinación en días, mediante el programa Microsoft Excel® 2016.

### **3.3 Establecimiento de los tratamientos con cadmio en el invernadero**

#### **3.3.1 Preparación de sustrato**

La arena de cuarzo de 1/32" fue comprada en Minerals Supply & Services S.A.C sede La Molina y trasladada al laboratorio, donde fue lavada con agua potable y luego enjuagada con agua destilada para eliminar el residuo de cloro en el sustrato.

A continuación, se colocaron 6 kg de la arena de cuarzo lavada en una maceta de plástico de 21 cm de ancho y 18.4 cm de alto con malla raschel de 1x1 en la base. Estas macetas fueron acondicionadas en una mesa de madera donde se desarrollaron los ensayos (Figura 2).

#### **3.3.2 Acondicionamiento de plantas**

Las plantas se sembraron 3 por maceta, y se mantuvieron a una temperatura y humedad relativa controladas (Higrotermómetro Marca: Extech Modelo: 444732) (Figura 3). Además, éstas fueron regadas de forma interdiaria con solución nutritiva básico Prianisnikov (Tabla 1), utilizando aspersores manuales.

### **3.3.3 Aplicación de tratamientos con cadmio**

Una vez adaptadas las plantas se procedió a colocar los siguientes tratamientos:

- T<sub>0</sub> ó control: Solución nutritiva.
- T<sub>1</sub>: 4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva.
- T<sub>2</sub>: 8 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva.
- T<sub>3</sub>: 12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva.
- T<sub>4</sub>: 16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva.

Estos tratamientos fueron incorporados cada 15 días, aplicando dosis de 1 mg CdSO<sub>4</sub>/L para el tratamiento 1, 2 mg CdSO<sub>4</sub>/L para el tratamiento 2, 3 mg CdSO<sub>4</sub>/L para el tratamiento 3 y 4 mg CdSO<sub>4</sub>/L para el tratamiento 4 (Tabla 2).

Estas dosis se diluyeron en 20 mL. de agua destilada y se colocaron con ayuda de un aspersor en cada maceta.

### **3.4 Índice de supervivencia**

Durante los 65 días de exposición a los tratamientos T<sub>0</sub>, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>, se contabilizaron el número de plantas en cada uno de ellos y se determinó el índice de supervivencia dividiendo el número de plantas vivas en un determinado tiempo entre el número de plantas iniciales, las cuales fueron 6 para todos los tratamientos.

Así mismo se utilizó el programa Microsoft Excel® 2016 para elaborar las gráficas correspondientes.

### **3.5 Análisis morfológico e histológico**

Se llevó a cabo el análisis morfológico de las plantas sometidas a diferentes concentraciones con cadmio (Cd) en diferentes tiempos (20,

35, 50, 65 días después de la aplicación de tratamientos), con ayuda de una cinta métrica de tela de 250 cm. y una cámara fotográfica de 12 megapíxeles marca Fujifilm® con filtros macro, se registraron los siguientes parámetros:

Longitud en cm de raíz y tallo; número de raíces secundarias, nudos y foliolos; y área de los foliolos en cm<sup>2</sup>, para esto último se midió la longitud y ancho de los foliolos, y se aplicó la fórmula para calcular el área de un ovalo:

$$a: \pi * \left(\frac{L}{2}\right) * \left(\frac{A}{2}\right)$$

Mediante el paquete estadístico SPSS 23 se realizó el análisis de significancia de los tratamientos (T<sub>0</sub>, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub>) y el efecto de los mismos en los 6 parámetros evaluados, por medio de la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk.

Así mismo, se obtuvo el número de muestra (N), la media de cada tratamiento y se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) con el Test de Tukey para comparaciones múltiples entre media de los tratamientos (P>0.05).

Para realizar los cortes histológicos se llevaron muestras frescas de raíz principal, tallo y foliolos en bolsas de polietileno con cierre hermético al laboratorio de análisis de histológico del Hospital San José del Callao, donde fueron fijadas utilizando el método de deshidratación por inmersión con etanol a diferentes concentraciones: 70°, 90°, 96° y 100°, cada concentración fue empleada por 10 minutos en un equipo especializado Leica.

A continuación, las muestras deshidratadas fueron sumergidas durante 10 minutos en Xileno, el cual cumple la función de ser un líquido

intermediario entre la fase de fijación y la fase de incorporación a parafina.

Posteriormente, las muestras se sumergieron en parafina líquida durante una hora y se colocaron en una estufa a 60 °C, para luego ser vertidas en moldes de 3x5 cm. y se dejaron gelificar a temperatura ambiente.

Para los cortes, se utilizó un micrótopo de rotación manual Leica con el cual se obtuvieron muestras de 0.5 mm. de grosor, las cuales fueron coloreadas con una batería de tinción de Hematoxilina-eosina.

Se visualizaron las muestras de raíz principal, tallo y folíolos de cada tratamiento, con ayuda de un microscopio óptico Leica (modelo CME) a 40x y 100x. A continuación, con el software LA EZ con cámara especializada, se tomaron fotos para observar la presencia o ausencia de daño y los datos fueron comparados mediante una tabla de doble entrada en el programa Microsoft Excel® 2016 (Figura 4)

### **3.6 Índice de tolerancia**

Para la determinación del índice de tolerancia se tomaron muestras por separado de raíz, tallo y hoja de las plántulas a los 65 días y a continuación se pesaron en una balanza analítica Scaltec modelo Sba-31.

Los datos obtenidos fueron procesados en una tabla de doble entrada, donde se calculó el índice de tolerancia mediante la relación entre la biomasa de la parte aérea en un tratamiento con cadmio y la biomasa aérea en el control. Estos índices fueron comparados en cada tratamiento mediante un gráfico utilizando el programa Microsoft Excel® 2016.

### **3.7 Análisis de Cd por espectrofotometría de absorción atómica de llama.**

Las muestras de raíz, tallo y hoja se colocaron en estufa a 100°C por 30 minutos, una vez terminado el tiempo de secado, se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se colocaron en bolsas de polietileno con cierre hermético rotuladas. Así mismo se tomaron muestras homogéneas de 35 gr. del sustrato de arena de cuarzo a los 65 días después de la aplicación de los tratamientos y se colocaron en frascos de vidrio rotulados (Figura 5).

Estas muestras fueron enviadas al laboratorio USAQ de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, donde se analizaron basado en la metodología de Espectrofotometría de absorción atómica de llama (FAAS), con el fin de determinar la concentración de cadmio en ppm en cada una de las muestras enviadas.

Se colocaron los datos obtenidos en una tabla de doble entrada y se analizaron en el programa Microsoft Excel® 2016.

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS

### 4.1 Germinación de semillas

De las 35 semillas de *Lupinus mutabilis* Sweet “chocho o tarwi” puestas a germinar por cada procedimiento a 25°C y 78% de humedad relativa se obtuvieron los siguientes resultados:

En el procedimiento “P1”, donde las semillas fueron lavadas sólo con agua potable se logró germinar un 20% (7 semillas) en 10 días, mientras que para el procedimiento “P2”, donde se lavaron semillas con detergente por 2 minutos seguido de 3 a 4 enjuagues, y se utilizó shock térmico con agua caliente (55-65°C), un 82% (29 semillas) logró germinar en 9 días y para el procedimiento “P3”, donde las semillas fueron lavadas con detergente por 2 minutos seguido de 3 a 4 enjuagues, se utilizó shock térmico con agua caliente (55-65°C) y se sumergió en ácido giberélico durante 5 minutos, el 94% (33 semillas) germinaron en 4 días (Tabla 3).

### 4.2 Tasa de supervivencia

En este ensayo en el invernadero se realizó el monitoreo de las plantas durante 65 días después de la aplicación de los tratamientos, y se mantuvo una temperatura promedio de 30.5°C y humedad relativa de 56%.

Los resultados indican que para el tratamiento “T<sub>0</sub>” o control (Solución nutritiva), el número de plantas sembradas se mantuvo (6), teniendo así un índice de supervivencia de 1.

Por otro lado, la reducción del número de plantas en los demás tratamientos fue a diferentes tiempos: para “T<sub>1</sub>” (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) a los 40 días, para “T<sub>2</sub>” (8 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) a los 25 días, así como también para “T<sub>3</sub>” (12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L

+ Solución nutritiva) y “T<sub>4</sub>” (16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) a los 20 días.

La reducción en el número de plantas fue más significativa a medida que la concentración y el tiempo de exposición aumentaban. En el tratamiento “T<sub>1</sub>” (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) se contabilizaron solo 5 a los 40 días y 4 a los 65 días (índice de supervivencia: 0.83 y 0.66 respectivamente). Seguido del tratamiento “T<sub>2</sub>” (8 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) y “T<sub>3</sub>” (12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) donde se observaron solo 5 a los 40 días y en 4 a los 65 días (índice de supervivencia de 0.83 y 0.66 respetivamente).

Así mismo, para el tratamiento “T<sub>4</sub>” (16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) se contabilizaron 4 a los 40 días y 2 a los 65 días (índice de supervivencia de 0.83 y 0.33 respetivamente) (Tabla 4) (Figura 6).

### **4.3 Análisis morfológico**

Los resultados en este ensayo contienen el análisis descriptivo y cualitativo de los parámetros evaluados en raíz, tallo y hoja de *Lupinus mutabilis* Sweet “chocho o tarwi”.

Las pruebas de normalidad para todos los parámetros evaluados a los 20, 35, 50 y 65 días después de la aplicación de tratamientos mostraron diferencias significativas entre todos los tratamientos y también demostró que al menos uno de ellos fue diferente a los demás ( $P < 0.05$ ) (Tabla 5A – 28A).

#### **4.3.1 Efecto del Cd después de 20 días de la aplicación de tratamientos.**

#### **4.3.1.1 Longitud de raíz principal (cm)**

Se evaluaron 6 plantas en los tratamientos T<sub>0</sub>, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> y 5 plantas para los tratamientos T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>. Se obtuvo la media para T<sub>0</sub> o control (Solución nutritiva) con 15.55 cm, T<sub>1</sub> (1 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 5.01 cm, T<sub>2</sub> (2 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 3.03, T<sub>3</sub> (3 mg de CdSO<sub>4</sub>/L+ Solución nutritiva) con 3.4 cm y T<sub>4</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 2.04 (Tabla 5B).

Al comparar las medias de los tratamientos, las diferencias más resaltantes se dan entre el tratamiento T<sub>0</sub> o control y los tratamientos T<sub>1</sub> con 10.53 cm. ( $\pm 1.01$ ), T<sub>2</sub> con 12.51 cm. ( $\pm 1.01$ ), T<sub>3</sub> con 12.15 cm. ( $\pm 1.01$ ) y T<sub>4</sub> con 13.51 cm. ( $\pm 1.06$ ) (Tabla 5C) (Figura 7).

#### **4.3.1.2 Número de raíces secundarias**

Se evaluaron 6 plantas en los tratamientos T<sub>0</sub>, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> y 5 plantas para los tratamientos T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>. Se obtuvo la media para T<sub>0</sub> o control (Solución nutritiva) con 38.5, T<sub>1</sub> (1 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 16, T<sub>2</sub> (2 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 14.6, T<sub>3</sub> (3 mg de CdSO<sub>4</sub>/L+ Solución nutritiva) con 12 y T<sub>4</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 7.8 (Tabla 6B).

Al comparar las medias de los tratamientos, las diferencias más resaltantes se dan entre el tratamiento T<sub>0</sub> o control y los tratamientos T<sub>1</sub> con 22.5 ( $\pm 1.15$ ), T<sub>2</sub> con 23.83 ( $\pm 1.15$ ), T<sub>3</sub> con 26.5 ( $\pm 1.15$ ) y T<sub>4</sub> con 30.7 ( $\pm 1.20$ ) (Tabla 6C) (Figura 8).

#### **4.3.1.3 Longitud del tallo (cm)**

Se evaluaron 6 plantas en los tratamientos T<sub>0</sub>, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> y 5 plantas para los tratamientos T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>. Se obtuvo la media para T<sub>0</sub> o control (Solución nutritiva) con 23.83 cm, T<sub>1</sub> (1 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 18.5 cm, T<sub>2</sub> (2 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 16.73 cm, T<sub>3</sub> (3 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 14.33 cm y T<sub>4</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 10.12 cm (Tabla 7B).

Al comparar las medias de los tratamientos las diferencias más resaltantes se dan entre el tratamiento T<sub>0</sub> o control y los tratamientos T<sub>1</sub> con 5.33 cm. ( $\pm 0.81$ ), T<sub>2</sub> con 7.10 cm. ( $\pm 0.81$ ) T<sub>3</sub> con 9.5 cm. ( $\pm 0.81$ ) y T<sub>4</sub> con 13.71 cm. ( $\pm 0.85$ ) (Tabla 7C) (Figura 9).

#### **4.3.1.4 Número de nudos**

Se evaluaron 6 plantas en los tratamientos T<sub>0</sub>, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> y 5 plantas para los tratamientos T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>. Se obtuvo la media para T<sub>0</sub> o control (Solución nutritiva) con 11.5, T<sub>1</sub> (1 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 8.16, T<sub>2</sub> (2 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 6.16, T<sub>3</sub> (3 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 5.16 y T<sub>4</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 2 (Tabla 8B).

Al comparar las medias de los tratamientos las diferencias más resaltantes se dan entre el tratamiento T<sub>0</sub> o control y los tratamientos T<sub>1</sub> con 3.33 ( $\pm 0.68$ ), T<sub>2</sub> con 5.33 ( $\pm 0.68$ ) T<sub>3</sub> con 6.3 ( $\pm 0.68$ ) y T<sub>4</sub> con 9.5 ( $\pm 0.72$ ) (Tabla 8C) (Figura 10).

#### 4.3.1.5 Área de foliolos

Se evaluaron 6 plantas en los tratamientos T<sub>0</sub>, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> y 5 plantas para los tratamientos T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>. Se obtuvo la media para T<sub>0</sub> o control (Solución nutritiva) con 1.35 cm<sup>2</sup>, T<sub>1</sub> (1 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 0.8 cm<sup>2</sup>, T<sub>2</sub> (2 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 0.47 cm<sup>2</sup>, T<sub>3</sub> (3 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 0.32 cm<sup>2</sup> y T<sub>4</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 0.18 cm<sup>2</sup> (Tabla 9B).

Al comparar las medias de los tratamientos las diferencias más resaltantes se dan entre el tratamiento T<sub>0</sub> o control y los tratamientos T<sub>1</sub> con 0.55 cm. (±0.05), T<sub>2</sub> con 0.87 cm. (±0.05) T<sub>3</sub> con 1.02 cm. (±0.05) y T<sub>4</sub> con 1.16 cm. (±0.06) (Tabla 9C) (Figura 11).

#### 4.3.1.6 Número de foliolos

Se evaluaron 6 plantas en los tratamientos T<sub>0</sub>, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> y 5 plantas para los tratamientos T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>. Se obtuvo la media para T<sub>0</sub> o control (Solución nutritiva) con 44.3, T<sub>1</sub> (1 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 35.83, T<sub>2</sub> (2 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 27.3, T<sub>3</sub> (3 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 22.3 y T<sub>4</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 9.2 (Tabla 10B).

Al comparar las medias de los tratamientos las diferencias más resaltantes se dan entre el tratamiento T<sub>0</sub> o control y los tratamientos T<sub>1</sub> con 8.5 (± 1.35), T<sub>2</sub> con 17 (± 1.35) T<sub>3</sub> con 22 (±1.35) y T<sub>4</sub> con 35.13 (±1.41) (Tabla 10C) (Figura 12).

En el análisis descriptivo de las plantas se puede observar que, en las raíces, la coloración para el tratamiento T<sub>0</sub> o control es amarillenta mientras que para los tratamientos aplicados con cadmio T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>, al aumentar la concentración se torna color marrón producto de la necrosis, además de una notable disminución en el número de las raíces secundarias y engrosamiento de la misma.

La forma y color, del tallo y los folíolos no muestran visualmente, diferencias significativas entre los tratamientos T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub> (Figura 13).

#### **4.3.2 Efecto del Cd después de 35 días de la aplicación de tratamientos.**

##### **4.3.2.1 Longitud de raíz principal (cm)**

Se evaluaron 6 plantas en los tratamientos T<sub>0</sub> y T<sub>1</sub>, 5 plantas para los tratamientos T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub>, y 4 plantas para el tratamiento T<sub>4</sub>. Se obtuvo la media para T<sub>0</sub> o control (Solución nutritiva) con 17.3 cm, T<sub>1</sub> (2 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 5.24 cm, T<sub>2</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 3.76, T<sub>3</sub> (6 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 3.36 cm y T<sub>4</sub> (8 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 2.32 (Tabla 11B).

Al comparar las medias de los tratamientos, las diferencias más resaltantes se dan entre el tratamiento T<sub>0</sub> o control y los tratamientos T<sub>1</sub> con 12.06 cm. ( $\pm 0.95$ ), T<sub>2</sub> con 13.54 cm. ( $\pm 0.95$ ), T<sub>3</sub> con 13.94 cm. ( $\pm 0.95$ ) y T<sub>4</sub> con 14.97 cm. ( $\pm 1.02$ ) (Tabla 11C) (Figura 14).

#### **4.3.2.2 Número de raíces secundarias**

Se evaluaron 6 plantas en los tratamientos T<sub>0</sub> y T<sub>1</sub>, 5 plantas para los tratamientos T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub>, y 4 plantas para el tratamiento T<sub>4</sub>. Se obtuvo la media para T<sub>0</sub> o control (Solución nutritiva) con 50.16, T<sub>1</sub> (2 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 19.6, T<sub>2</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 16.6, T<sub>3</sub> (6 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 14.4 y T<sub>4</sub> (8 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 9 (Tabla 12B).

Al comparar las medias de los tratamientos, las diferencias más resaltantes se dan entre el tratamiento T<sub>0</sub> o control y los tratamientos T<sub>1</sub> con 30.56 (±1.22), T<sub>2</sub> con 33.56 (±1.22), T<sub>3</sub> con 35.76 (±1.22) y T<sub>4</sub> con 41.16 (±1.31) (Tabla 12C) (Figura 15).

#### **4.3.2.3 Longitud del tallo (cm)**

Se evaluaron 6 plantas en los tratamientos T<sub>0</sub> y T<sub>1</sub>, 5 plantas para los tratamientos T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub>, y 4 plantas para el tratamiento T<sub>4</sub>. Se obtuvo la media para T<sub>0</sub> o control (Solución nutritiva) con 33.83 cm, T<sub>1</sub> (2 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 25.5 cm, T<sub>2</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 18.2 cm, T<sub>3</sub> (6 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 14.6 cm y T<sub>4</sub> (8 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 11.75 cm (Tabla 13B).

Al comparar las medias de los tratamientos las diferencias más resaltantes se dan entre el tratamiento T<sub>0</sub> o control y los tratamientos T<sub>1</sub> con 30.56 cm. (± 1.22), T<sub>2</sub> con 33.56 cm. (±1.22) T<sub>3</sub> con 35.76 cm. (±1.22) y T<sub>4</sub> con 41.16 cm. (±1.31) (Tabla 13C) (Figura 16).

#### 4.3.2.4 Número de nudos

Se evaluaron 6 plantas en los tratamientos T<sub>0</sub> y T<sub>1</sub>, 5 plantas para los tratamientos T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub>, y 4 plantas para el tratamiento T<sub>4</sub>. Se obtuvo la media para T<sub>0</sub> o control (Solución nutritiva) con 19.6, T<sub>1</sub> (2 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 11.8, T<sub>2</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 9.2, T<sub>3</sub> (6 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 6.2 y T<sub>4</sub> (8 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 3.25 (Tabla 14B).

Al comparar las medias de los tratamientos las diferencias más resaltantes se dan entre el tratamiento T<sub>0</sub> o control y los tratamientos T<sub>1</sub> con 7.86 ( $\pm 0.58$ ), T<sub>2</sub> con 10.46 ( $\pm 0.58$ ) T<sub>3</sub> con 13.46 ( $\pm 0.58$ ) y T<sub>4</sub> con 16.41 ( $\pm 0.62$ ) (Tabla 14C) (Figura 17).

#### 4.3.2.5 Área de folíolos

Se evaluaron 6 plantas en los tratamientos T<sub>0</sub>, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> y 5 plantas para los tratamientos T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>. Se obtuvo la media para T<sub>0</sub> o control (Solución nutritiva) con 1.71 cm<sup>2</sup>, T<sub>1</sub> (2 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 0.98 cm<sup>2</sup>, T<sub>2</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 0.62 cm<sup>2</sup>, T<sub>3</sub> (6 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 0.36 cm<sup>2</sup> y T<sub>4</sub> (8 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 0.22 cm<sup>2</sup> (Tabla 15B).

Al comparar las medias de los tratamientos las diferencias más resaltantes se dan entre el tratamiento T<sub>0</sub> o control y los tratamientos T<sub>1</sub> con 0.73 cm. ( $\pm 0.1$ ), T<sub>2</sub> con 1.09 cm. ( $\pm 0.1$ ) T<sub>3</sub> con 1.35 cm. ( $\pm 0.1$ ) y T<sub>4</sub> con 1.49 cm. ( $\pm 0.1$ ) (Tabla 15C) (Figura 18)

#### **4.3.2.6 Número de foliolos**

Se evaluaron 6 plantas en los tratamientos T<sub>0</sub>, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> y 5 plantas para los tratamientos T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>. Se obtuvo la media para T<sub>0</sub> o control (Solución nutritiva) con 54.5, T<sub>1</sub> (2 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 39.6, T<sub>2</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 31.2, T<sub>3</sub> (6 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 25 y T<sub>4</sub> (9 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 8.5 (Tabla 16B).

Al comparar las medias de los tratamientos las diferencias más resaltantes se dan entre el tratamiento T<sub>0</sub> o control y los tratamientos T<sub>1</sub> con 14.9 ( $\pm 1.67$ ), T<sub>2</sub> con 23.3 ( $\pm 1.67$ ) T<sub>3</sub> con 29.5 ( $\pm 1.67$ ) y T<sub>4</sub> con 46 ( $\pm 1.78$ ) (Tabla 16C) (Figura 19)

En el análisis descriptivo de las plantas se puede observar que, en las raíces, la coloración para el tratamiento T<sub>0</sub> o control es amarillenta mientras que para los tratamientos aplicados con cadmio T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>, al aumentar la concentración se torna color marrón producto de la necrosis, además de una notable disminución en la longitud en el número de las raíces secundarias y engrosamiento de la misma.

La forma y color, del tallo y los foliolos no muestran visualmente, diferencias significativas entre los tratamientos T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub> (Figura 20).

#### **4.3.3 Efecto del Cd después de 50 días de la aplicación de tratamientos.**

#### **4.3.3.1 Longitud de raíz principal (cm)**

Se evaluaron 6 plantas en el tratamiento T<sub>0</sub>, 5 plantas para el tratamiento T<sub>1</sub>, 4 plantas para los tratamientos T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub>, y 3 plantas para el tratamiento T<sub>4</sub>. Se obtuvo la media para T<sub>0</sub> o control (Solución nutritiva) con 25.75 cm, T<sub>1</sub> (3 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 5.94 cm, T<sub>2</sub> (6 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 4.42, T<sub>3</sub> (9 mg de CdSO<sub>4</sub>/L+ Solución nutritiva) con 3.67 cm y T<sub>4</sub> (12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 2.76 (Tabla 17B).

Al comparar las medias de los tratamientos, las diferencias más resaltantes se dan entre el tratamiento T<sub>0</sub> o control y los tratamientos T<sub>1</sub> con 19.81 cm. ( $\pm 1.32$ ), T<sub>2</sub> con 21.32 cm. ( $\pm 1.4$ ), T<sub>3</sub> con 22.07 cm. ( $\pm 1.4$ ) y T<sub>4</sub> con 22.98 cm. ( $\pm 1.54$ ) (Tabla 17C) (Figura 21).

#### **4.3.3.2 Número de raíces secundarias**

Se evaluaron 6 plantas en el tratamiento T<sub>0</sub>, 5 plantas para el tratamiento T<sub>1</sub>, 4 plantas para los tratamientos T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub>, y 3 plantas para el tratamiento T<sub>4</sub>. Se obtuvo la media para T<sub>0</sub> o control (Solución nutritiva) con 55.83, T<sub>1</sub> (3 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 22.6, T<sub>2</sub> (6 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 18.5, T<sub>3</sub> (9 mg de CdSO<sub>4</sub>/L+ Solución nutritiva) con 17 y T<sub>4</sub> (12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 10.3 (Tabla 18B).

Al comparar las medias de los tratamientos, las diferencias más resaltantes se dan entre el tratamiento T<sub>0</sub> o control y los tratamientos T<sub>1</sub> con 33.23 ( $\pm 1.2$ ), T<sub>2</sub> con 37.33 ( $\pm 1.28$ ), T<sub>3</sub> con 38.83 ( $\pm 1.28$ ) y T<sub>4</sub> con 45.5 ( $\pm 1.41$ ) (Tabla 18C) (Figura 22).

#### 4.3.3.3 Longitud del tallo (cm)

Se evaluaron 6 plantas en el tratamiento T<sub>0</sub>, 5 plantas para el tratamiento T<sub>1</sub>, 4 plantas para los tratamientos T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub>, y 3 plantas para el tratamiento T<sub>4</sub>. Se obtuvo la media para T<sub>0</sub> o control (Solución nutritiva) con 39.33 cm, T<sub>1</sub> (3 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 29 cm, T<sub>2</sub> (6 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 20 cm, T<sub>3</sub> (9 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 16.25 cm y T<sub>4</sub> (12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 12.33 cm (Tabla 19B).

Al comparar las medias de los tratamientos las diferencias más resaltantes se dan entre el tratamiento T<sub>0</sub> o control y los tratamientos T<sub>1</sub> con 10.33 cm. ( $\pm 1.14$ ), T<sub>2</sub> con 19.33 cm. ( $\pm 1.22$ ) T<sub>3</sub> con 23.08 cm. ( $\pm 1.22$ ) y T<sub>4</sub> con 27 cm. ( $\pm 1.33$ ) (Tabla 19C) (Figura 23).

#### 4.3.3.4 Número de nudos

Se evaluaron 6 plantas en el tratamiento T<sub>0</sub>, 5 plantas para el tratamiento T<sub>1</sub>, 4 plantas para los tratamientos T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub>, y 3 plantas para el tratamiento T<sub>4</sub>. Se obtuvo la media para T<sub>0</sub> o control (Solución nutritiva) con 23.5, T<sub>1</sub> (3 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 13.8, T<sub>2</sub> (6 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 9.25, T<sub>3</sub> (9 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 5.75 y T<sub>4</sub> (12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 3.33 (Tabla 20B).

Al comparar las medias de los tratamientos las diferencias más resaltantes se dan entre el tratamiento T<sub>0</sub> o control y los tratamientos T<sub>1</sub> con 9.7 ( $\pm 1.12$ ), T<sub>2</sub> con 14.25 ( $\pm 1.19$ ) T<sub>3</sub> con 17.75 ( $\pm 1.19$ ) y T<sub>4</sub> con 20.16 ( $\pm 1.31$ ) (Tabla 20C) (Figura 24).

#### 4.3.3.5 Área de foliolos

Se evaluaron 6 plantas en el tratamiento T<sub>0</sub>, 5 plantas para el tratamiento T<sub>1</sub>, 4 plantas para los tratamientos T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub>, y 3 plantas para el tratamiento T<sub>4</sub>. Se obtuvo la media para T<sub>0</sub> o control (Solución nutritiva) con 2.36 cm<sup>2</sup>, T<sub>1</sub> (3 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 1.34 cm<sup>2</sup>, T<sub>2</sub> (6 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 1.13 cm<sup>2</sup>, T<sub>3</sub> (9 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 0.59 cm<sup>2</sup> y T<sub>4</sub> (12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 0.33 cm<sup>2</sup> (Tabla 21B).

Al comparar las medias de los tratamientos las diferencias más resaltantes se dan entre el tratamiento T<sub>0</sub> o control y los tratamientos T<sub>1</sub> con 1.02 cm. (± 0.1), T<sub>2</sub> con 1.23 cm. (±0.1) T<sub>3</sub> con 1.77 cm. (±0.1) y T<sub>4</sub> con 2.03 cm. (±0.1) (Tabla 21C) (Figura 25).

#### 4.3.3.6 Número de foliolos

Se evaluaron 6 plantas en el tratamiento T<sub>0</sub>, 5 plantas para el tratamiento T<sub>1</sub>, 4 plantas para los tratamientos T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub>, y 3 plantas para el tratamiento T<sub>4</sub>. Se obtuvo la media para T<sub>0</sub> o control (Solución nutritiva) con 55.5, T<sub>1</sub> (3 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 47.4, T<sub>2</sub> (6 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 37, T<sub>3</sub> (9 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 26.75 y T<sub>4</sub> (12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 9.66 (Tabla 22B).

Al comparar las medias de los tratamientos las diferencias más resaltantes se dan entre el tratamiento T<sub>0</sub> o control y los tratamientos T<sub>1</sub> con 8.1 (± 1.21), T<sub>2</sub> con 18.5 (± 1.29) T<sub>3</sub> con 28.75 (±1.29) y T<sub>4</sub> con 45.83 (±1.41) (Tabla 22C) (Figura 26).

En el análisis descriptivo de las plantas se puede observar que, en las raíces, la coloración para el tratamiento T<sub>0</sub> o control es amarillenta mientras que para los tratamientos aplicados con cadmio T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>, al aumentar la concentración se torna color marrón producto de la necrosis, además de una notable disminución en el número de las raíces secundarias y engrosamiento de la misma.

La forma y color del tallo muestran diferencias significativas entre los tratamientos T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>, mostrando heridas en la parte media del tallo y una coloración pálida en la parte baja del mismo. Así mismo en el tratamiento T<sub>2</sub> aparecen foliolos desproporcionados y en el tratamiento T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub> se observa que en los bordes de estos, aparecen signos de clorosis (color amarillento y bordes agudos) (Figura 27).

#### **4.3.4 Efecto del Cd después de 65 días de la aplicación de tratamientos.**

##### **4.3.4.1 Longitud de raíz principal (cm)**

Se evaluaron 6 plantas en el tratamiento T<sub>0</sub>, 4 plantas para el tratamiento T<sub>1</sub> y T<sub>2</sub>, 3 plantas para los tratamientos T<sub>3</sub>, y 2 plantas para el tratamiento T<sub>4</sub>. Se obtuvo la media para T<sub>0</sub> o control (Solución nutritiva) con 31.06 cm, T<sub>1</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 6.62 cm, T<sub>2</sub> (8 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 4.67, T<sub>3</sub> (12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L+ Solución nutritiva) con 4 cm y T<sub>4</sub> (16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 3.55 (Tabla 23B).

Al comparar las medias de los tratamientos, las diferencias más resaltantes se dan entre el tratamiento T<sub>0</sub> o control y los tratamientos T<sub>1</sub> con 24.43 cm. (±1.5), T<sub>2</sub> con 26.38 cm. (±1.5), T<sub>3</sub> con 27.06 cm. (±1.63) y T<sub>4</sub> con 27.51 cm. (±1.87) (Tabla 23C) (Figura 28).

#### **4.3.4.2 Número de raíces secundarias**

Se evaluaron 6 plantas en el tratamiento T<sub>0</sub>, 5 plantas para el tratamiento T<sub>1</sub>, 4 plantas para los tratamientos T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub>, y 3 plantas para el tratamiento T<sub>4</sub>. Se obtuvo la media para T<sub>0</sub> o control (Solución nutritiva) con 60, T<sub>1</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 23.25, T<sub>2</sub> (8 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 19.5, T<sub>3</sub> (12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L+ Solución nutritiva) con 19.33 y T<sub>4</sub> (16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 12.5 (Tabla 24B).

Al comparar las medias de los tratamientos, las diferencias más resaltantes se dan entre el tratamiento T<sub>0</sub> o control y los tratamientos T<sub>1</sub> con 36.75 ( $\pm 0.80$ ), T<sub>2</sub> con 40.5 ( $\pm 0.80$ ), T<sub>3</sub> con 40.6 ( $\pm 0.88$ ) y T<sub>4</sub> con 47.5 ( $\pm 1$ ) (Tabla 24C) (Figura 29).

#### **4.3.4.3 Longitud del tallo (cm)**

Se evaluaron 6 plantas en el tratamiento T<sub>0</sub>, 5 plantas para el tratamiento T<sub>1</sub>, 4 plantas para los tratamientos T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub>, y 3 plantas para el tratamiento T<sub>4</sub>. Se obtuvo la media para T<sub>0</sub> o control (Solución nutritiva) con 41.2 cm, T<sub>1</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 31 cm, T<sub>2</sub> (8 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 22.75 cm, T<sub>3</sub> (12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L+ Solución nutritiva) con 19.33 cm y T<sub>4</sub> (16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 12 cm (Tabla 25B).

Al comparar las medias de los tratamientos las diferencias más resaltantes se dan entre el tratamiento T<sub>0</sub> o control y los tratamientos T<sub>1</sub> con 10.20 cm. ( $\pm 1.34$ ), T<sub>2</sub> con 18.45 cm. ( $\pm 1.34$ ) T<sub>3</sub> con 21.86 cm. ( $\pm 1.46$ ) y T<sub>4</sub> con 29.2 cm. ( $\pm 1.67$ ) (Tabla 25C) (Figura 30)

#### 4.3.4.4 Número de nudos

Se evaluaron 6 plantas en el tratamiento T<sub>0</sub>, 5 plantas para el tratamiento T<sub>1</sub>, 4 plantas para los tratamientos T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub>, y 3 plantas para el tratamiento T<sub>4</sub>. Se obtuvo la media para T<sub>0</sub> o control (Solución nutritiva) con 26.6, T<sub>1</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 15.75, T<sub>2</sub> (8 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 12.25, T<sub>3</sub> (12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 9.33 y T<sub>4</sub> (16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 6 (Tabla 26B).

Al comparar las medias de los tratamientos las diferencias más resaltantes se dan entre el tratamiento T<sub>0</sub> o control y los tratamientos T<sub>1</sub> con 10.85 ( $\pm 1.38$ ), T<sub>2</sub> con 14.35 ( $\pm 1.38$ ) T<sub>3</sub> con 17.26 ( $\pm 1.50$ ) y T<sub>4</sub> con 20.6 ( $\pm 1.72$ ) (Tabla 26C) (Figura 31).

#### 4.3.4.5 Área de foliolos

Se evaluaron 6 plantas en el tratamiento T<sub>0</sub>, 5 plantas para el tratamiento T<sub>1</sub>, 4 plantas para los tratamientos T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub>, y 3 plantas para el tratamiento T<sub>4</sub>. Se obtuvo la media para T<sub>0</sub> o control (Solución nutritiva) con 2.78 cm<sup>2</sup>, T<sub>1</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 1.87 cm<sup>2</sup>, T<sub>2</sub> (8 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 1.49 cm<sup>2</sup>, T<sub>3</sub> (12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 0.84 cm<sup>2</sup> y T<sub>4</sub> (16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 0.51 cm<sup>2</sup> (Tabla 27B).

Al comparar las medias de los tratamientos las diferencias más resaltantes se dan entre el tratamiento T<sub>0</sub> o control y los tratamientos T<sub>1</sub> con 0.91 cm. ( $\pm 0.1$ ), T<sub>2</sub> con 1.29 cm. ( $\pm 0.1$ ) T<sub>3</sub> con 1.95 cm. ( $\pm 0.11$ ) y T<sub>4</sub> con 2.26 cm. ( $\pm 0.13$ ) (Tabla 27C) (Figura 32).

#### 4.3.4.6 Número de foliolos

Se evaluaron 6 plantas en el tratamiento T<sub>0</sub>, 5 plantas para el tratamiento T<sub>1</sub>, 4 plantas para los tratamientos T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub>, y 3 plantas para el tratamiento T<sub>4</sub>. Se obtuvo la media para T<sub>0</sub> o control (Solución nutritiva) con 67.8, T<sub>1</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 51.25, T<sub>2</sub> (8 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 40, T<sub>3</sub> (12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 29.66 y T<sub>4</sub> (16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) con 9.5 (Tabla 28B).

Al comparar las medias de los tratamientos las diferencias más resaltantes se dan entre el tratamiento T<sub>0</sub> o control y los tratamientos T<sub>1</sub> con 16.55 ( $\pm$  1.49), T<sub>2</sub> con 27.8 ( $\pm$  1.49) T<sub>3</sub> con 38.13 ( $\pm$ 1.62) y T<sub>4</sub> con 58.3 ( $\pm$ 1.86) (Tabla 28C) (Figura 33).

En el análisis descriptivo de las plantas se puede observar que, en las raíces, la coloración para el tratamiento T<sub>0</sub> o control es amarillenta mientras que para los tratamientos aplicados con cadmio T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>, al aumentar la concentración se torna color marrón producto de la necrosis, además de una notable disminución en el número de las raíces secundarias y engrosamiento de la misma.

La forma y color del tallo muestran diferencias significativas entre los tratamientos T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>, mostrando heridas en la parte media del tallo y una coloración pálida en la parte baja del mismo. Así mismo en el tratamiento T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub> aparecen foliolos desproporcionados, aumento de grosor de estos y en los bordes aparecen signos de clorosis (color amarillento y bordes agudos) (Figura 34).

#### 4.4 Análisis histológico

Los resultados en este ensayo contienen el análisis descriptivo de los cortes transversales de raíz, tallo y foliolos de *Lupinus mutabilis* Sweet “chocho o tarwi” para la evaluación cualitativa del daño ocasionado por

las diferentes concentraciones de cadmio aplicadas en los tratamientos (Tabla 29).

#### **4.4.1 Efecto del Cd después de 20 días de la aplicación de tratamientos.**

Las fotografías muestran que, los cortes de raíz son los más alterados a medida que la concentración de cadmio aumenta. En todos los tratamientos T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>, se evidencia la malformación de la pared celular, por la ruptura de las células de la exodermis y las células del córtex, así como también la acumulación de solutos en las células a partir de los tratamientos T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>.

Los cortes de tallo y foliolo de los tratamientos T<sub>1</sub> (1 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva), T<sub>2</sub> (2 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva), T<sub>3</sub> (3 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) y T<sub>4</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva), no muestran diferencias significativas con el tratamiento T<sub>0</sub> o control (Tabla 29) (Figura 35).

#### **4.4.2 Efecto del Cd después de 35 días de la aplicación de tratamientos.**

Las fotografías muestran que, los cortes de raíz son los más alterados a medida que la concentración de cadmio aumenta, mostrándose diferencias significativas desde el tratamiento T<sub>2</sub>. En todos los tratamientos T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>, se evidencia la malformación de las paredes celulares, por la ruptura de las células de la exodermis y las células del córtex, así como también la acumulación de solutos en los tratamientos T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>.

Los cortes transversales de tallo y foliolo de los tratamientos T<sub>1</sub> (2 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva), T<sub>2</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L +

Solución nutritiva), T<sub>3</sub> (6 mg de CdSO<sub>4</sub>/L+ Solución nutritiva) y T<sub>4</sub> (8 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva), no muestran diferencias significativas con el tratamiento T<sub>0</sub> o control (Tabla 28) (Figura 36).

#### **4.4.3 Efecto del Cd después de 50 días de la aplicación de tratamientos.**

Las fotografías muestran que, los cortes transversales de raíz son los más alterados a medida que la concentración de cadmio aumenta. En todos los tratamientos T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>, las paredes celulares se ven más afectadas, no solo por la ruptura de las células sino por la gran concentración de solutos en ellas, alterando la forma esférica de la raíz.

Los cortes transversales de tallo de los tratamientos T<sub>3</sub> (9 mg de CdSO<sub>4</sub>/L+ Solución nutritiva) y T<sub>4</sub> (12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva), fueron los tratamientos que mostraron una concentración de solutos en la región del cambium vascular, diferencia significativa con el tratamiento T<sub>0</sub> o control.

Los cortes transversales de los folíolos en los tratamientos T<sub>1</sub> (3 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva), T<sub>2</sub> (6 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva), T<sub>3</sub> (9 mg de CdSO<sub>4</sub>/L+ Solución nutritiva) y T<sub>4</sub> (12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva), no muestran diferencias significativas con el tratamiento T<sub>0</sub> o control (Tabla 29) (Figura 37).

#### **4.4.4 Efecto del Cd después de 65 días de la aplicación de tratamientos.**

Las fotografías muestran que, los cortes transversales de raíz son los más alterados a medida que la concentración de cadmio aumenta. En todos los tratamientos T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>, las paredes

celulares se ven más afectadas, no solo por la ruptura de las células sino por la gran concentración de solutos en ellas, alterando la forma esférica de la raíz y las células de la región del córtex se han reducido.

Los cortes transversales de tallo del tratamiento T<sub>2</sub> (8 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva), T<sub>3</sub> (12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L+ Solución nutritiva) y T<sub>4</sub> (16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva), fueron los tratamientos que mostraron una concentración de solutos en la región del medular y la región del cambium vascular, a diferencia significativa con el tratamiento T<sub>0</sub> o control.

Los cortes transversales de los folíolos en los tratamientos T<sub>3</sub> (12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L+ Solución nutritiva), T<sub>4</sub> (16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva), son los que mostraron diferencia significativa con el tratamiento T<sub>0</sub> o control, ya que presentaban bordes irregulares en la región de la vena principal (Tabla 29) (Figura 38).

#### **4.5 Índice de tolerancia**

En esta etapa del experimento, se obtuvo los pesos en gramos de la biomasa aérea con la suma de los pesos de la biomasa de tallos y folíolos. Los cuales fueron 10.47 para el T<sub>0</sub> o control (solución nutritiva), 7.15 para T<sub>1</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva), 6.54 para T<sub>2</sub> (8 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva), 4.32 para T<sub>3</sub> (12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L+ Solución nutritiva) y 2.97 para T<sub>4</sub> (16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva),

El cálculo del índice de tolerancia consistió en la relación entre la biomasa aérea de un tratamiento con cadmio (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> o T<sub>4</sub>) y la biomasa aérea del tratamiento control el T<sub>0</sub> o control (solución nutritiva). Los resultados muestran lo siguiente que para el T<sub>0</sub> o control (solución

nutritiva) se obtuvo un índice de tolerancia de 1, para T<sub>1</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) 0.6829 (68.29%), para T<sub>2</sub> (8 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) 0.6246 (62.46%), para T<sub>3</sub> (12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L+ Solución nutritiva) 0.4126 (41.26%) y por ultimo para T<sub>4</sub> (16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) 0.2836 (28.36%).

Por lo que se confirma que la tolerancia disminuye a medida que la concentración con cadmio de los tratamientos T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub> aumenta (Tabla 30) (Figura 40).

#### **4.6 Análisis de Cd por espectrofotometría de adsorción atómica de llama**

Las muestras de sustrato evaluadas por espectrofotometría dieron como resultado que existe una disminución de la concentración de cadmio, obteniendo que para el tratamiento T<sub>1</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva), solo quedaron 2.21 mg/kg, para T<sub>2</sub> (8 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) quedaron 6.412 mg/kg, para T<sub>3</sub> (12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L+ Solución nutritiva) quedó 10.68 y para T<sub>4</sub> (16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) quedó 12.59 mg/kg.

A su vez, las muestras de la planta, que se obtuvieron como resultado de la suma de las muestras de raíz, tallo y foliolos, mostraron un aumento poco significativo cuando la concentración de cadmio aumenta, teniendo así que para T<sub>1</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) se obtuvo 1.79 mg/kg, para T<sub>2</sub> (8 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) 1.583 mg/kg, para T<sub>3</sub> (12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L+ Solución nutritiva) 1.314 y para T<sub>4</sub> (16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) 3.41 mg/kg (Tabla 31) (Figura 41).

En el análisis de los órganos de la planta para T<sub>1</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) se obtuvo 1.5 mg/kg en raíz, 0.21 mg/kg en tallo y 0.08 mg/kg en folíolos, para T<sub>2</sub> (8 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) se obtuvo 1.37 mg/kg en raíz, 0.184 mg/kg en tallo y 0.031 en folíolos, para T<sub>3</sub> (12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L+ Solución nutritiva) se obtuvo 1.15 mg/kg en raíz, 0.11 mg/kg en tallo y 0.054 mg/kg en folíolos, y para el T<sub>4</sub> (16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L + Solución nutritiva) se obtuvo 3.13 mg/kg en raíz, 0.15 en tallo y 0.13 para folíolos. (Tabla 32) (Figura 42).

## CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

### 5.1 Germinación de semillas

Los resultados en este ensayo, muestran el aumento porcentual de la germinación de semillas al utilizar shock térmico con agua caliente, como métodos de inhibición de dormancia, tal y como describe Suarez y Melgarejo (2010), Tapia et al. (2014), Flores-córdova et al. (2016) y Orozco-cardona et al. (2010) en sus investigaciones.

Conjuntamente, estos investigadores utilizan otro tipo de métodos para la inhibición de la dormancia como el método mecánico empleando lijado de semillas (Tapia et al. 2014) , método químico utilizando  $H_2SO_4$  (Suarez and Melgarejo 2010), HCl (Orozco-cardona et al. 2010) y exposiciones a oscuridad, luz solar y luz UV (Flores-córdova et al. 2016), los cuales tienen resultados similares con el método aplicado en este ensayo.

Sin embargo Sanabria et al. en el 2001, al utilizar escarificación térmica detecta un efecto adverso en la viabilidad de la semillas, y esto puede ser debido al tiempo de inmersión en el agua caliente, que pudo ser muy agresivo para el embrión aumentando la respiración y reduciendo las reservas (Muñoz et al. 2004), lo cual no se evidenció en este trabajo ya que se emplearon tiempos reducidos y temperaturas por debajo de la temperatura de ebullición.

Según Barceló Col et al. (2008), el uso de fitohormonas como las giberelinas cumplen un rol fundamental en el crecimiento y desarrollo de las semillas, por lo que en esta investigación se utilizó ácido giberélico 50 mg/kg para acelerar la germinación, este efecto acelerador fue además empleado en las investigaciones de Mandujano et al. (2007), Saldívar-Iglesias et al.(2010) y Villalobos et al. (1992). Este último autor, empleó 6-benzilamino-purina (BAP), pero obtuvo

menores resultados en comparación del ácido giberélico (AG<sub>3</sub>), lo que corrobora el uso de esta fitohormona en el presente trabajo.

Además De la Cuadra en el 2011, menciona que el efecto del ácido giberélico no solo sería hormonal sino también hace que las membranas celulares sean más permeables a otras sustancias, como el agua.

Este procedimiento previo a la germinación de semillas también fue reportada por Chico-ruiz et al. (2012) quien utilizó *Helianthus annuus*, la cual fue sometida a diferentes concentraciones de plomo para evaluar la capacidad remediadora de la raíz, y se utilizó escarificación manual y lavados de semillas tanto con agua potable como con agentes desinfectantes.

## **5.2 Tasa de supervivencia**

El presente trabajo utilizó la relación entre el número de plantas vivas y el número de plantas iniciales, después de determinado tiempo de aplicación de tratamientos con cadmio, con el fin de evaluar la supervivencia de la planta frente a este metal pesado, lo cual no se ha reportado en ninguna de las investigaciones aplicadas a la fitorremediación de suelos.

Sin embargo, esta tasa de supervivencia es mencionada por Arribalzaga (2007) como medida de supervivencia que toma en cuenta la relación del número de individuos que sobreviven en un momento T, entre el número total de individuos, y menciona que el análisis de supervivencia en una investigación experimental, es una herramienta muy útil, que permite evaluaciones efectivas de distintos tratamientos.

El tiempo de exposición a los tratamientos empleada de 65 días fue similar a los tiempos empleados por Cruz-Landero et al. (2010) quien empleó 80 días para la exposición de tratamientos y Ehsan et al. (2009)

quien utilizó 96 días para su investigación, a diferencia de Jara Peña et al. (2014), quien empleó 365 días y Chico-ruiz et al. (2012) que utilizó 35 días para la exposición a sus tratamientos.

### 5.3 Análisis morfológico

Los parámetros utilizados en raíz, tallo y foliolos fueron estudiados en investigaciones como las de Labra-Cardón et al. (2012), Chico-ruiz et al. (2012), Oliet Palá et al. (2000), Ehsan et al. (2009), Oliet Palá et al. (1997).

Tapia y Fries (2007) mencionan que la característica esencial en *Lupinus mutabilis* son sus raíces, las cuales presentan gran cantidad de raíces secundarias, además como rasgo distintivo tiene un tallo único de forma cilíndrica poco aplanada y hojas en forma de láminas de tipo digitado con un número variable de foliolos de 5-12, esto es corroborado por las ejemplares de los tratamientos control.

En el presente trabajo se evidenció la reducción significativa en la longitud de la raíz principal a los 35 días de exposición a los tratamientos de 17.3 cm (tratamiento T<sub>0</sub> o control) a 2.325 cm. (tratamiento T<sub>4</sub>: 8 mg de CdSO<sub>4</sub>/L), lo cual es corroborado en los estudios de Wang et al. (2007), donde obtuvo el mismo efecto de reducción en la longitud de raíces en *Zea mays* L. al exponerla a concentraciones elevadas de cadmio.

Sin embargo, Chico-ruiz et al. (2012) utilizó *Helianthus annuus* en ensayos de remediación de suelos con plomo durante 35 días, los resultados muestran que la longitud de la raíz y el tallo no se vieron afectados por la adición de este metal pesado, lo cual difiere lo obtenido en esta investigación con cadmio, donde sí se mostró reducción significativa.

Esta diferencia en los resultados es debido a que cada uno de los metales pesados (Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, Ni, Hg, Co, Ag, Au) tienen efectos

específicos en cada órgano de la planta e interactúa en vías metabólicas distintas, esto es mencionado por Gal and Baena (2008).

En esta investigación se observó el cambio de color de la raíz de un color amarillento a un marrón oscuro además del engrosamiento de la misma, lo cual confirma lo referido con (Rodríguez Serrano et al. 2008), que menciona que la acumulación de cadmio se da en el sistema radicular de las plantas, siendo esta retenida, como fin de proteger los demás órganos de la misma.

Ehsan et al. (2009) expuso durante 96 días a ejemplares de *Lupinus uncinatus* a diferentes concentraciones de cadmio (9, 18 y 27 mg/kg) y obtuvo como resultado una disminución en el número de hojas de 66.25 (tratamiento control) a un 29.42 (tratamiento 27 mg/kg de cd), lo que coincide con nuestra investigación que, a los 65 días de exposición de tratamientos se obtuvo una disminución de 67.8 (tratamiento T<sub>0</sub> o control) a un 9.5 (tratamiento T<sub>4</sub>: 16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L).

Además, este autor también evaluó la altura de la planta, obteniendo una disminución de 32 cm. (tratamiento control) a 10 cm. (tratamiento 27 mg/kg de cd), lo que corrobora los resultados obtenidos en esta investigación a los 65 días después de la aplicación de los tratamientos, donde también se evidencio una reducción en la longitud del tallo de 41.2 cm. (tratamiento T<sub>0</sub> o control) a 12 cm. (tratamiento T<sub>4</sub>: 16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L).

En otras investigaciones se utiliza el número de folíolos como parte del análisis morfológico, debido a la importancia que tiene esta área en la fotosíntesis (Castañeda-Saucedo et al. 2013). Las hojas compuestas son más difíciles de procesar sin ayuda de instrumentos como lectores ópticos o planímetros (Warnock et al. 2006), sin embargo, algunos autores utilizan las mediciones en largo y ancho para obtener el área de la misma (Galindo y Clavijo 2007).

La sustitución de los nutrientes esenciales en el sitio de intercambio catiónico es un efecto indirecto de la toxicidad de metales pesados en plantas. A nivel molecular el cadmio es un conocido bloqueador del calcio en la membrana plasmática, además de causar estrés oxidativo; el resultado de todo ello suele ser un daño severo en el ADN y en los lípidos (Navarro-Aviñó et al. 2007).

#### **5.4 Análisis histológico**

Los resultados obtenidos en esta investigación muestran alteraciones severas en la raíz, para todos los tratamientos con cadmio a los 20, 35, 50 y 65 días, lo que fue similar para Marcano et al. (2001) quien evaluó raíces de *Allium cepa* L. con diferentes concentraciones de cadmio, y obtuvo que además de alteraciones morfológicas en las células, hay un efecto citotóxico afectando vacuolas, núcleo y nucléolos.

La concentración de cd en las paredes celulares de la raíz de *Lupinus mutabilis* constituye una de las principales barreras de defensa mediante la inmovilización del cadmio por medio de las pectinas, como menciona Benavides et al. (2005), que además hace referencia a que los carbohidratos extracelulares (mucílago y calosa) de la raíz también pueden intervenir en la inmovilización del metal.

Hasan et al. (2009) mencionan que los efectos directos de la toxicidad de metales pesados incluyen la inhibición de las enzimas que se encuentran en el citoplasma y el estrés oxidativo, lo que resulta en daños a las estructuras celulares e incluso muerte celular, lo cual corrobora con las alteraciones celulares en *Lupinus mutabilis* Sweet, encontradas en esta investigación.

El transporte de este elemento en las plantas es debido a la fuerza del proceso de ósmosis, que lleva los nutrientes por el tejido xilémico, esta

fuerza de succión que tiene la ósmosis se produce cuando en las hojas se pierde agua producto de transpiración, por lo que la fuerza atrae agua desde las raíces hacia las hojas, este efecto es mencionado por Navarro-Aviñó et al. (2007), lo cual coincide con lo encontrado en esta investigación, ya que la parte aérea de la planta, fue también afectada por la exposición a concentraciones más elevadas de cadmio.

### 5.5 Índice de tolerancia

Se utilizó el índice de tolerancia como la relación entre la biomasa aérea del tratamiento con cadmio y la biomasa aérea del tratamiento control Watson et al. (2003) (Diez Lázaro 2008) y este índice fue el valor de comparación en esta investigación. Sin embargo Díaz y Montiel (2011), solo utiliza los valores de biomasa seca para determinación de la tolerancia.

Los resultados en esta investigación, muestran una disminución en el índice de tolerancia de *Lupinus mutabilis* Sweet de 68.29% a 28.36%, a medida que la concentración del elemento contaminante aumenta, lo que es corroborado por Jara Peña et al. (2014), que utilizó *Lupinus balianus* en sus trabajos experimentales y presento una disminución de 77.2% a 20% a medida que el porcentaje de relave minero aumentara en el sustrato, y Ehsan et al. (2009) al utilizar concentraciones de cd en mg/kg de 9, 18 y 27 en *Lupinus uncinatus*, obteniendo una disminución en los índices de tolerancia de 88% a 45%.

Por otro lado Diez Lázaro (2008), obtiene un aumento del índice de tolerancia de 83.5% a 92.5% en *B. juncea*, sometida a tratamientos con cromo.

En esta investigación, *Lupinus mutabilis* presento un índice de tolerancia porcentual de 68.29% frente a la concentración más alta

empleada en el tratamiento T<sub>4</sub> (16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L), lo cual difiere con los resultados obtenidos en otras especies de la misma familia como en el trabajo de (Ehsan et al. 2009) que trabajo con *Lupinus uncinatus* obteniendo 82% de índice de tolerancia para un tratamiento de 18 mg/kg<sup>1</sup> de cadmio.

## 5.6 Análisis de espectrofotometría de absorción atómica de llama

Se utilizó espectrofotometría de absorción atómica de llama (FAAS) como método de análisis para la concentración de cadmio en el sustrato y los órganos de la planta, lo cual también fue la metodología utilizada en estudios de fitorremediación de Jara Peña et al. (2014), Díaz et al. (2011), Cruz-Landero et al. (2010), (Ehsan et al. 2009), Diez Lázaro (2008) y Ehsan (2007). Sin embargo, existen otras técnicas con las que también se podría determinar elementos contaminantes como ICP- OES (Plasma de acoplamiento inductivo con espectrofotómetro de emisión óptico) empleado por Castillo et al. (2005) para determinar la absorción de metales pesados en *Opuntia ficus indica*, y la espectrofotometría de dispersión de energía por rayos X (EDX) empleado por Morales Fonseca (2008) para cuantificar la cantidad de cromo total en porcentaje atómico y otros elementos.

Se utilizaron muestras de raíz, tallo y hoja (foliolo), cada una por separado, metodología empleada por Jara Peña et al. (2014) y Ehsan (2007), aunque otros autores como Díaz et al. (2011), evaluaron a los tallos y hojas (foliolo) en forma conjunta como “biomasa aérea”. Boyd et al. (2008), Delgadillo-lópez et al. (2011), Yang et al. (2004) y Marrero-Coto et al. (2012) mencionan en sus investigaciones que, para que una planta sea llamada “hiperacumuladora” debe retener al menos 100 ug/g<sup>-1</sup> (0.01% peso seco) de cadmio. En el presente ensayo se obtuvo 1.79, 1.583, 1.314 y 3.41 mg/kg de cadmio en las plantas expuestas a los tratamientos T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>, respectivamente, por lo

que se puede afirmar que *Lupinus mutabilis* Sweet no es una planta hiperacumuladora.

Así mismo, (Carpena, R.O. y Bernal 2007), hace mención que las plantas hiperacumuladoras de níquel (Ni) son mucho más numerosas que las de otros metales, haciendo mención a *Alyssum L.*, como una de ellas.

Jara Peña et al. (2014), menciona que *Lupinus ballianus* acumula una gran concentración de cadmio en las raíces 8.9 mg de cadmio Kg<sup>-1</sup>MS, a comparación de tallo y hojas (foliolo), y Ehsan et al. (2009) indica que *Lupinus uncinatus* absorbe la mayor cantidad de cadmio (58% del Cd absorbido por la planta) en las raíces, lo que es similar en esta investigación donde *Lupinus mutabilis* acumula 3.13 mg/kg en las raíces y una concentración menor en tallos y hojas (foliolo).

Sin embargo, Cruz-Landero et al. (2010) en su investigación obtiene una mayor concentración de cadmio en los tallos (0.31 mg/kg<sup>-1</sup>), seguida de las raíces (0.28 mg/kg<sup>-1</sup>) y por último las hojas (foliolo) (0.25 mg/kg<sup>-1</sup>) de *Lupinus versicolor*, lo cual contradice lo obtenido en el presente trabajo, donde se obtuvo menor concentración en tallos y hojas (foliolo).

## CONCLUSIONES

Se determinó una reducida capacidad fitorremediadora de *Lupinus mutabilis* Sweet mediante la acumulación de cadmio en los órganos de la planta, durante los 65 días de exposición, la cual fue evidenciada en todos los tratamientos, con un rango entre 44.75 y 11 mg/kg de cadmio.

La acumulación de cadmio se muestra en mayor proporción en las raíces con 3.13 mg/kg, seguida de los tallos (0.15 mg/kg) y hojas (foliolos) (0.13 mg/kg), registrado en el T<sub>4</sub>: 16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L.

Esta absorción del metal por medio de la planta, se confirma con la disminución del elemento contaminante en el sustrato (arena de cuarzo) en el T<sub>4</sub> de 16 a 12.59 mg/kg.

El índice de tolerancia de *Lupinus mutabilis* Sweet disminuye en relación al incremento de la concentración de cadmio, obteniendo un rango entre 68.29% T<sub>1</sub> (4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L) y 28.36% T<sub>4</sub> (16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L), en un periodo de 65 días de exposición a los tratamientos.

Los efectos del cadmio en la morfología e histología del sistema radical se evidenciaron con la reducción en la longitud de la raíz principal de 31.06 cm. (T<sub>0</sub>: solución nutritiva) a 3.55 cm. (T<sub>4</sub>: 16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L), en el número de raíces secundarias de 60 (T<sub>0</sub>: solución nutritiva) a 12.5 T<sub>4</sub> (16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L), engrosamiento y presencia de necrosis.

Los efectos del cadmio en la morfología e histología en el tallo se hicieron notorios con la reducción de la longitud del tallo de 41.2 cm. (T<sub>0</sub>: solución nutritiva) a 12 cm. (T<sub>4</sub>: 16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L), del número de nudos de 26.6 (T<sub>0</sub>: solución nutritiva) a 6 (T<sub>4</sub>: 16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L), y presencia de pigmentación en heridas.

Los efectos del cadmio en la morfología e histología en los foliolos se observaron mediante la reducción en el número de estos de 67.8 (T<sub>0</sub>: solución

nutritiva) a 9.5 (T<sub>4</sub>: 16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L), y en el área de los folíolos de 2.78 cm. (T<sub>0</sub>: solución nutritiva) a 0.51 cm. (T<sub>4</sub>: 16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L), como también la aparición de clorosis.

La tasa de supervivencia de *Lupinus mutabilis* Sweet disminuyó a medida que el tiempo y la concentración de cadmio aumentó, siendo la más baja de 0.33, en un periodo de 65 días de exposición al T<sub>4</sub>: 16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L.

La mayor viabilidad de semillas (94%) en el menor tiempo de germinación, se obtuvo incrementando al procedimiento de germinación inicial, shock térmico con agua caliente (55 – 65°C) y ácido giberélico 50 ppm.

## RECOMENDACIONES

1. Es importante realizar este tipo de investigación con las plantas desarrolladas *in situ* con el fin de conocer las concentraciones de cadmio en los suelos y en los diferentes órganos de la planta.
2. Se recomienda establecer protocolos de recuperación del cadmio en las plantas utilizadas en la fitorremediación.
3. Realizar ensayos de remediación con otras especies de leguminosas de menor valor alimenticio para comparar su capacidad fitorremediadora.
4. Se recomienda hacer los cortes histológicos empleando otros protocolos de fijación, inclusión y tinción que permitan una mejor visualización del daño ocasionado por el cadmio en el tejido.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arribalzaga E.B. Interpretación de las curvas de supervivencia\* Interpretation of survival curves. Rev. Chil. Cirujía. 2007;59(1):75–83.

Arroyo S., Ortiz B., Enrique L., Vicentina C. Cadmio: efectos sobre la salud. Respuesta celular y molecular. Acta Toxicológica Argentina. 2013;21:33–49.

Barceló Col J, Nicolás Rodrigo G, Sabater García B, Sánchez Tamés R. Fisiología vegetal. 1era edici. Piramide E, editor. Madrid-España: Coleccion Ciencia y tecnica; 2008.

Benavides M.P., Gallego S.M., Tomaro M. Cadmium toxicity in plants. Brazilian Journal plants Physiol. 2005;17:21–34.

Bonomelli C, Bonilla C, Valenzuela A. Efecto de la fertilización fosforada sobre el contenido de cadmio en cuatro suelos de Chile. Pesqui. Agropecu. Bras. 2003;38(10):1179–86.

Boyd RS, Davis MA, Balkwill K. Elemental patterns in Ni hyperaccumulating and non.hyperaccumulating ultramafic soil populations of *Senecio coronatus*. South African J. Bot. 2008;74:158–62.

Camarena F., Huaranga A., Jiménez J., Mostacero E. Revalorización de un cultivo subutilizado: Chocho o tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet). Primera Ed. Lima-Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación tecnológica (CONCYTEC); 2012.

Carpena, R.O. y Bernal M.P. Claves de la fitorremediación : fitotecnologías para la recuperación de suelos. Ecosistemas "Revista Cient. y Tec. Ecol. y medio Ambient. 2007;16(2):1–3.

Castañeda-Saucedo Ma. Claudia, Gómez-González Guillermo, Tapia-Campos Ernesto, Núñez Maciel Octavio, Barajas Pérez Juan Saúl y Rujano

Silva Martha Leticia. Efecto de *Azospirillum brasilense* y fertilización química sobre el crecimiento, desarrollo, rendimiento y calidad de fruto de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) Interciencia Oct. 2013, vol. 38 N°10.

Castillo A., Netzahual M., Pérez F., Guevara J.A. Estudio de la absorción de metales pesados por la planta de Nopal *Opuntia ficus indica*. 2005.

Ceroni A. Distribución de las leguminosas de la parte alta de la cuenca La Gallega Morropón Piura. Ecol. Apl. 2003;2(1).

Cruz-Landero N., Hernandez V.E., Guevara E., López-López M.A., Santos A.T., Ojeda-Trejo E. *Lupinus versicolor* response in soils contaminated with heavy metals from a petroleum extraction field. J. Appl. Sci. 2010;5.

Chico-ruiz J., Chico L.C., Espejo M.R., Guerrero-padilla M. *Helianthus annuus*, cuando es sometida a diferentes concentraciones de plomo concentrations of lead. REBIOL, Univ. Nac. Trujillo. Trujillo. Perú. 2012;32(2):13–9.

Chirinos-Arias MC. Tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet) una planta con potencial nutritivo y medicinal. Rev. Bio Ciencias. 2015;3(3):163–72.

Dalzell H., Biddelstone A.J., Gray K.R., Thurairanjan K. Soil management: compost production and use in tropical and subtropical environments. Coletín 56 suelos la FAO. 1987;(6.6):134.

De la Cuadra C. Germinación, latencia y dormición de las semillas. Intern. Med. 2011;50(10):1089–92.

De la Vega P. La fitorremediación: plantas para tratar la contaminación ambiental. La mama pacha. 2014. p. 1.

Delgadillo-López A.E., González-Ramírez C.A., Prieto-García F., Villagomez-Ibarra J.R., Acevedo-Sandoval O. Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. Trop. ans Subtrop. agroecosystems. 2011;14:597–612.

Di Paola MM, Vicién C. Biorremediación: vinculaciones entre investigación,

desarrollo y legislación. Argentin; 2010.

Díaz J., Montiel M., Chirinos I. Determinación de la capacidad de tres especies vegetales para extraer cadmio y cobre en un suelo contaminado Rev. Fac. Agron. 2011;28(1):301–10.

Diez Lázaro J. Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados : Evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas. Tesis Dr. USC. 2008.

Durant J, Bennett DJ. Environmental biotechnology. EFB Eur. Fed. Biotechnol. Task Gr. public perceptions Biotechnol. 1999;4(January):4.

Ehsan M. Cadmiun tolerance and phytoremediation by *Lupinus uncinatus* Schldl. Colegio de Postgraduacion Institucion de enseñanza e investigacion en ciencias agricolas; 2007.

Ehsan M, Santamaría-Delgado K, Vásquez-Alarcón A, Alderete-Chavez A, De la Cruz- Landero N, Jaén-Contreras D, et al. Phytostabilization of cadmium contaminated soils by *Lupinus uncinatus* Schldl . Spanish Journal Agric. Res. 2009;7(2):390–7.

El Peruano D. Decreto Supremo Nro. 002-2013-MINAM “Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo.” 2013. 2013;491497–500.

Flores-córdova M.A., Sánchez-chávez E., Balandrán-valladares M.I., Delicias C. Efectividad de tratamientos pre-germinativos en la ruptura de la dormancia en las semillas forrajeras y de malezas. Especies evaluadas Recolección de germ. 2016;3(9):427–32.

Gal E., Baena A.R. Contaminación de suelos por metales pesados. Soc. Española Mineral. Rev. 2008;10:48–60.

Galindo Julio Ricardo y Clavijo Jairo. Modelos alométricos para estimar el área de los folíolos de arveja (*Pisum sativum* L.). Revista Corpoica - Ciencia y Tecnología Agropecuaria (2007) 8(1), 37-43.

García PEP, Cruz MIA. Los efectos del cadmio en la salud. Rev. Espec. Médico-Quirúrgicas. 2012;17(3):199–205.

Gonzales AM. Morfología de plantas vasculares: Anatomía de la raíz, nodulos radiculares. Tema 20. 2002. p. 1.

Gonzales P.L.A., Osorio F.J. Determinación espectrofotométrica por absorción atómica de la concentración de cadmio y arsénico en aguas de consumo humano de la comunidad urbana de Chuquitanta - Distrito de San Martín de Porres. Universidad Nacional Mayor de San Marcos; 2014.

Hasan S.A., Fariduddin Q., Ali B., Hayat S., Ahmad A. Cadmium: Toxicity and tolerance in plants. J. Environ. Biol. March J. Environ. Biol. 2009;30(2):165–74.

Jacobsen S.E., Mujica A., Jacobsen S-E., Mujica A. El tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet.*) y sus parientes silvestres. Bot. Econ. los andes Cent. Univ. mayor San Andrés. 2006;458–82.

Jara Peña E., Gómez J., Montoya H., Chanco M., Mariano M., Cano N. Capacidad fitorremediadora de cinco especies altoandinas de suelos contaminados con metales pesados. Rev. Peru. Biol. 2014;21(October):145–54.

Jarup L. Hazards of heavy metal contamination. US Natl. Libr. Med. Natl. Insittute Heal. 2003;68:167–82.

Jorge C. Hacia el año internacional de las legumbres (2016) hora de las leguminosas para la alimentación y la exportación. Bol. Inf. virtual sobre Conserv. Ambient. Desarro. Sosten. y calidad de vida del Perú y el mundo Impacto+/- . Lima-Perú; 2016;2(2):1.

La Dou J. Medicina Laboral y ambietal. 2da edición. El Manual Moderno, editor. mexico; 1999.

Labra-Cardón D., Guerrero-Zuñiga L., Rodriguez-Tovar A., Montes-Villafán S.,

Pérez-Jimenes S., Rodríguez-Dorantes A. Respuesta de crecimiento y tolerancia a metales pesados de *Cyperus elegans* y *Echinochloa polystachya* inoculadas con una rizobacteria aislada de un suelo contaminado con hidrocarburos derivados del petróleo. Rev. Int. Contam. Ambien. 2012;28(1):7–16.

Lezama P., Lezama K., Gómez J., Stepkowski T. Diversidad de especies del género *Lupinus L.* y de sus simbiosis en el departamento de Ancash. Pueblo cont. 2014;25(1):117–23.

Mandujano M., Golubov J., Rojas-Aréchiga M. Efecto del ácido giberélico en la germinación de tres especies del género *Opuntia* (Cactaceae) del Desierto Chihuahuense. Cact. y suculentas Mex. 2007;52(2):46–52.

Marcano L., Carruyo I., Montiel X. Alteraciones citológicas inducidas por el cadmio en células meristemáticas de raíces de cebolla (*Allium cepa L.*). Rev. Fac. Agron. 2001;18:247–57.

Marrero-Coto J., Amores-Sanchez I., Coto-Peréz O. Fitorremediación, una tecnología que involucra a plantas y microorganismo en el saneamiento ambiental. ICIDCA sobre los Deriv. la caña Azúcar. 2012;46(3):52–61.

Martí L., Cavagnaro M., Burba J.N. Metales pesados en fertilizantes fosfatados, nitrogenados y mixtos. FCA UNCuyo Rev. 2002;34(2):43–8.

Miller R.R. Phytoremediation. Technol. Overv. Rep. Ser. 1996;(October):1–10.

Morales Fonseca D.M. Determinación de la capacidad de remoción de cadmio, plomo y níquel por hongos de la podredumbre blanca inmovilizados. Pontificia Universidad Javeriana - Bogotá Colombia; 2008.

Muñoz B., Sánchez J., Almaguer W. Germinación, dormancia y longevidad potencial de las semillas de *Guazuma ulmifolia*. Pastos y Forrajes. 2004;27:25–33.

Navarro-Aviñó J.P., Aguilar Alonso I., López-Moya J.R. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas*. 2007;16(2):10–25.

Núñez M.Á. Manual de técnicas agroecológicas. 1era ed. Mexico D.F., Mexico: 2000; 2000.

Oh K., Cao T., Li T., Cheng H. Study on Application of Phytoremediation Technology in Management and Remediation of Contaminated Soils. *J. Clean Energy Technol.* 2014;2(3):216–20.

Oliet Palá J., Planelles González R, López Árias M, Artero Caballero F. Efecto de la fertilización en vivero sobre la supervivencia en plantación de *Pinus halepensis*. *Cuad. la S.E.C.F.* 1997;4:69–79.

Oliet Palá J., Planelles González R, López Árias M, Artero Caballero F. El uso de protectores en planta, una repoblación de *Pinus halepensis*. 2000;77:69–77.

Olórtegui R., Paredes D., Villafán M., De la Cruz C. El Tarwi (*Lupinus mutabilis*) en Huaráz : Aspectos socioeconómicos , nutricionales y culturales. *Rev. Aporte Santiaguino*. 2010;3(1):125–31.

Orozco-cardona A.F., Franco-herrera N., Taborda-Beltrán L. Evaluación de tres métodos de escarificación en semillas de algarrobo (*Hymenaea courbaril* L.) *Rev. Univ. del Quindío*. 2010;(9):36–41.

Ramírez A. Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. *An. la Fac. Med.* 2002;63(1):51–64.

Rodríguez Badiola E., Carracedo J.C., Soler V., Hoyos M. Diferenciación de metales pesados procedentes de la actividad humana en suelos volcánicos de la isla de Tenerife. *Reun. Nac. Geol. Ambient. y Ord. del Territ.* 1990;IV:500–16.

Rodríguez Serrano M., Martínez-de la Casa N., Romero de Puertas M.C., del Rio L. A., Sandalio L.M. Toxicidad del Cadmio en Plantas. *Ecosistemas*. 2008;17(3):139–46.

Rusyniak D.E., Arroyo A., Acciani J., Froberg B., Kao L., Furbee B. *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology*. Natl. Inst. Heal. 2012;100:365–96.

Saldívar-Iglesias P., Laguna-Verda A., Gutiérrez-Rodríguez F., Domínguez-Gallindo M. Ácido giberélico en la germinación de semillas de *Jaltomata procumbens* (CAV.) J.L. Gentry. *Agon. Mesoam.* 2010;21(2):327–31.

Saldívar OL, Tovar TA, Fortoul van der GT. Cadmio. *Introd. a la Toxicol. Ambient.* 1997. p. 211–26.

Sanabria V, Silva-Acuña R, A. Oliveros M, Barrios R. Escarificación química y térmica de semillas subterráneas de *Centrosema rotundifolium*. *Bioagro.* 2001;13(3):117–24.

Sepúlveda TV, Trejo JV. *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*. Jiménez Ed. 2002.

Solano Marín AM. Movilización de metales pesados en residuos y suelos industriales afectados por la hidrometalurgia del cinc. 2005;141–90.

Suarez D., Melgarejo L.M. *Biología y germinación de semillas*. Lab. Fisiol. y Bioquim. Veg. Dep. Biol. Univ. Nac. Colomb. 2010. p. 1–24.

Tapia A.M., Romero A., Luque V., Gervasoni P., Aybar S, Lobo Furque A, et al. Diferentes técnicas de escarificación en la germinación de semillas de *Sesbania punicea*. *Rev. Agron. noroeste argentina*. 2014;34:54–5.

Tapia M.E., Fries A.M. *Guía de campo de los cultivos andinos*. 1st ed. Fao; Anpe-Perú. FAO, Roma; ANPE, Lima: Junio 2007; 2007.

Villalobos R., Herrera J., Guevara E. Germinación de la semilla de pejibaye (*Bactris gasipaes*). *Ruptura del reposo*. *Agron. Costarric.* 1992;16(1):61–8.

Wang M., Zou J., Duan X., Jiang W., Liu D. Cadmium accumulation and its effects on metal uptake in maize (*Zea mays* L.). *Bioresour. Technol.* 2007;98:82–8.

Warnock Rosemary, Valenzuela Jagger, Trujillo América, Madrid Petra y Gutiérrez Margaret. Área foliar, componentes del área foliar y rendimiento de seis genotipos de Caraota. *Agronomía trop.* 56(1) : 21-42. 2006.

Watson C., Pulford I.D., Black D.R. Screening of willow species for resistance to heavy metals : Comparison of performance in a hydroponics system and field trials Screening of Willow Species for Resistance to Heavy. *Int. J. Phytoremediation.* 2003;5(4):351–65.

Yadav S.K. Heavy metals toxicity in plants: An overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants. *South African J. Bot. Elsevier B.V.;* 2010;76(2):167–79.

Yang X.E., Long X.X., Ye H.B., He Z.L., Calvert D V., Stoffella PJ. Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Zn- hyperaccumulating plant species (*Sedum alfredii*). *Plant ans Soil.* 2004;259:181–9.

## ANEXOS

### 9.1. FIGURAS



Figura 1. Semillas de *Lupinus mutabilis* “chocho o tarwi” seleccionadas para los ensayos.



Figura 2. Preparación del sustrato: Macetas en mesa de madera dentro del invernadero.



Figura 3. Plantas germinadas con dos hojas verdaderas.

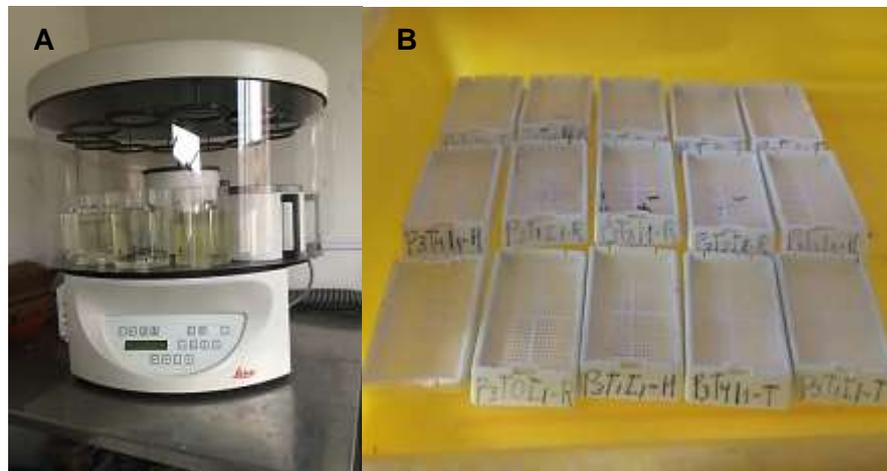


Figura 4. A. Equipo para deshidratación Leica B. Moldes con parafina y muestras.

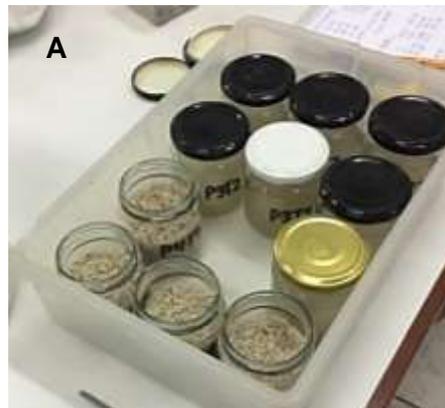


Figura 5. A. Muestras de sustrato B. Muestras de raíz (1), tallo (2) y folíolos (3).

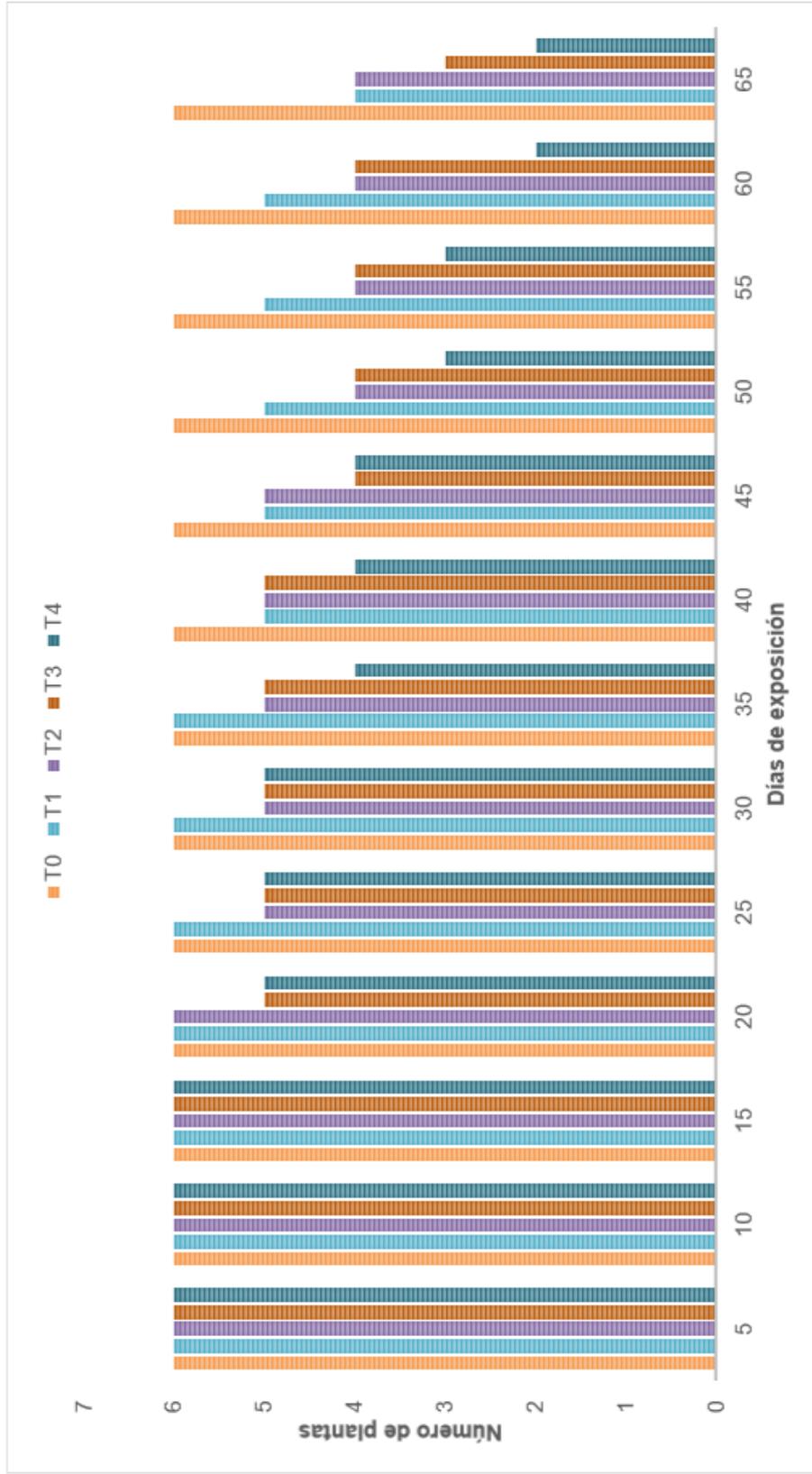


Figura 6. Respuesta del número de plantas a los tratamientos (T<sub>0</sub>, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>) en un periodo de 65 días.

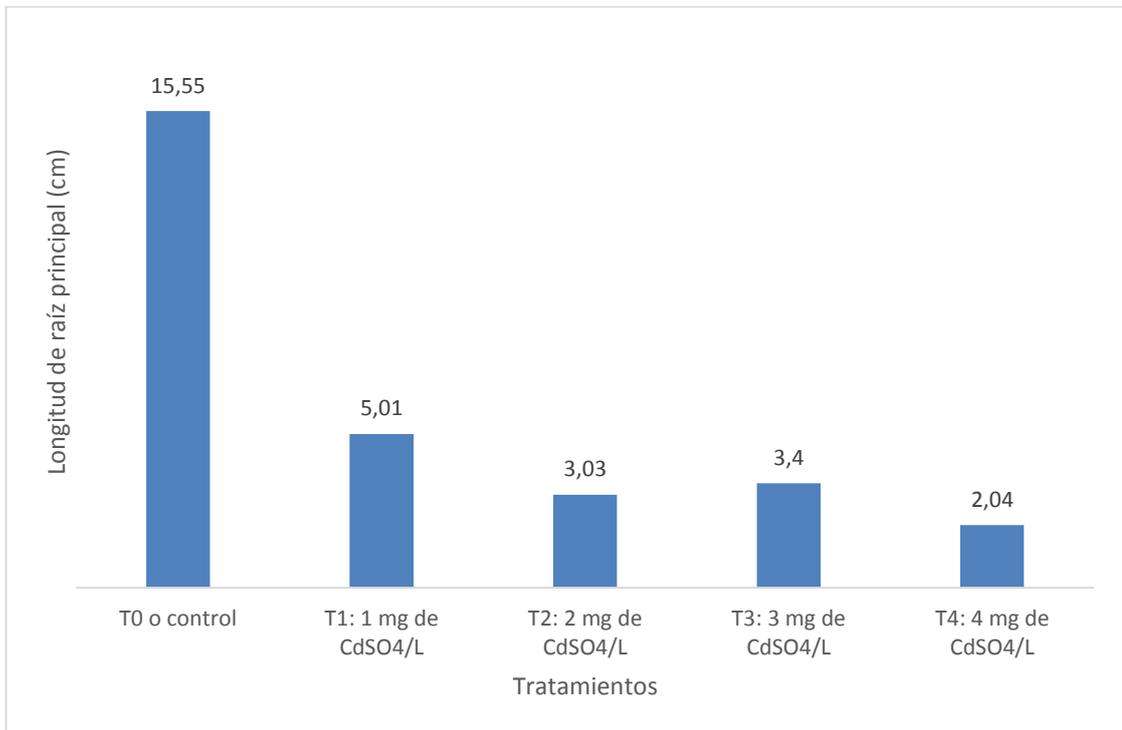


Figura 7. Efecto en la longitud de la raíz principal (cm) de *L. mutabilis* a los 20 días después de la aplicación de tratamientos con cadmio.

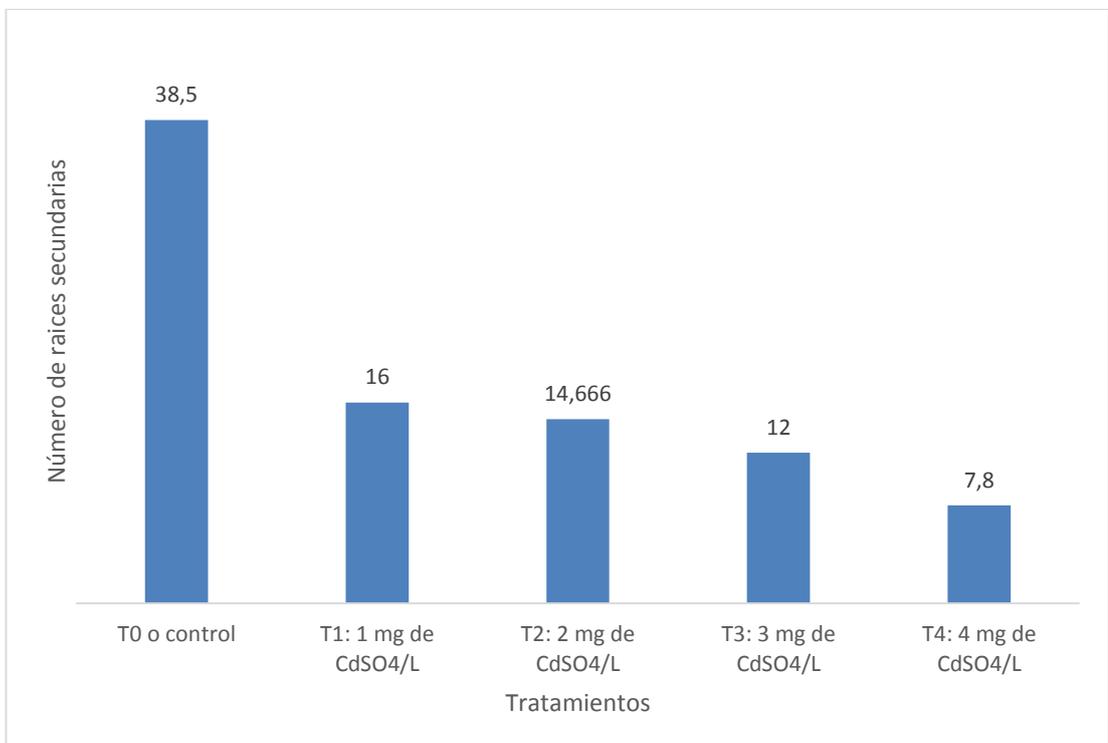


Figura 8. Efecto en el número de raíces secundarias de *L. mutabilis* a los 20 días después de la aplicación de tratamientos con cadmio.

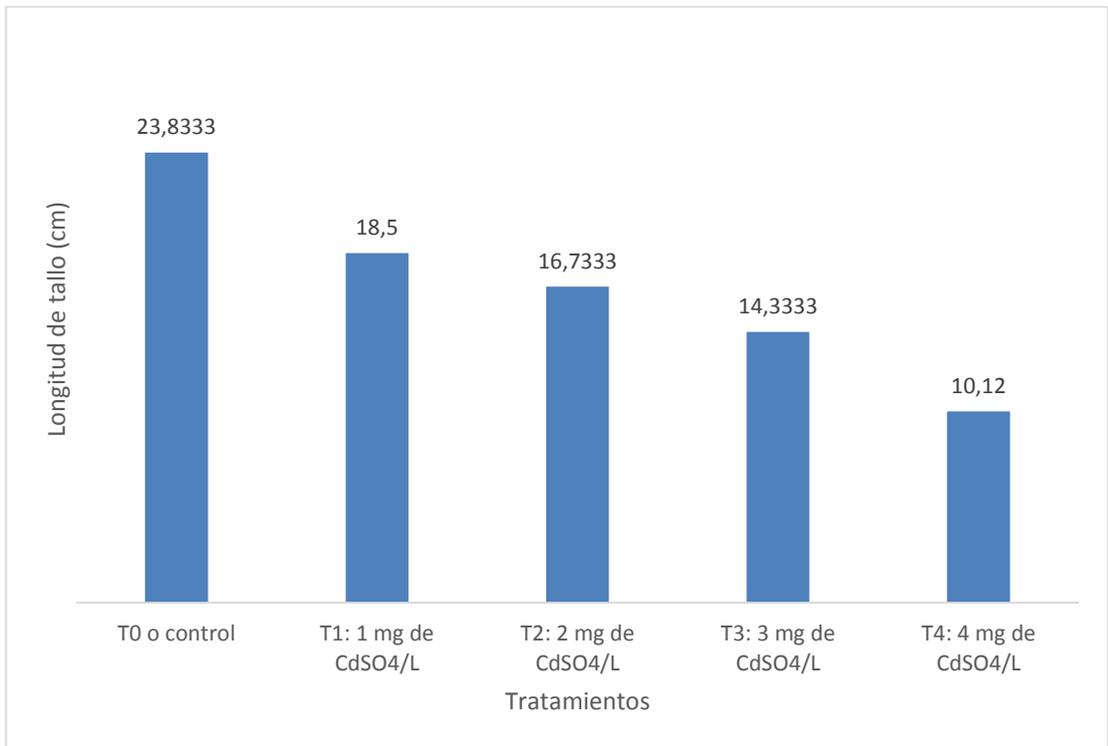


Figura 9. Efecto en la longitud del tallo (cm) de *L. mutabilis* a los 20 días después de la aplicación de tratamientos con cadmio.

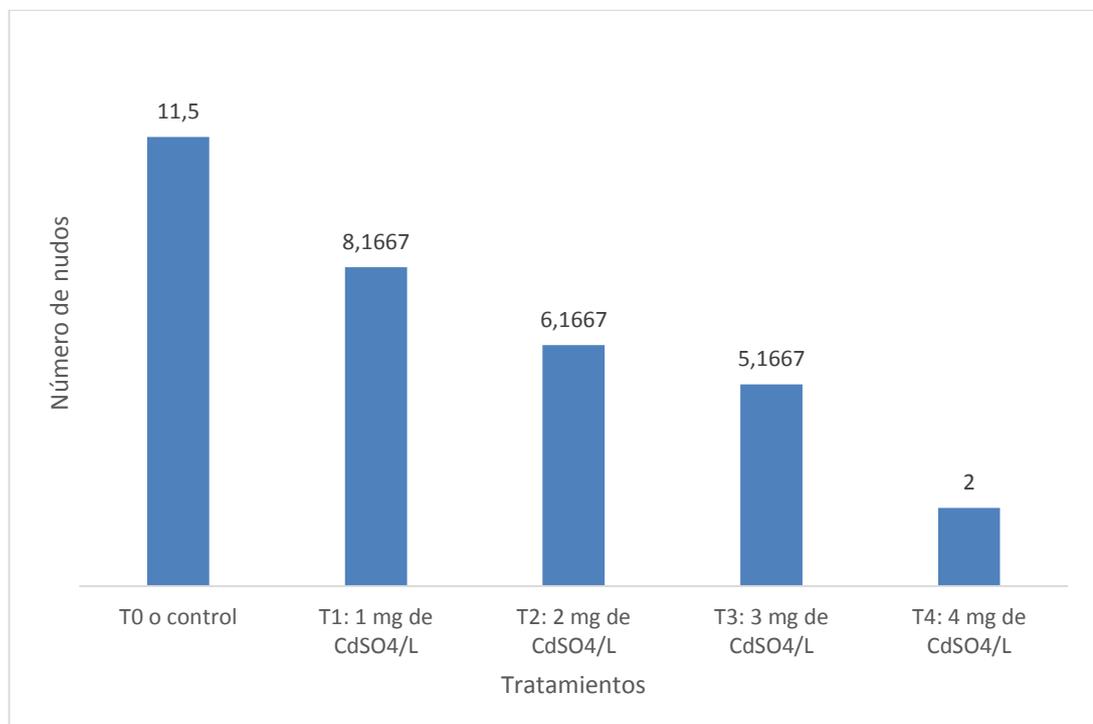


Figura 10. Efecto en el número de nudos de *L. mutabilis* a los 20 días después de la aplicación de tratamientos con cadmio.

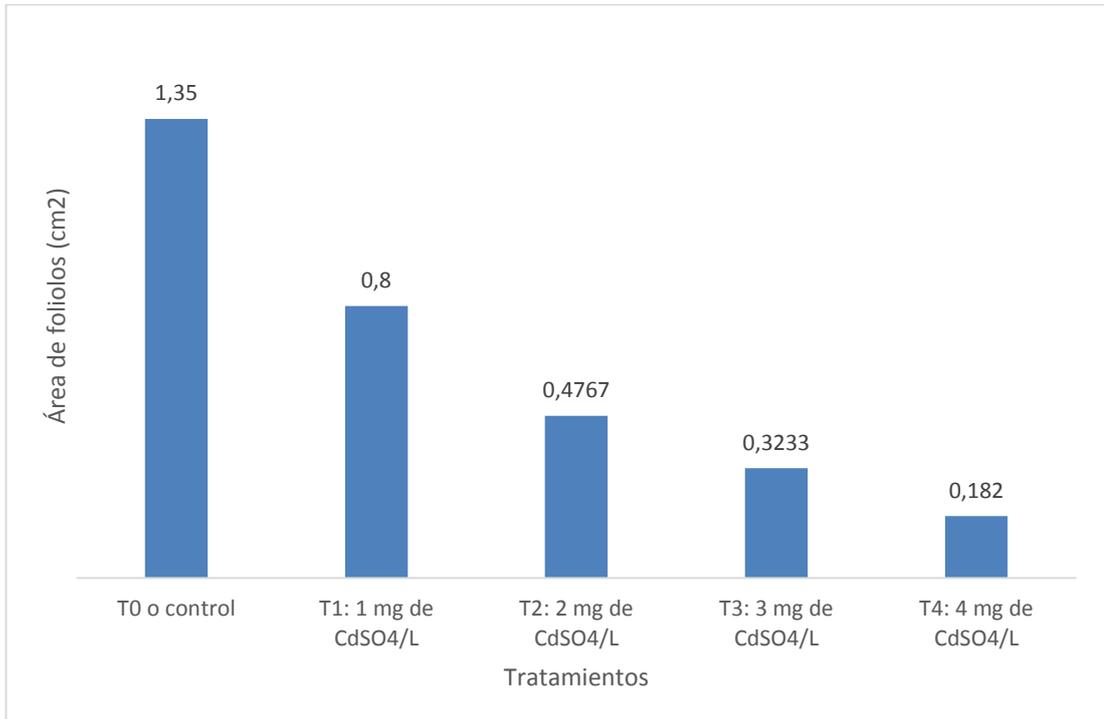


Figura 11. Efecto en el área de los foliolos (cm<sup>2</sup>) de *L. mutabilis* a los 20 días después de la aplicación de tratamientos con cadmio.

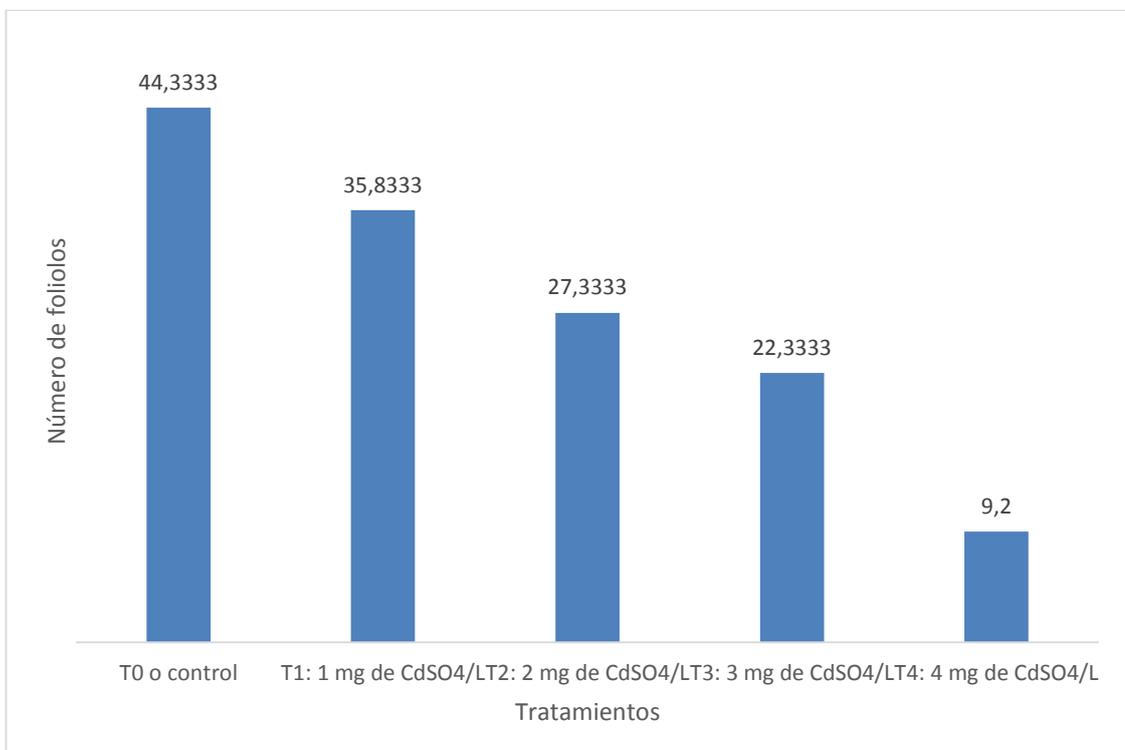


Figura 12. Efecto en el número de foliolos de *L. mutabilis* a los 20 días después de la aplicación de tratamientos con cadmio.

Tratamientos				
<b>T<sub>0</sub></b> (Control: Solución nutritiva)	<b>T<sub>1</sub></b> (1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	<b>T<sub>2</sub></b> (2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	<b>T<sub>3</sub></b> (3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	<b>T<sub>4</sub></b> (4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)
				
				
				

Figura 13. Raíz, tallo y hojas de *L. mutabilis* Sweet, evaluadas 20 días después de la aplicación de tratamientos.

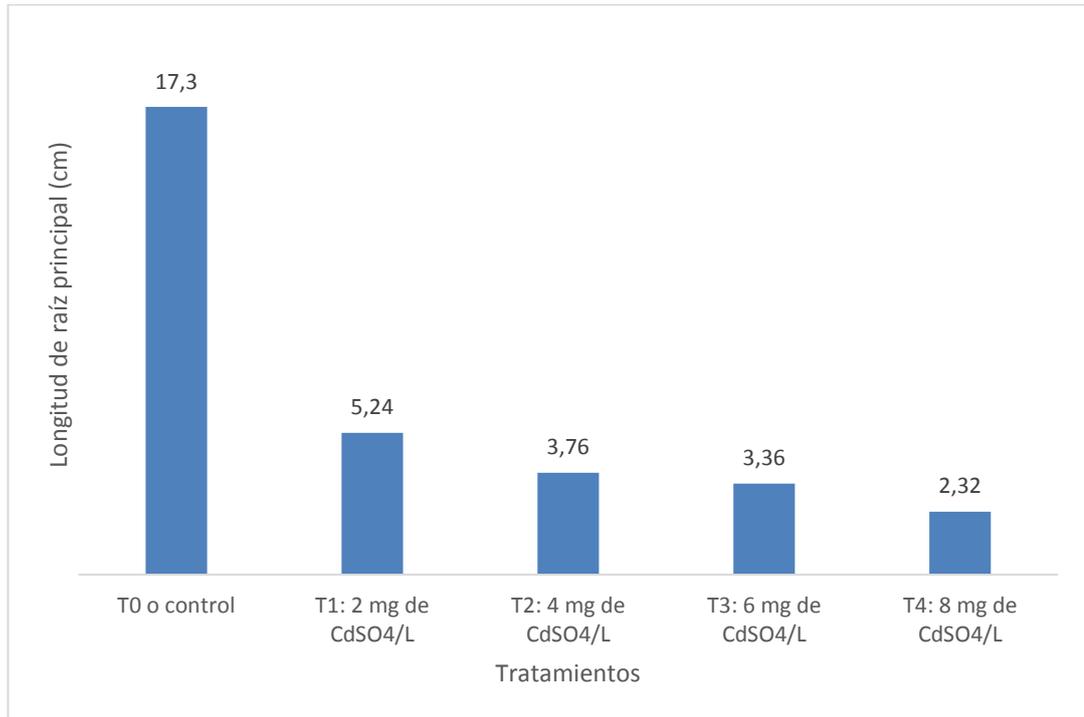


Figura 14. Efecto en la longitud de raíz principal (cm) de *L. mutabilis* a los 35 días después de la aplicación de tratamientos con cadmio.

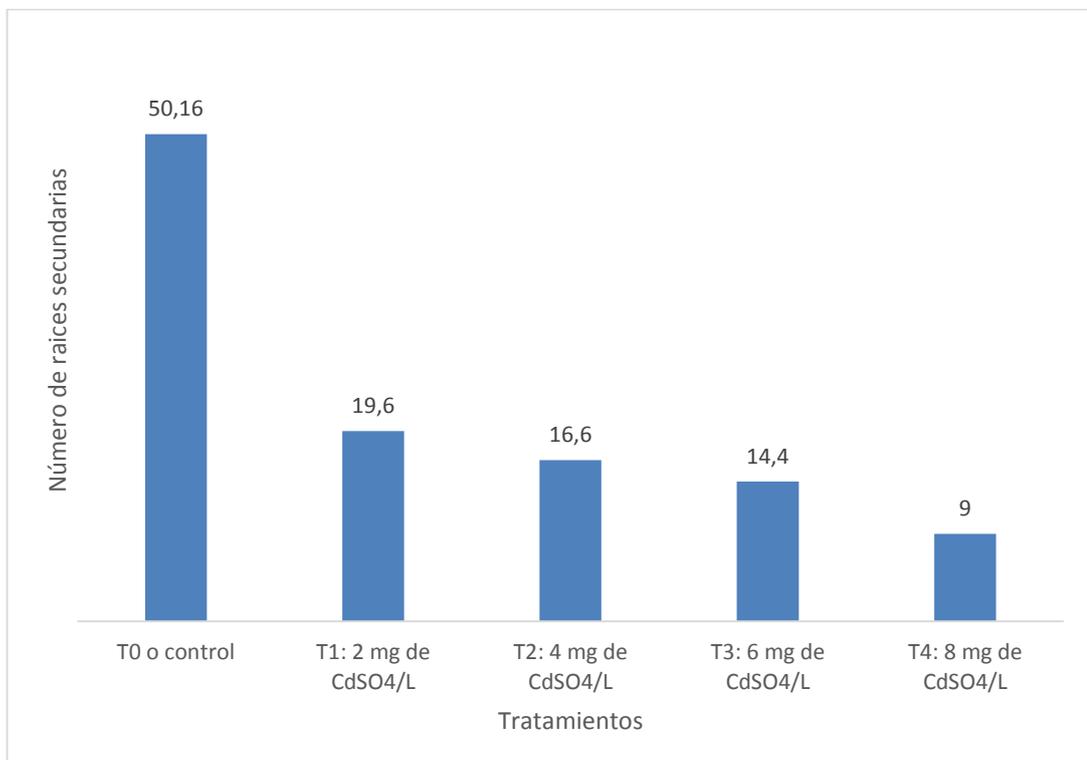


Figura 15. Efecto en el número de raíces secundarias de *L. mutabilis* a los 35 días después de la aplicación de tratamientos con cadmio.

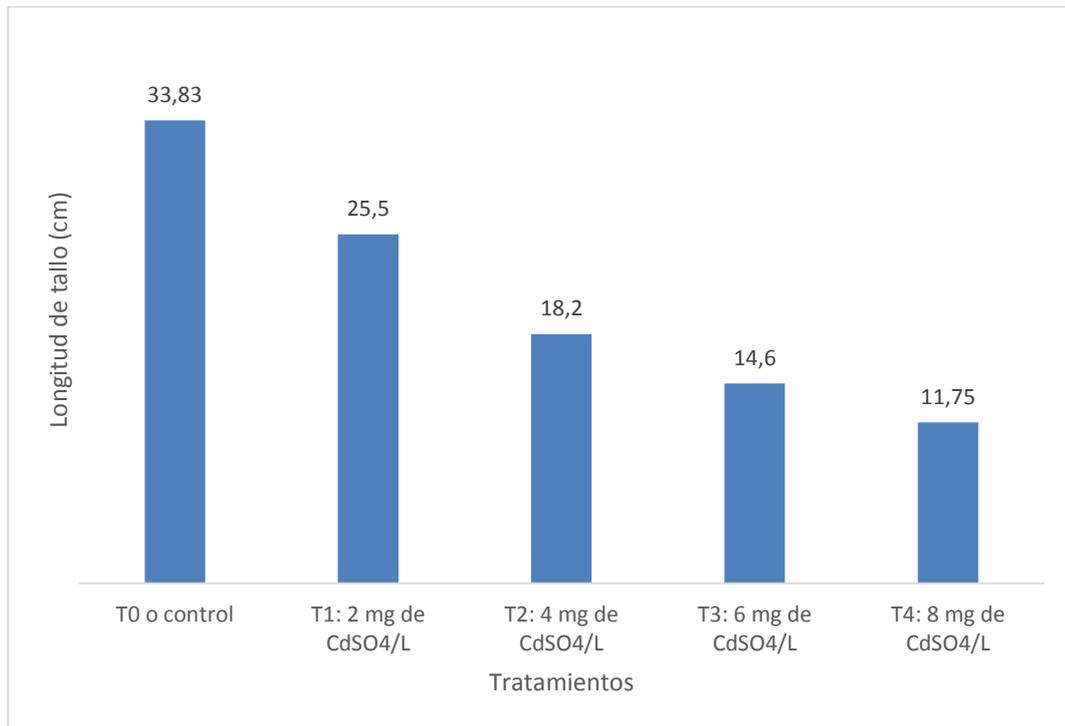


Figura 16. Efecto en la longitud de tallo (cm) de *L. mutabilis* a los 35 días después de la aplicación de tratamientos con cadmio.

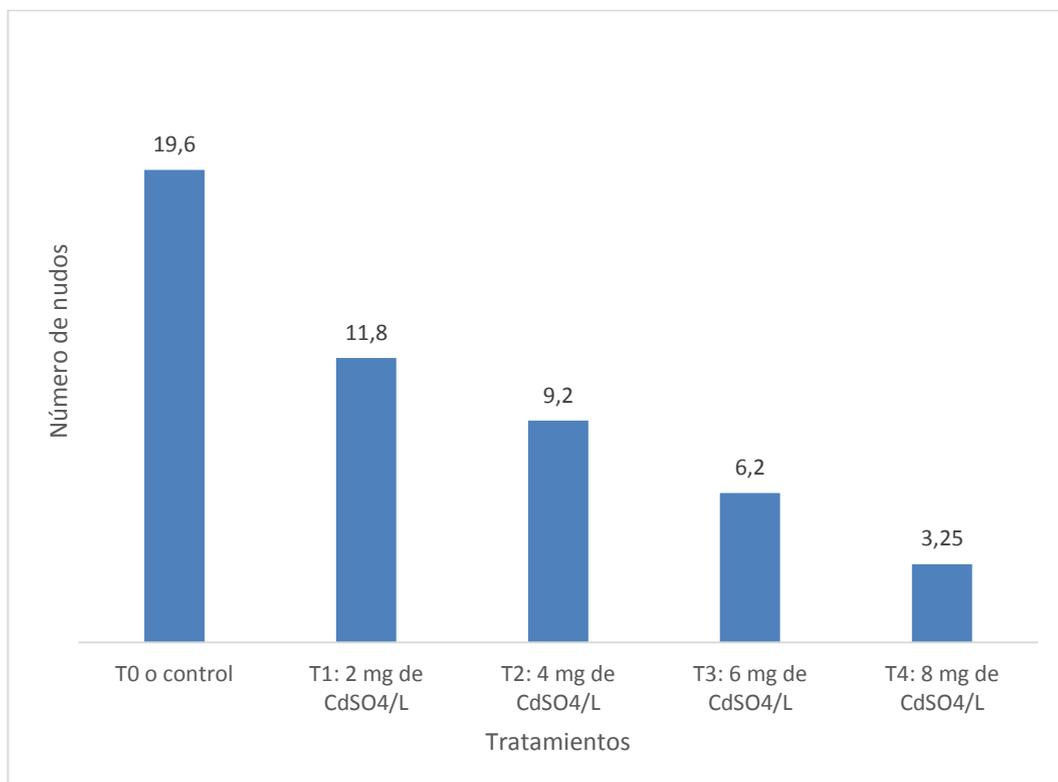


Figura 17. Efecto en el número de nudos de *L. mutabilis* a los 35 días después de la aplicación de tratamientos con cadmio.

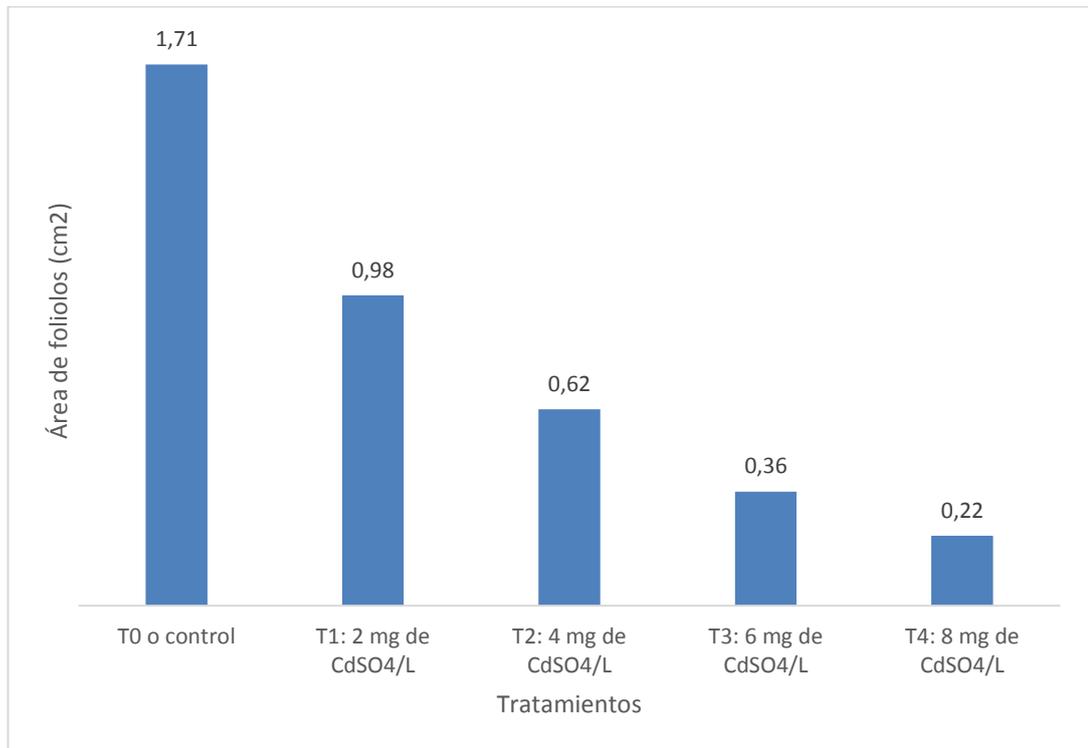


Figura 18. Efecto en el área de los foliolo (cm<sup>2</sup>) de *L. mutabilis* a los 35 días después de la aplicación de tratamientos con cadmio.

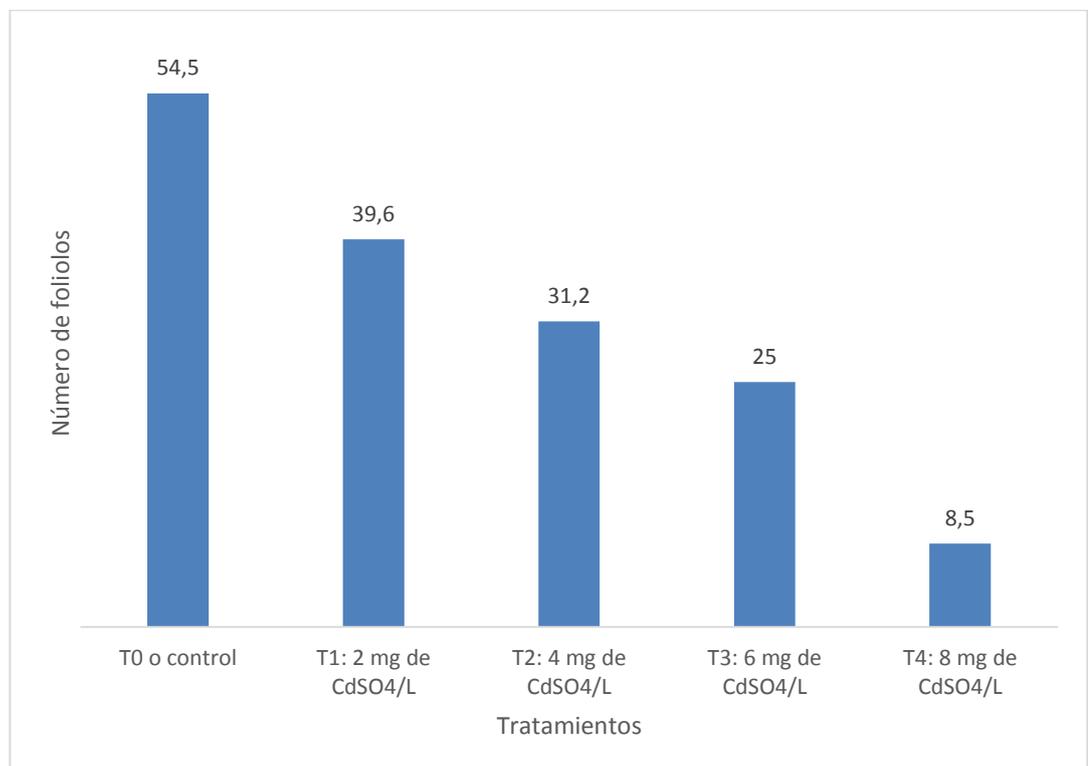


Figura 19. Efecto en el número de foliolo de *L. mutabilis* a los 35 días después de la aplicación de tratamientos con cadmio.

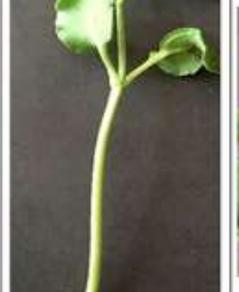
Tratamientos				
<b>T<sub>0</sub></b> (Control: Solución nutritiva)	<b>T<sub>1</sub></b> (1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	<b>T<sub>2</sub></b> (2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	<b>T<sub>3</sub></b> (3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	<b>T<sub>4</sub></b> (4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)
				
				
				

Figura 20. Raíz, tallo y hojas de *L. mutabilis* Sweet, evaluadas 35 días después de la aplicación de tratamientos.

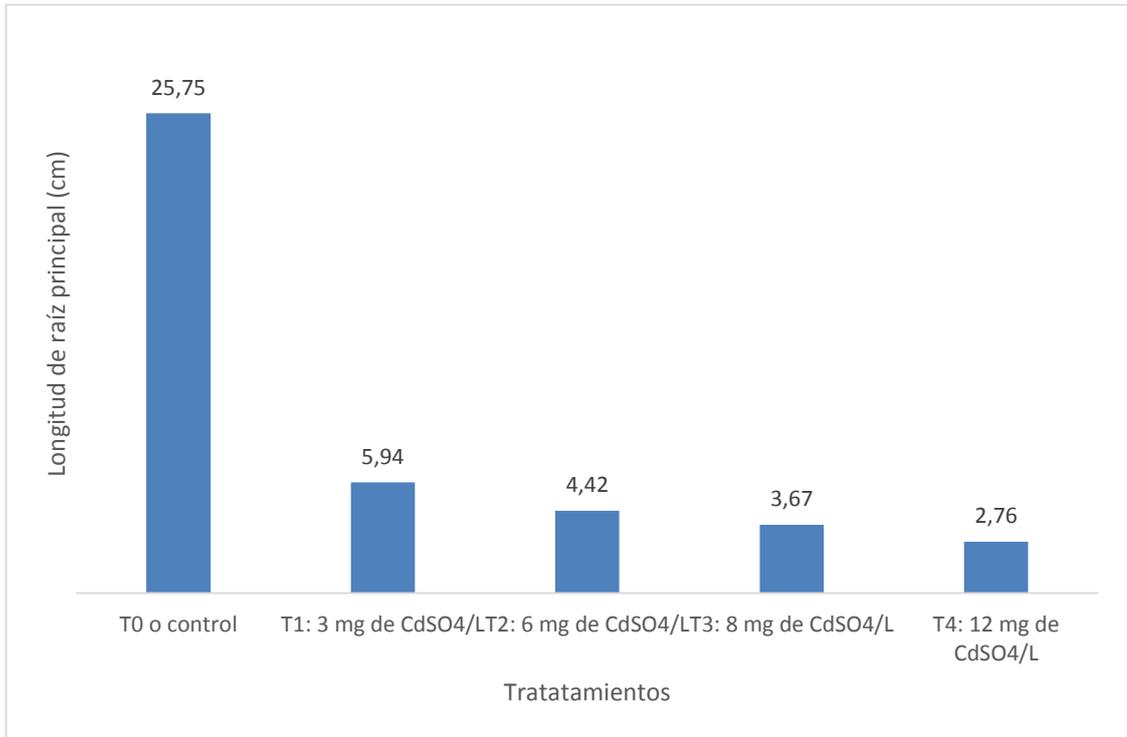


Figura 21. Efecto en la longitud de raíz principal (cm) de *L. mutabilis* a los 50 días después de la aplicación de tratamientos con cadmio.

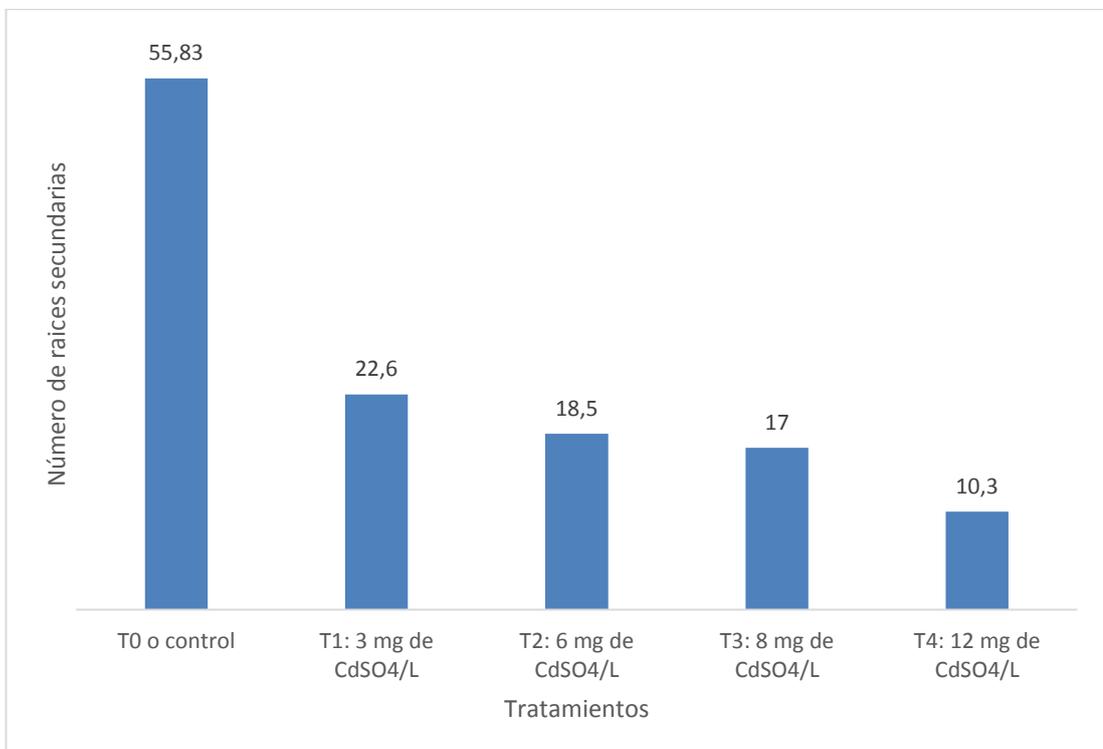


Figura 22. Efecto en el número de raíces secundarias de *L. mutabilis* a los 50 días después de la aplicación de tratamientos con cadmio.

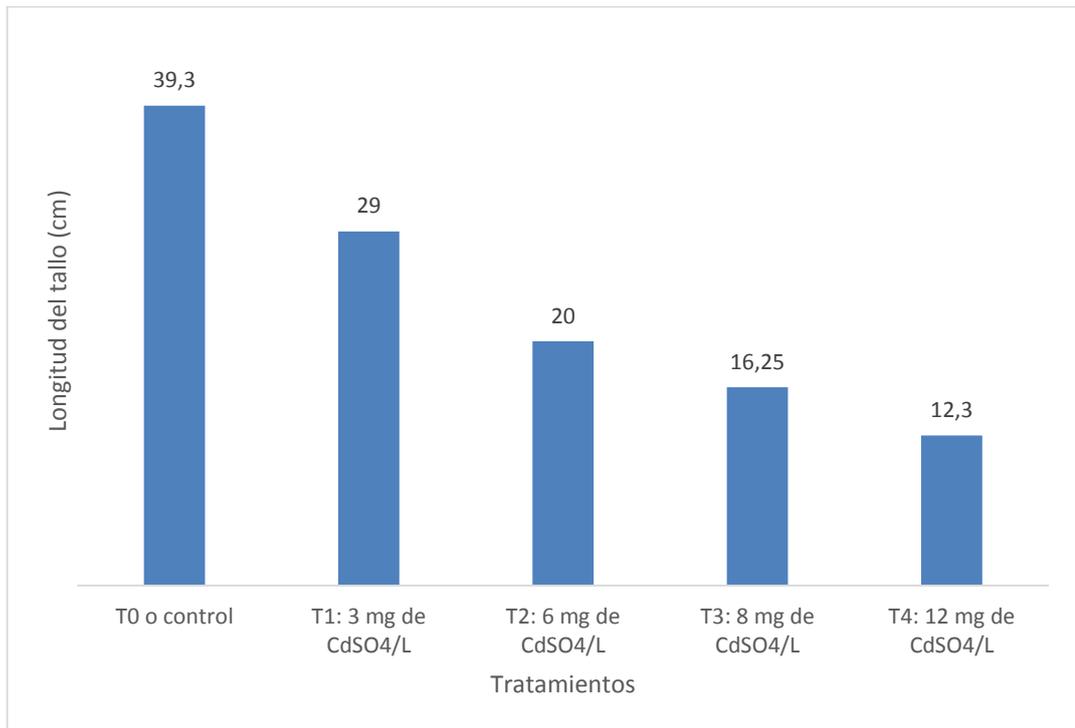


Figura 23. Efecto en la longitud de tallo (cm) de *L. mutabilis* a los 50 días después de la aplicación de tratamientos con cadmio.

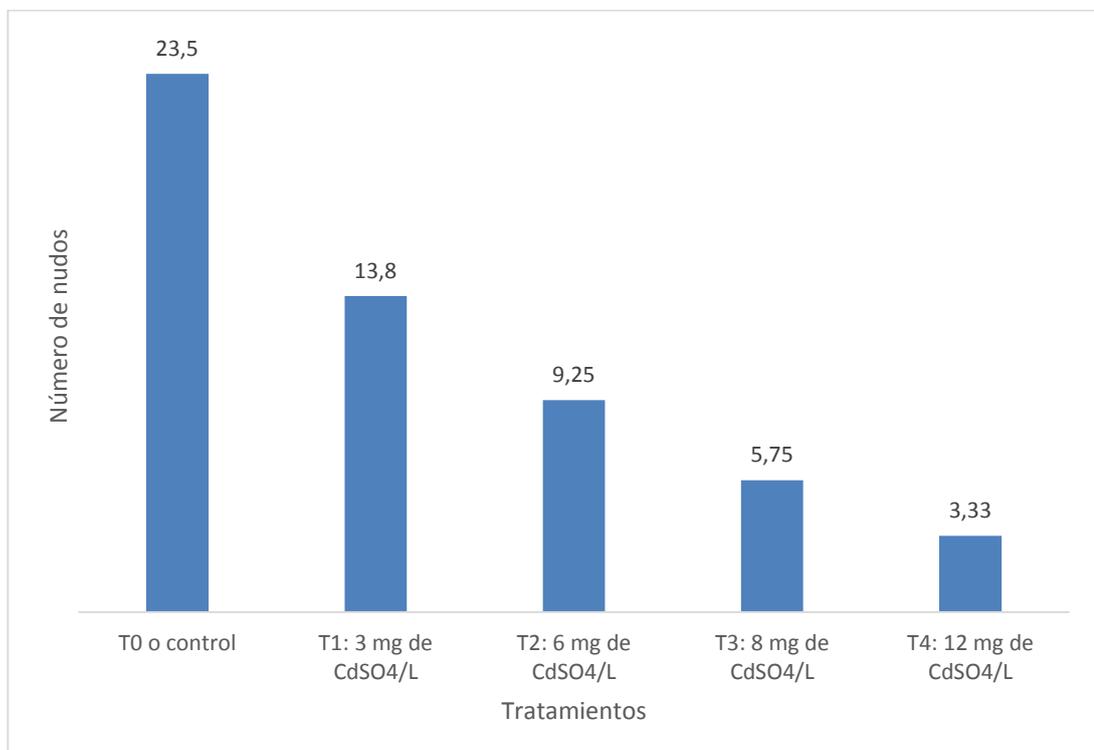


Figura 24. Efecto en el número de nudos de *L. mutabilis* a los 50 días después de la aplicación de tratamientos con cadmio.

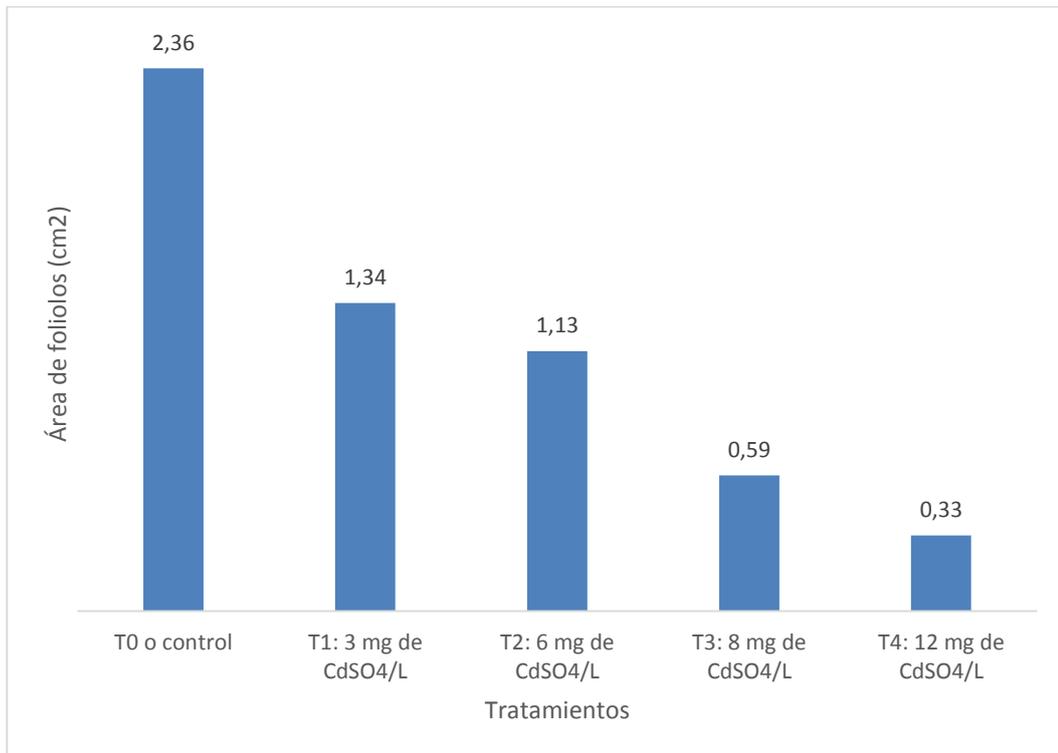


Figura 25. Efecto en el área de foliolos (cm<sup>2</sup>) de *L. mutabilis* a los 50 días después de la aplicación de tratamientos con cadmio.

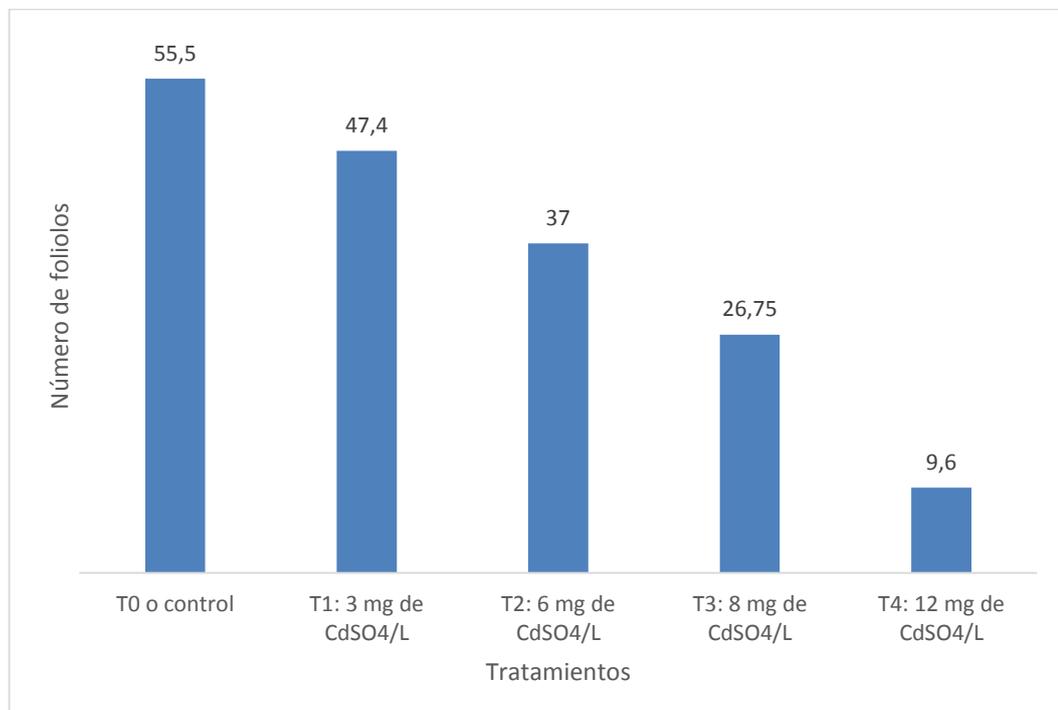


Figura 26. Efecto en el número de foliolos de *L. mutabilis* a los 50 días después de la aplicación de tratamientos con cadmio.

Tratamientos				
<b>T<sub>0</sub></b> (Control: Solución nutritiva)	<b>T<sub>1</sub></b> (1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	<b>T<sub>2</sub></b> (2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	<b>T<sub>3</sub></b> (3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	<b>T<sub>4</sub></b> (4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)
				
				
				

Figura 27. Raíz, tallo y hojas de *L. mutabilis* Sweet, evaluadas 50 días después de la aplicación de tratamientos.

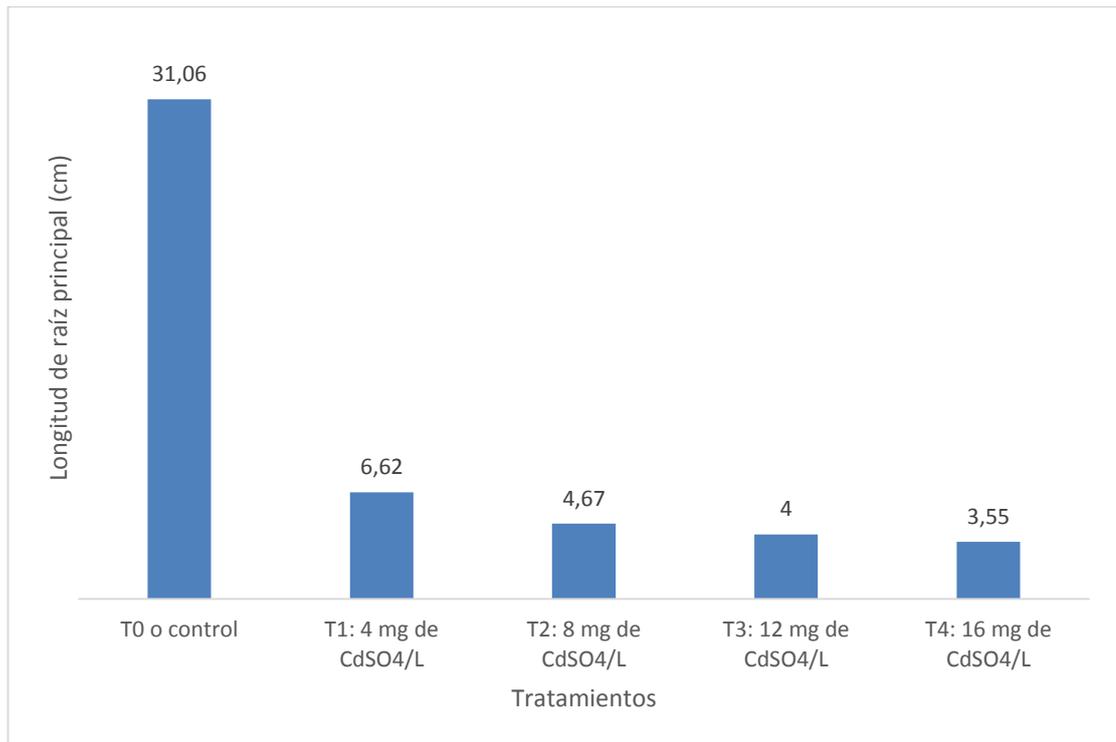


Figura 28. Efecto en la longitud de raíz principal (cm) de *L. mutabilis* a los 65 días después de la aplicación de tratamientos con cadmio.

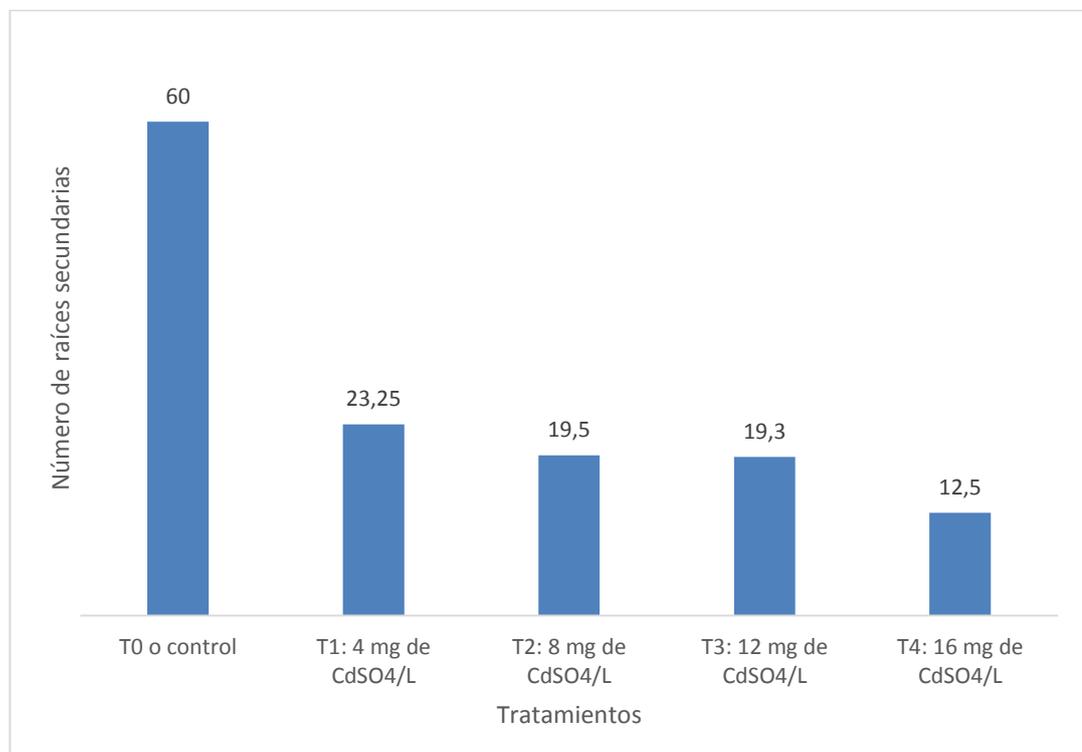


Figura 29. Efecto en el número de raíces secundarias de *L. mutabilis* a los 65 días después de la aplicación de tratamientos con cadmio.

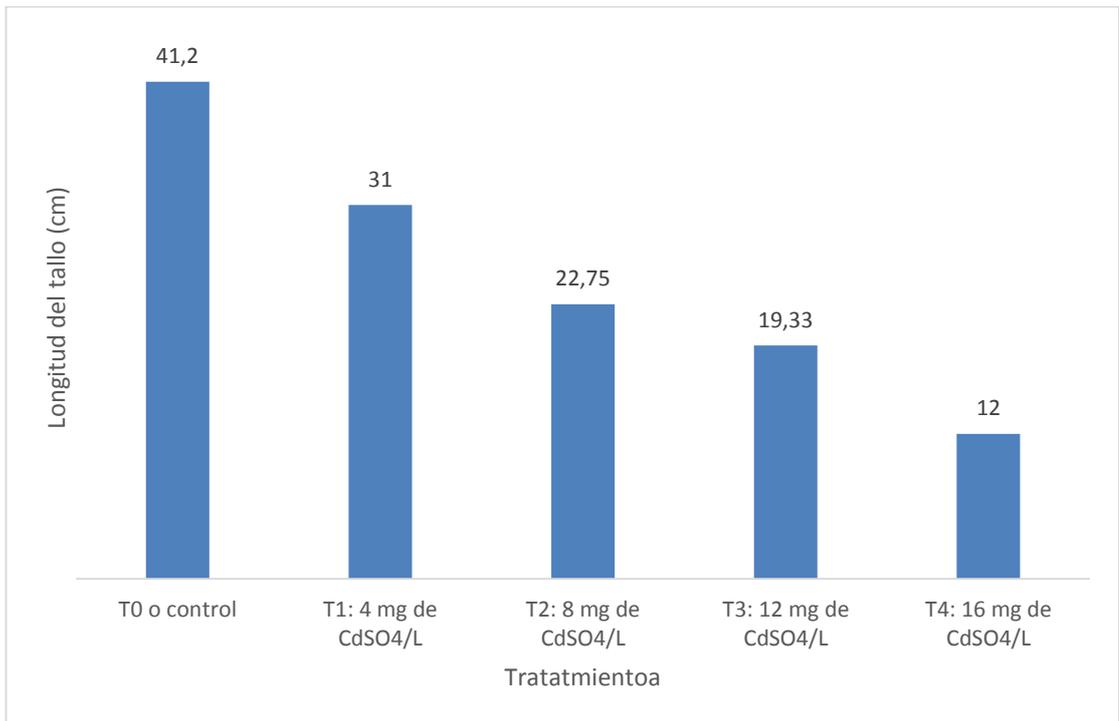


Figura 30. Efecto en la longitud de tallo (cm) de *L. mutabilis* a los 65 días después de la aplicación de tratamientos con cadmio.

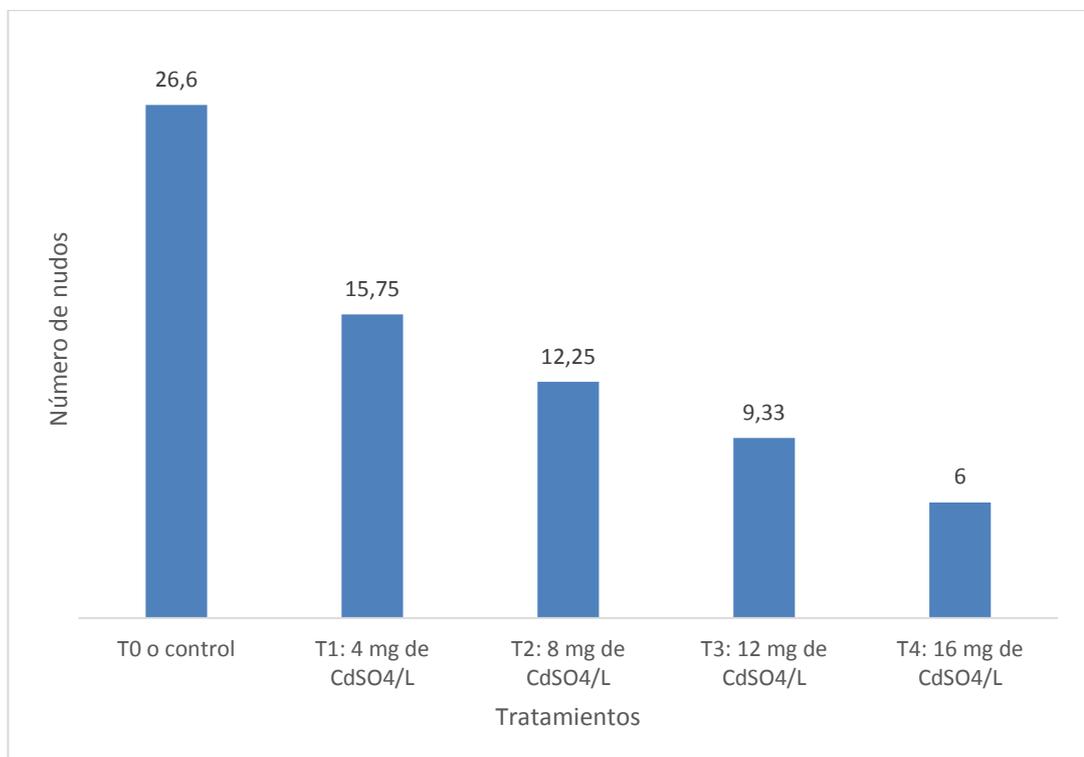


Figura 31. Efecto en el número de nudos de *L. mutabilis* a los 65 días después de la aplicación de tratamientos con cadmio.

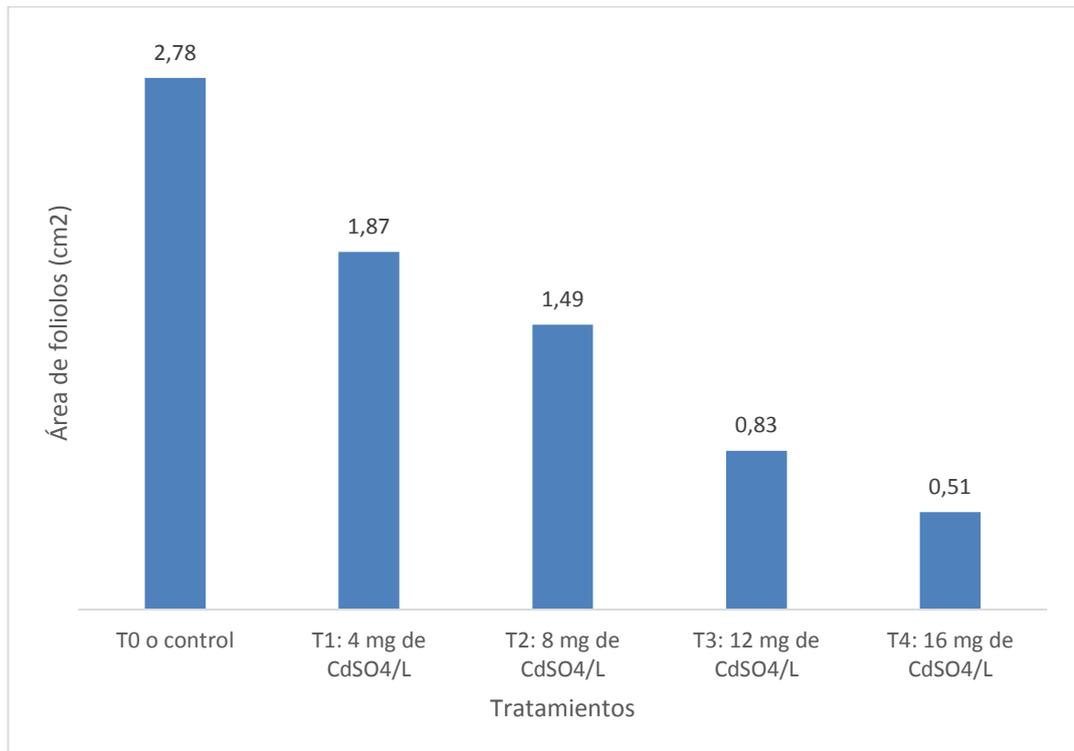


Figura 32. Efecto en el área de foliolos(cm<sup>2</sup>) de *L. mutabilis* a los 65 días después de la aplicación de tratamientos con cadmio.

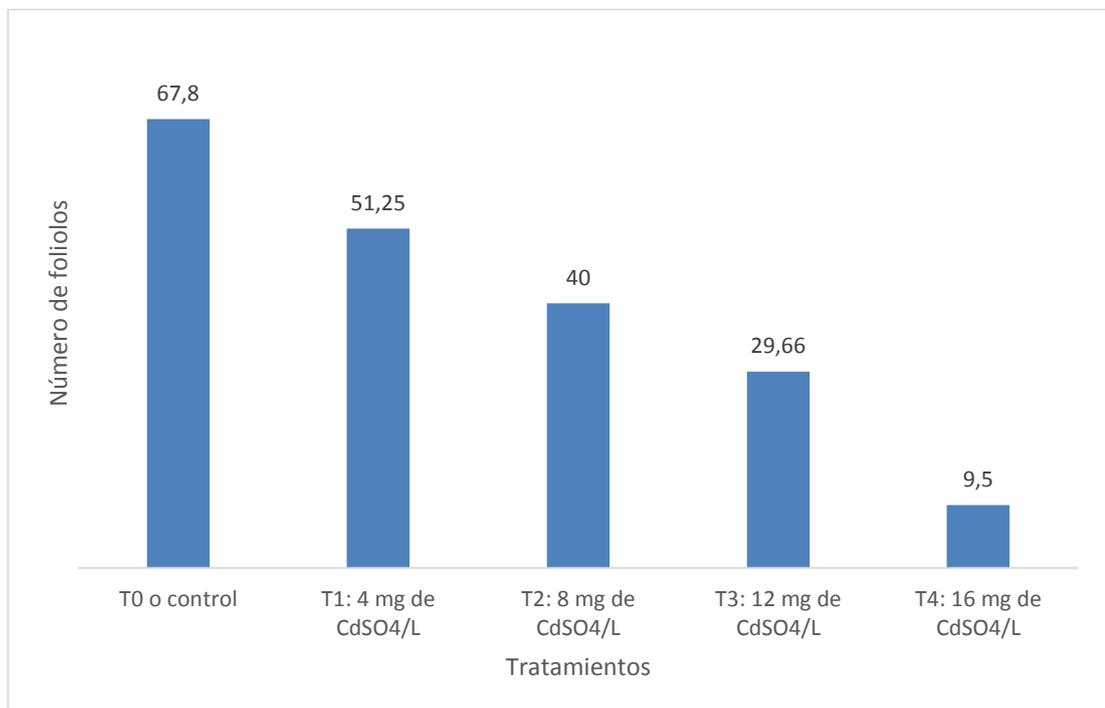


Figura 33. Efecto en el número de foliolos de *L. mutabilis* a los 65 días después de la aplicación de tratamientos con cadmio.

Tratamientos				
<b>T<sub>0</sub></b> (Control: Solución nutritiva)				
<b>T<sub>1</sub></b> (1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)				
<b>T<sub>2</sub></b> (2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)				
<b>T<sub>3</sub></b> (3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)				
<b>T<sub>4</sub></b> (4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)				

Figura 34. Raíz, tallo y hoja de *L. mutabilis* Sweet, evaluadas 65 días después de la aplicación de tratamientos.

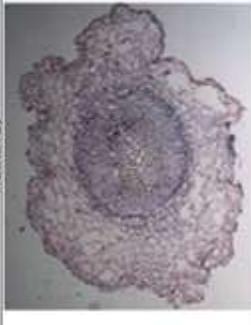
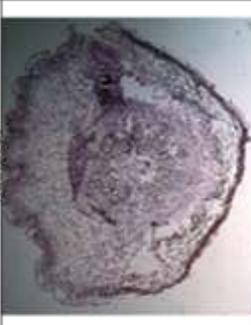
Tratamientos				
<b>T<sub>0</sub></b> (Control: Solución nutritiva)	<b>T<sub>1</sub></b> (1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	<b>T<sub>2</sub></b> (2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	<b>T<sub>3</sub></b> (3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	<b>T<sub>4</sub></b> (4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)
				
				
				

Figura 35. Cortes Histológicos (H.E.) de raíz (40x), tallo (40x) y foliolo (100x) de plantas evaluadas 20 días después de la aplicación de tratamientos.

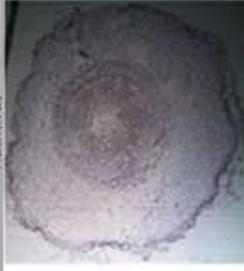
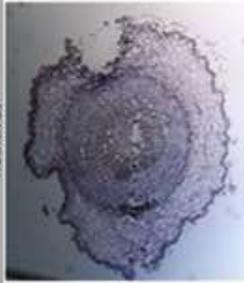
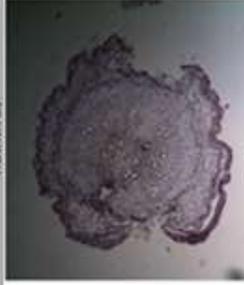
Tratamientos				
<b>T<sub>0</sub></b> (Control. Solución nutritiva)	<b>T<sub>1</sub></b> (1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	<b>T<sub>2</sub></b> (2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	<b>T<sub>3</sub></b> (3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	<b>T<sub>4</sub></b> (4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)
				
				
				

Figura 36. Cortes Histológico (H.E.) de raíz (40x), tallo (40x) y foliolo (100x) de plantas evaluadas 35 días después de la aplicación de tratamientos.

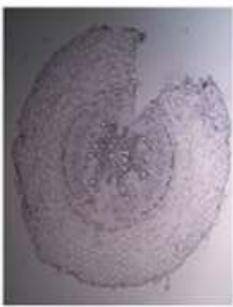
Tratamientos				
<b>T<sub>0</sub></b> (Control: Solución nutritiva)	<b>T<sub>1</sub></b> (1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	<b>T<sub>2</sub></b> (2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	<b>T<sub>3</sub></b> (3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	<b>T<sub>4</sub></b> (4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)
				
				
				

Figura 37. Cortes Histológicos (H.E.) de raíz (40x), tallo (40x) y foliolo (100x) de plantas evaluadas 50 días después de la aplicación de tratamientos.

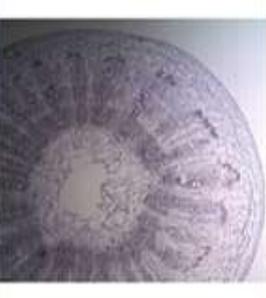
Tratamientos				
<b>T<sub>0</sub></b> (Control: Solución nutritiva)	<b>T<sub>1</sub></b> (1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	<b>T<sub>2</sub></b> (2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	<b>T<sub>3</sub></b> (3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	<b>T<sub>4</sub></b> (4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)
				
				
				

Figura 38. Cortes Histológicos (H.E.) de raíz (40x), tallo (40x) y foliolo (100x) de plantas evaluadas 65 días después de la aplicación de tratamientos.

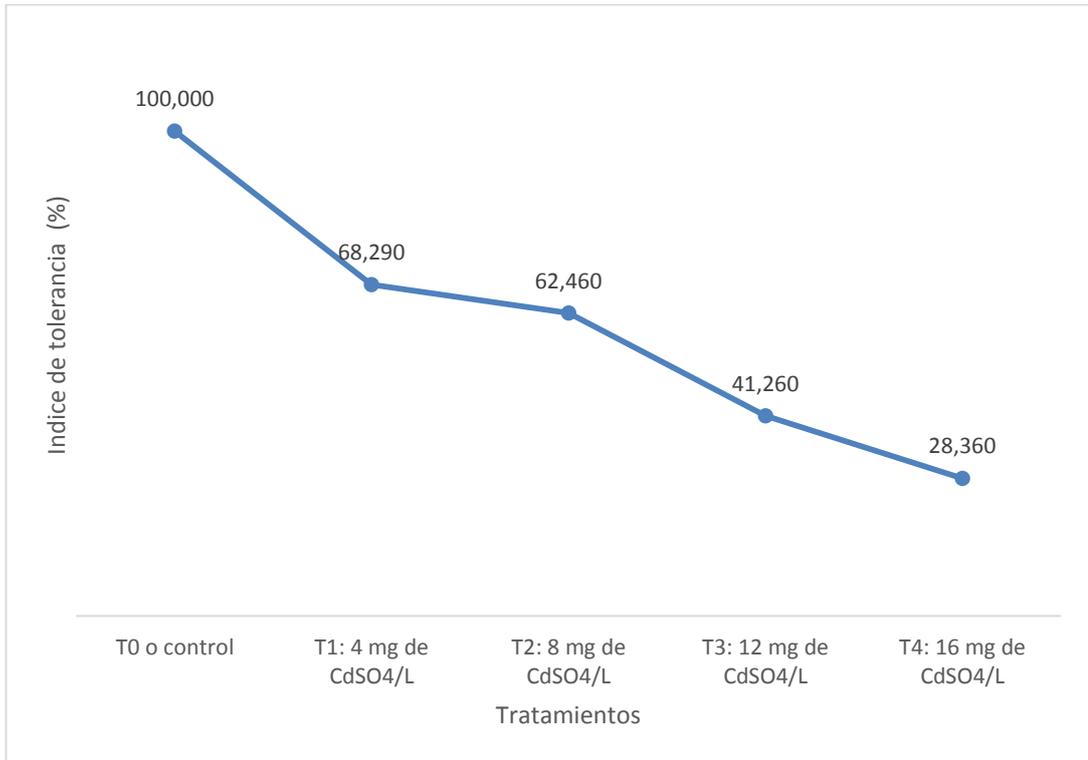


Figura 39. Índice de tolerancia en porcentaje después de 65 días de aplicación a los tratamientos

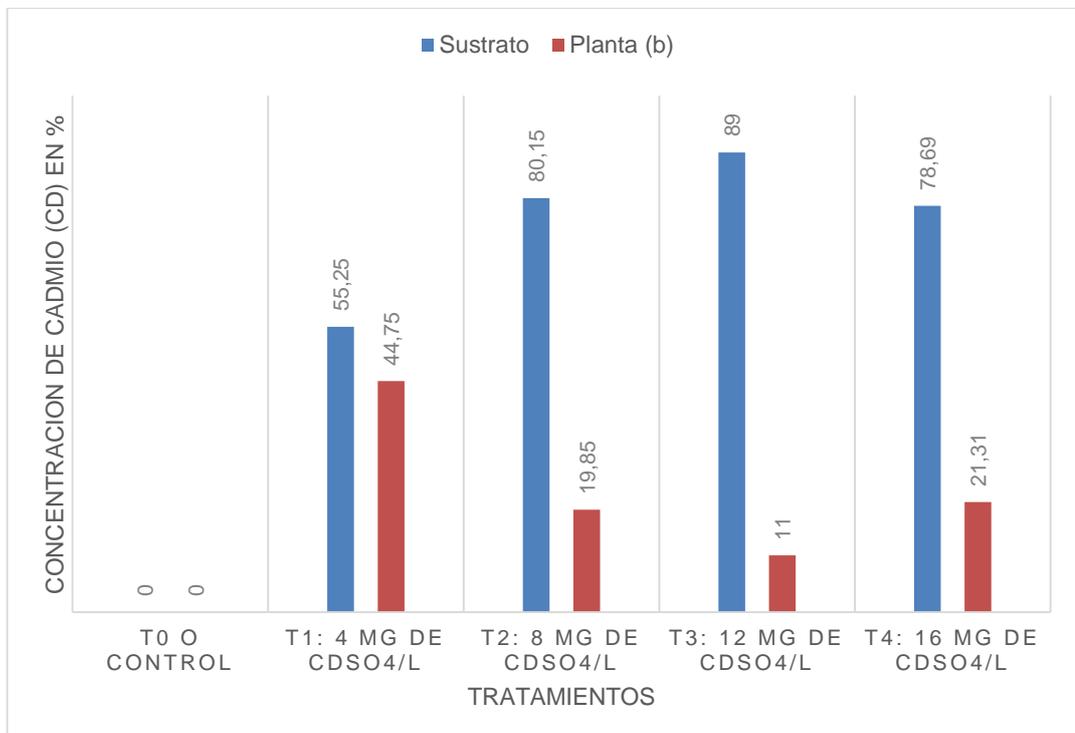


Figura 40. Concentración de Cadmio (Cd) en porcentaje en sustrato y planta, después de 65 días de aplicación a los tratamientos.

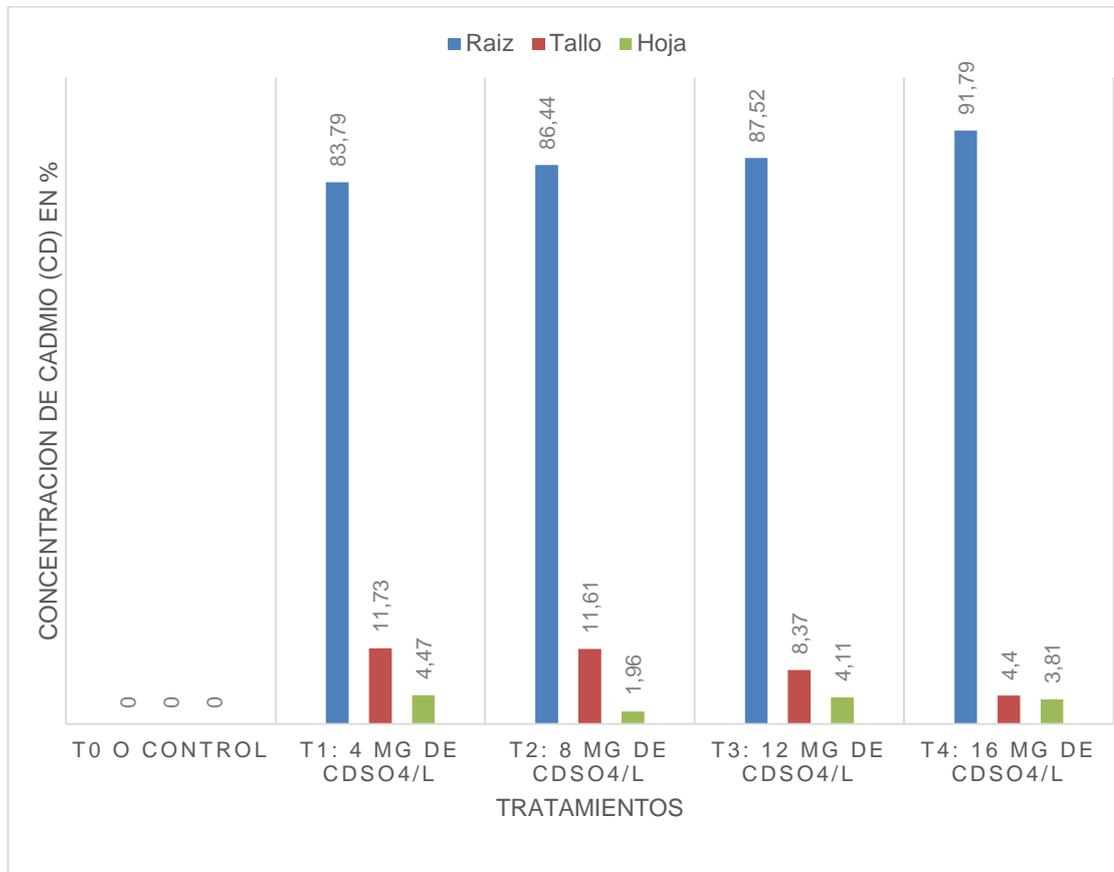


Figura 41. Gráfico de Concentración de Cadmio (Cd) en porcentaje, en cada órgano de la planta (raíz, tallo y hoja) después de 65 días de aplicación a los tratamientos.

## 9.2. TABLAS

Tabla 1. Componentes de la Solución nutritiva básica Prianisnikov.

Componentes	Concentración (gr/L)
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	0.24
MgSO <sub>4</sub>	0.06
CaCl x 2H <sub>2</sub> O	0.15
CaSO <sub>4</sub> x H <sub>2</sub> O	0.344
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.172
FeCl <sub>3</sub>	0.025

Tabla 2. Aplicación de dosis de los tratamientos con cadmio.

Tratamientos	Aplicación de dosis <sup>(a)</sup>			
	Primera dosis	Segunda dosis	Tercera dosis	Cuarta dosis <sup>(b)</sup>
T <sub>0</sub>	0	0	0	<b>0</b>
T <sub>1</sub>	1	2	3	<b>4</b>
T <sub>2</sub>	2	4	6	<b>8</b>
T <sub>3</sub>	3	6	9	<b>12</b>
T <sub>4</sub>	4	8	12	<b>16</b>

*(a) Dosis aplicadas en mg de CdSO<sub>4</sub>/L, mediante una dilución en 20 mL. de agua destilada*

*(b) Tratamiento final.*

Tabla 3. Resultados de germinación de semillas según método de germinación.

Tratamientos de germinación	Número de semillas sembradas (N)	Número de semillas germinadas	Número de semillas no Germinadas	Tiempo de germinación (días)
P <sub>1</sub>	35	7 (20%)	28 (80%)	10
P <sub>2</sub>	35	29 (82%)	7 (18%)	9
P <sub>3</sub>	35	33 (94%)	2 (6%)	4

Tabla 4. Índice de supervivencia después de la aplicación de tratamientos con cadmio

Días de observación	Tratamientos con cadmio								
	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub>	
	(Control: Solución nutritiva)	(4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	(8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	(12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	(16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	(12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	(16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	(16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva)	
Número de plantas vivas	Número de plantas vivas	Número de plantas vivas	Número de plantas vivas	Número de plantas vivas	Número de plantas vivas	Número de plantas vivas	Número de plantas vivas	Número de plantas vivas	
Tratamientos	Índice de sup. (%)	Índice de sup. (%)	Índice de sup. (%)	Índice de sup. (%)	Índice de sup. (%)	Índice de sup. (%)	Índice de sup. (%)	Índice de sup. (%)	
0	Primera dosis (a)	6	1	6	1	6	1	6	1
10		6	1	6	1	6	1	6	1
15		6	1	6	1	6	1	6	1
20	Segunda dosis (b)	6	1	6	1	6	1	5	0.83
25		6	1	6	1	5	0.83	5	0.83
30		6	1	6	1	5	0.83	5	0.83
35	Tercera dosis (c)	6	1	6	1	5	0.83	5	0.83
40		6	1	5	0.83	5	0.83	5	0.83
45		6	1	5	0.83	5	0.83	4	0.66
50	Cuarta dosis (d)	6	1	5	0.83	4	0.66	4	0.66
55		6	1	5	0.83	4	0.66	4	0.66
60		6	1	5	0.83	4	0.66	4	0.66
65		6	1	4	0.66	4	0.66	3	0.5

(<sup>a</sup>) Índice de supervivencia = número de plantas vivas/ número de plantas sembradas. El número de plantas sembradas para todos los tratamientos fue 6.

(<sup>b</sup>) Las primeras dosis para los tratamientos fueron: T1: 1 mg de CdSO<sub>4</sub>/L, T2: 2 mg de CdSO<sub>4</sub>/L, T3: 3 mg de CdSO<sub>4</sub>/L, T4: 4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L.

(<sup>c</sup>) Las segundas dosis para los tratamientos fueron: T1: 2 mg de CdSO<sub>4</sub>/L, T2: 4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L, T3: 6 mg de CdSO<sub>4</sub>/L, T4: 8 mg de CdSO<sub>4</sub>/L.

(<sup>d</sup>) Las terceras dosis para los tratamientos fueron: T1: 3 mg de CdSO<sub>4</sub>/L, T2: 6 mg de CdSO<sub>4</sub>/L, T3: 9 mg de CdSO<sub>4</sub>/L, T4: 12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L.

(<sup>e</sup>) Las cuartas dosis para los tratamientos fueron: T1: 4 mg de CdSO<sub>4</sub>/L, T2: 8 mg de CdSO<sub>4</sub>/L, T3: 12 mg de CdSO<sub>4</sub>/L, T4: 16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L.

Tabla 5. Efecto del cadmio en la longitud de la raíz principal (cm) a los 20 días después de la aplicación de tratamientos:

A. Prueba de normalidad

Tratamientos <sup>(a)</sup>	Kolmogorov-Smirnov <sup>(b)</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T <sub>0</sub> o control	0.144	6	,200*	0.964	6	0.85
T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	0.206	6	,200*	0.946	6	0.708
T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	0.213	6	,200*	0.921	6	0.512
T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	0.206	5	,200*	0.913	5	0.454
T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	0.253	5	,200*	0.854	5	0.207

(a) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva. (b) Corrección de significación de Lilliefors \* Límite inferior de la significación verdadera.

B. Estadísticos descriptivos

Tratamientos	N*	Media
T <sub>0</sub> o control (solución nutritiva)	6	15.55
T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva	6	5.01
T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	6	3.03
T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	5	3.40
T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	5	2.04
<b>Total</b>	<b>28</b>	<b>5.94</b>

\*Número de repeticiones

C. Comparaciones múltiples (HSD Tukey)

Tratamientos (*)		Diferencia de medias	Error estándar	Sig.
T <sub>0</sub> o control	T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	10,53333*	1.01686	.000
	T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	12,51667*	1.01686	.000
	T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	12,15000*	1.01686	.000
	T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	13,51000*	1.06649	.000
T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-10,53333*	1.01686	.000
	T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1.98333	1.01686	.319
	T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1.61667	1.01686	.518
	T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	2.97667	1.06649	.069
T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-12,5166*	1.01686	.000
	T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-1.98333	1.01686	.319
	T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-.36667	1.01686	.996
	T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.99333	1.06649	.882
T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-12,15000*	1.01686	.000
	T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-1.61667	1.01686	.518
	T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.36667	1.01686	.996
	T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1.36000	1.06649	.708

(\*) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva.

Tabla 6. Efecto del cadmio en el número de raíces secundarias a los 20 días después de la aplicación de tratamientos:

A. Prueba de normalidad

Tratamientos (a)	Kolmogorov-Smirnov <sup>(b)</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T <sub>0</sub> o control	.187	6	,200*	.952	6	.755
T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.180	6	,200*	.952	6	.757
T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.237	6	,200*	.927	6	.554
T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.202	5	,200*	.853	5	.167
T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.231	5	,200*	.881	5	.314

(a) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva. (b) Corrección de significación de Lilliefors \* Límite inferior de la significación verdadera.

B. Estadísticos descriptivos

Tratamientos	N*	Media
T <sub>0</sub> o control (solución nutritiva)	6	38.500
T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva	6	16.000
T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	6	14.666
T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	5	12.000
T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	5	7.8000
<b>Total</b>	<b>28</b>	<b>18.137</b>

\*Número de repeticiones

C. Comparaciones múltiples (HSD Tukey)

Tratamientos (*)		Diferencia de medias	Error estándar	Sig.
T <sub>0</sub> o control	T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	22,50000*	1.15249	.000
	T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	23,83333*	1.15249	.000
	T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	26,50000*	1.15249	.000
	T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	30,70000*	1.20875	.000
T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-22,50000*	1.15249	.000
	T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1,33333	1.15249	.775
	T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	4,00000*	1.15249	.015
	T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	8,20000*	1.20875	.000
T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-23,83333*	1.15249	.000
	T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-1,33333	1.15249	.775
	T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	2,66667	1.15249	.175
	T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	6,86667*	1.20875	.000
T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-26,50000*	1.15249	.000
	T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-4,00000*	1.15249	.015
	T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-2,66667	1.15249	.175
	T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	4,20000*	1.20875	.015

(\*) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva.

Tabla 7. Efecto del cadmio en la longitud del tallo (cm) a los 20 días después de la aplicación de tratamientos:

A. Prueba de normalidad

Tratamientos (a)	Kolmogorov-Smirnov <sup>(b)</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T <sub>0</sub> o control	.208	6	,200*	.908	6	.425
T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.183	6	,200*	.960	6	.820
T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.302	6	.093	.837	6	.122
T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.231	5	,200*	.915	5	.473
T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.253	5	,200*	.865	5	.246

(a) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva. (b) Corrección de significación de Lilliefors \* Límite inferior de la significación verdadera.

B. Estadísticos descriptivos

Tratamientos	N*	Media
T <sub>0</sub> o control (solución nutritiva)	6	23.8333
T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva	6	18.5000
T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	6	16.7333
T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	5	14.3333
T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	5	10.1200
<b>Total</b>	<b>28</b>	<b>16.9310</b>

\*Número de repeticiones

C. Comparaciones múltiples (HSD Tukey)

Tratamientos (*)		Diferencia de medias	Error estándar	Sig.
T <sub>0</sub> o control	T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	5,33333*	.81298	.000
	T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	7,10000*	.81298	.000
	T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	9,50000*	.81298	.000
	T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	13,71333*	.85267	.000
T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-5,33333*	.81298	.000
	T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1,76667	.81298	.224
	T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	4,16667*	.81298	.000
	T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	8,38000*	.85267	.000
T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-7,10000*	.81298	.000
	T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-1,76667	.81298	.224
	T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	2,40000*	.81298	.049
	T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	6,61333*	.85267	.000
T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-9,50000*	.81298	.000
	T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-4,16667*	.81298	.000
	T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-2,40000*	.81298	.049
	T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	4,21333*	.85267	.000

(\*) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva.

Tabla 8. Efecto del cadmio en el número de nudos a los 20 días después de la aplicación de tratamientos:

A. Prueba de normalidad

Tratamientos (a)	Kolmogorov-Smirnov <sup>(b)</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T <sub>0</sub> o control	,303	6	,090	,832	6	,111
T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	,223	6	,200*	,908	6	,421
T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	,223	6	,200*	,908	6	,421
T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	,254	5	,200*	,866	5	,212
T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	,300	5	,161	,883	5	,325

(a) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva. (b) Corrección de significación de Lilliefors \* Límite inferior de la significación verdadera.

B. Estadísticos descriptivos

Tratamientos	N*	Media
T <sub>0</sub> o control (solución nutritiva)	6	11,5000
T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva	6	8,1667
T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	6	6,1667
T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	5	5,1667
T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	5	2,0000
<b>Total</b>	<b>28</b>	<b>6,7586</b>

\*Número de repeticiones

C. Comparaciones múltiples (HSD Tukey)

Tratamientos (*)		Diferencia de medias	Error estándar	Sig.
T <sub>0</sub> o control	T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	3,33333*	,68718	,001
	T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	5,33333*	,68718	,000
	T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	6,33333*	,68718	,000
	T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	9,50000*	,72072	,000
T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-3,33333*	,68718	,001
	T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	2,00000	,68718	,054
	T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	3,00000*	,68718	,002
	T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	6,16667*	,72072	,000
T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-5,33333*	,68718	,000
	T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-2,00000	,68718	,054
	T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1,00000	,68718	,600
	T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	4,16667*	,72072	,000
T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-6,33333*	,68718	,000
	T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-3,00000*	,68718	,002
	T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-1,00000	,68718	,600
	T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	3,16667*	,72072	,002

(\*) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva.

Tabla 9. Efecto del cadmio en el área de foliolos (cm<sup>2</sup>) a los 20 días después de la aplicación de tratamientos:

A. Pruebas de normalidad

Tratamientos (a)	Kolmogorov-Smirnov <sup>(b)</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T <sub>0</sub> o control	.204	6	.200*	.902	6	.389
T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.202	6	.200*	.853	6	.167
T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.192	6	.200*	.936	6	.626
T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.297	5	.106	.866	5	.212
T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.280	5	.200	.908	5	.457

(a) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva. (b) Corrección de significación de Lilliefors \* Límite inferior de la significación verdadera.

B. Estadísticos Descriptivos

Tratamientos	N*	Media
T <sub>0</sub> o control (solución nutritiva)	6	1,35
T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva	6	0,8
T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	6	0,4767
T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	5	0,3233
T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	5	0,1820
<b>Total</b>	<b>28</b>	<b>0,6417</b>

\*Número de repeticiones

C. Comparaciones múltiples (HSD Tukey)

Tratamientos (*)		Diferencia de medias	Error estándar	Sig.
T <sub>0</sub> o control	T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	,55000*	,05915	,000
	T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	,87333*	,05915	,000
	T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1,02667*	,05915	,000
	T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1,16800*	,06204	,000
T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-,55000*	,05915	,000
	T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	,32333*	,05915	,000
	T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	,47667*	,05915	,000
	T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	,61800*	,06204	,000
T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-,87333*	,05915	,000
	T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-,32333*	,05915	,000
	T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	,15333	,05915	,104
	T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	,29467*	,06204	,001
T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-1,02667*	,05915	,000
	T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-,47667*	,05915	,000
	T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-,15333	,05915	,104
	T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	,14133	,06204	,187

(\*) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva.

Tabla 10. Efecto del cadmio en número de foliolos a los 20 días después de la aplicación de tratamientos:

A. Prueba de normalidad

Tratamientos (a)	Kolmogorov-Smirnov <sup>(b)</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T <sub>0</sub> o control	.238	6	.200*	.950	6	.737
T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.274	6	.179	.915	6	.472
T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.204	6	.200*	.918	6	.493
T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.209	5	.200*	.907	5	.415
T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.216	5	.200*	.885	5	.332

(a) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva. (b) Corrección de significación de Lilliefors \* Límite inferior de la significación verdadera.

B. Estadísticos descriptivos

Tratamientos	N*	Media
T <sub>0</sub> o control (solución nutritiva)	6	44.3333
T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva	6	35.8333
T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	6	27.3333
T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	5	22.3333
T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	5	9.2000
<b>Total</b>	<b>28</b>	<b>28.4483</b>

\*Número de repeticiones

C. Comparaciones múltiples (HSD Tukey)

Tratamientos (*)		Diferencia de medias	Error estándar	Sig.
T <sub>0</sub> o control	T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	8,50000*	1.35212	.000
	T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	17,00000*	1.35212	.000
	T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	22,00000*	1.35212	.000
	T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	35,13333*	1.41812	.000
T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-8,50000*	1.35212	.000
	T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	8,50000*	1.35212	.000
	T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	13,50000*	1.35212	.000
	T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	26,63333*	1.41812	.000
T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-17,00000*	1.35212	.000
	T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-8,50000*	1.35212	.000
	T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	5,00000*	1.35212	.009
	T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	18,13333*	1.41812	.000
T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-22,00000*	1.35212	.000
	T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-13,50000*	1.35212	.000
	T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-5,00000*	1.35212	.009
	T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	13,13333*	1.41812	.000

(\*) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva.

Tabla 11. Efecto del cadmio en longitud de la raíz (cm) a los 35 días después de la aplicación de tratamientos:

A. Prueba de normalidad

Tratamientos (a)	Kolmogorov-Smirnov <sup>(b)</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T <sub>0</sub> o control	0.276	6	0.17	0.849	6	0.154
T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	0.241	6	,200*	0.89	6	0.358
T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	0.221	5	,200*	0.902	5	0.421
T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	0.197	5	,200*	0.943	5	0.685
T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	0.285	4		0.935	4	0.625

(a) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva. (b) Corrección de significación de Lilliefors \* Límite inferior de la significación verdadera.

B. Estadísticos descriptivos

Tratamientos	N <sup>*</sup>	Media
T <sub>0</sub> o control (solución nutritiva)	6	17.3000
T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva	6	5.2400
T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	5	3.7600
T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	5	3.3600
T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	4	2.3250
<b>Total</b>	<b>26</b>	<b>6.9960</b>

\*Número de repeticiones

C. Comparaciones múltiples (HSD Tukey)

Tratamientos (*)	Diferencia de medias	Error estándar	Sig.	
T <sub>0</sub> o control	T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	12,06000*	.95880	.000
	T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	13,54000*	.95880	.000
	T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	13,94000*	.95880	.000
	T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	14,97500*	1.02208	.000
T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-12,06000*	.95880	.000
	T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1.48000	1.00143	.588
	T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1.88000	1.00143	.361
	T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	2.91500	1.06218	.082
T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-13,54000*	.95880	.000
	T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-1.48000	1.00143	.588
	T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.40000	1.00143	.994
	T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1.43500	1.06218	.664
T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-13,94000*	.95880	.000
	T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-1.88000	1.00143	.361
	T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-.40000	1.00143	.994
	T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1.03500	1.06218	.863

(\*) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva.

Tabla 12. Efecto del cadmio en número de raíces secundarias a los 35 días después de la aplicación de tratamientos:

A. Prueba de normalidad

Tratamientos (a)	Kolmogorov-Smirnov <sup>(b)</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	Gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T <sub>0</sub> o control	.143	6	,200*	.988	6	.983
T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.254	6	,200*	.914	6	.492
T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.421	5	.004	.727	5	.018
T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.237	5	,200*	.961	5	.814
T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.250	4		.945	4	.683

(a) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva. (b) Corrección de significación de Lilliefors \* Límite inferior de la significación verdadera.

B. Estadísticos descriptivos

Tratamientos	N*	Media
T <sub>0</sub> o control (solución nutritiva)	6	50.1667
T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva	6	19.6000
T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	5	16.6000
T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	5	14.4000
T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	4	9.0000
<b>Total</b>	<b>26</b>	<b>23.6000</b>

\*Número de repeticiones

C. Comparaciones múltiples (HSD Tukey)

Tratamientos (*)		Diferencia de medias	Error estándar	Sig.
T <sub>0</sub> o control	T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	30,56667*	1.22934	.000
	T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	33,56667*	1.22934	.000
	T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	35,76667*	1.22934	.000
	T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	41,16667*	1.31048	.000
T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-30,56667*	1.22934	.000
	T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	3,00000	1.28400	.175
	T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	5,20000*	1.28400	.005
	T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	10,60000*	1.36189	.000
T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-33,56667*	1.22934	.000
	T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-3,00000	1.28400	.175
	T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	2,20000	1.28400	.449
	T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	7,60000*	1.36189	.000
T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-35,76667*	1.22934	.000
	T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-5,20000*	1.28400	.005
	T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-2,20000	1.28400	.449
	T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	5,40000*	1.36189	.006

(\*) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva.

Tabla 13. Efecto del cadmio en la longitud del tallo (cm) a los 35 días después de la aplicación de tratamientos:

A. Prueba de normalidad

Tratamientos (a)	Kolmogorov-Smirnov <sup>(b)</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T <sub>0</sub> o control	.143	6	,200*	.988	6	.983
T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.254	6	,200*	.914	6	.492
T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.421	5	.004	.727	5	.018
T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.237	5	,200*	.961	5	.814
T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.250	4		.945	4	.683

(a) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva. (b) Corrección de significación de Lilliefors \* Límite inferior de la significación verdadera.

B. Estadísticos descriptivos

Tratamientos	N*	Media
T <sub>0</sub> o control (solución nutritiva)	6	33.83
T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva	6	25.5
T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	5	18.2
T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	5	14.6
T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	4	11.75
<b>Total</b>	<b>26</b>	<b>20.776</b>

\*Número de repeticiones

C. Comparaciones múltiples (HSD Tukey)

Tratamientos (*)		Diferencia de medias	Error estándar	Sig.
T <sub>0</sub> o control	T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	30,56667*	1.22934	.000
	T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	33,56667*	1.22934	.000
	T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	35,76667*	1.22934	.000
	T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	41,16667*	1.31048	.000
T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-30,56667*	1.22934	.000
	T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	3,00000	1.28400	.175
	T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	5,20000*	1.28400	.005
	T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	10,60000*	1.36189	.000
T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-33,56667*	1.22934	.000
	T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-3,00000	1.28400	.175
	T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	2,20000	1.28400	.449
	T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	7,60000*	1.36189	.000
T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-35,76667*	1.22934	.000
	T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-5,20000*	1.28400	.005
	T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-2,20000	1.28400	.449
	T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	5,40000*	1.36189	.006

(\*) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva.

Tabla 14. Efecto del cadmio en el número de nudos a los 35 días después de la aplicación de tratamientos:

A. Prueba de normalidad

Tratamientos (a)	Kolmogorov-Smirnov <sup>(b)</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T <sub>0</sub> o control	,209	6	,200*	,907	6	,415
T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	,231	6	,200*	,881	6	,314
T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	,231	5	,200*	,881	5	,314
T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	,231	5	,200*	,881	5	,314
T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	,283	4		,863	4	,272

(a) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva. (b) Corrección de significación de Lilliefors \* Límite inferior de la significación verdadera.

B. Estadísticos descriptivos

Tratamientos	N*	Media
T <sub>0</sub> o control (solución nutritiva)	6	19,6667
T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva	6	11,8000
T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	5	9,2000
T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	5	6,2000
T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	4	3,2500
<b>Total</b>	<b>26</b>	<b>10,6800</b>

\*Número de repeticiones

C. Comparaciones múltiples (HSD Tukey)

Tratamientos (*)		Diferencia de medias	Error estándar	Sig.
T <sub>0</sub> o control	T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	7,86667*	,58212	,000
	T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	10,46667*	,58212	,000
	T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	13,46667*	,58212	,000
	T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	16,41667*	,62054	,000
T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-7,86667*	,58212	,000
	T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	2,60000*	,60800	,003
	T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	5,60000*	,60800	,000
	T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	8,55000*	,64488	,000
T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-10,46667*	,58212	,000
	T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-2,60000*	,60800	,003
	T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	3,00000*	,60800	,001
	T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	5,95000*	,64488	,000
T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-13,46667*	,58212	,000
	T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-5,60000*	,60800	,000
	T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-3,00000*	,60800	,001
	T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	2,95000*	,64488	,002

(\*) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva.

Tabla 15. Efecto del cadmio en el área de los folíolos (cm<sup>2</sup>) a los 35 días después de la aplicación de tratamientos:

A. Prueba de normalidad

Tratamientos (a)	Kolmogorov-Smirnov <sup>(b)</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T <sub>0</sub> o control	.189	6	.200*	.943	6	.682
T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.221	6	.200*	.902	6	.421
T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.231	5	.200*	.881	5	.314
T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.367	5	.026	.684	5	.006
T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.283	4		.863	4	.272

(a) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva. (b) Corrección de significación de Lilliefors \* Límite inferior de la significación verdadera.

B. Estadísticos descriptivos

Tratamientos	N*	Media
T <sub>0</sub> o control (solución nutritiva)	6	1.7167
T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva	6	.9800
T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	5	.6200
T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	5	.3600
T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	4	.2250
<b>Total</b>	<b>26</b>	<b>.8400</b>

\*Número de repeticiones

C. Comparaciones múltiples (HSD Tukey)

Tratamientos (*)		Diferencia de medias	Error estándar	Sig.
T <sub>0</sub> o control	T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.73667*	.10167	.000
	T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1,09667*	.10167	.000
	T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1,35667*	.10167	.000
	T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1,49167*	.10838	.000
T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-.73667*	.10167	.000
	T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.36000*	.10619	.022
	T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.62000*	.10619	.000
	T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.75500*	.11263	.000
T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-1,09667*	.10167	.000
	T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-.36000*	.10619	.022
	T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.26000	.10619	.143
	T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.39500*	.11263	.017
T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-1,35667*	.10167	.000
	T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-.62000*	.10619	.000
	T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-.26000	.10619	.143
	T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.13500	.11263	.752

(\*) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva.

Tabla 16. Efecto del cadmio en el número de folíolos a los 35 días después de la aplicación de tratamientos:

A. Prueba de normalidad

Tratamientos (a)	Kolmogorov-Smirnov <sup>(b)</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T <sub>0</sub> o control	.187	6	.200*	.952	6	.755
T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.168	6	.200*	.981	6	.940
T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.243	5	.200*	.894	5	.377
T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.300	5	.161	.908	5	.453
T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.185	4		.972	4	.855

(a) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva. (b) Corrección de significación de Lilliefors \* Límite inferior de la significación verdadera.

B. Estadísticos descriptivos

Tratamientos	N*	Media
T <sub>0</sub> o control (solución nutritiva)	6	54.5000
T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva	6	39.6000
T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	5	31.2000
T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	5	25.0000
T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	4	8.5000
<b>Total</b>	<b>26</b>	<b>33.6000</b>

\*Número de repeticiones

C. Comparaciones múltiples (HSD Tukey)

Tratamientos (*)		Diferencia de medias	Error estándar	Sig.
T <sub>0</sub> o control	T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	14,90000*	1.67207	.000
	T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	23,30000*	1.67207	.000
	T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	29,50000*	1.67207	.000
	T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	46,00000*	1.78244	.000
T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-14,90000*	1.67207	.000
	T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	8,40000*	1.74642	.001
	T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	14,60000*	1.74642	.000
	T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	31,10000*	1.85236	.000
T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-23,30000*	1.67207	.000
	T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-8,40000*	1.74642	.001
	T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	6,20000*	1.74642	.015
	T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	22,70000*	1.85236	.000
T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-29,50000*	1.67207	.000
	T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-14,60000*	1.74642	.000
	T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-6,20000*	1.74642	.015
	T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	16,50000*	1.85236	.000

(\*) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva.

Tabla 17. Efecto del cadmio en la longitud de la raíz principal (cm) a los 50 días después de la aplicación de tratamientos:

A. Prueba de normalidad

Tratamientos (a)	Kolmogorov-Smirnov <sup>(b)</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T <sub>0</sub> o control	0.2	6	,200*	0.948	6	0.724
T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	0.229	5	,200*	0.886	5	0.337
T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	0.218	4		0.92	4	0.538
T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	0.303	4		0.791	4	0.086
T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	0.219	3		0.987	3	0.78

(a) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva. (b) Corrección de significación de Lilliefors \* Límite inferior de la significación verdadera.

B. Estadísticos descriptivos

Tratamientos	N*	Media
T <sub>0</sub> o control (solución nutritiva)	6	25,7500
T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva	5	5,9400
T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	4	4,4250
T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	4	3,6750
T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	3	2,7667
<b>Total</b>	<b>22</b>	<b>10,2227</b>

\*Número de repeticiones

C. Comparaciones múltiples (HSD Tukey)

Tratamientos (*)		Diferencia de medias	Error estándar	Sig.
T <sub>0</sub> o control	T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	19,81000*	1.32200	.000
	T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	21,32500*	1.40925	.000
	T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	22,07500*	1.40925	.000
	T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	22,98333*	1.54376	.000
T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-19,81000*	1.32200	.000
	T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1.51500	1.46454	.836
	T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	2.26500	1.46454	.548
	T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	3.17333	1.59439	.312
T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-21,32500*	1.40925	.000
	T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-1.51500	1.46454	.836
	T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.75000	1.54376	.988
	T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1.65833	1.66745	.854
T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-22,07500*	1.40925	.000
	T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-2.26500	1.46454	.548
	T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-.75000	1.54376	.988
	T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.90833	1.66745	.981

(\*) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva.

Tabla 18. Efecto del cadmio en el número de raíces secundarias a los 50 días después de la aplicación de tratamientos:

A. Prueba de normalidad

Tratamientos (a)	Kolmogorov-Smirnov <sup>(b)</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T <sub>0</sub> o control	.193	6	,200*	.963	6	.844
T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.180	5	,200*	.952	5	.754
T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.283	4		.863	4	.272
T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.260	4		.827	4	.161
T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.385	3		.750	3	.000

(a) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva. (b) Corrección de significación de Lilliefors \* Límite inferior de la significación verdadera.

B. Estadísticos descriptivos

Tratamientos	N*	Media
T <sub>0</sub> o control (solución nutritiva)	6	55.8333
T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva	5	22.6000
T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	4	18.5000
T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	4	17.0000
T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	3	10.3333
<b>Total</b>	<b>22</b>	<b>28.2273</b>

\*Número de repeticiones

C. Comparaciones múltiples (HSD Tukey)

Tratamientos (*)		Diferencia de medias	Error estándar	Sig.
T <sub>0</sub> o control	T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	33,23333*	1.20839	.000
	T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	37,33333*	1.28814	.000
	T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	38,83333*	1.28814	.000
	T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	45,50000*	1.41109	.000
T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-33,23333*	1.20839	.000
	T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	4,10000*	1.33868	.048
	T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	5,60000*	1.33868	.005
	T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	12,26667*	1.45737	.000
T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-37,33333*	1.28814	.000
	T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-4,10000*	1.33868	.048
	T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1,50000	1.41109	.822
	T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	8,16667*	1.52415	.000
T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-38,83333*	1.28814	.000
	T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-5,60000*	1.33868	.005
	T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-1,50000	1.41109	.822
	T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	6,66667*	1.52415	.003

(\*) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva.

Tabla 19. Efecto del cadmio en la longitud del tallo (cm) a los 50 días después de la aplicación de tratamientos:

A. Prueba de normalidad

Tratamientos (a)	Kolmogorov-Smirnov <sup>(b)</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T <sub>0</sub> o control	.209	6	.200*	.907	6	.415
T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.300	5	.161	.813	5	.103
T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.260	4		.827	4	.161
T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.288	4		.887	4	.369
T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.253	3		.964	3	.637

(a) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva. (b) Corrección de significación de Lilliefors \* Límite inferior de la significación verdadera.

B. Estadísticos descriptivos

Tratamientos	N*	Media
T <sub>0</sub> o control (solución nutritiva)	6	39.3333
T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva	5	29.0000
T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	4	20.0000
T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	4	16.2500
T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	3	12.3333
<b>Total</b>	<b>22</b>	<b>25.5909</b>

\*Número de repeticiones

C. Comparaciones múltiples (HSD Tukey)

Tratamientos (*)		Diferencia de medias	Error estándar	Sig.
T <sub>0</sub> o control	T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	10,33333*	1.14468	.000
	T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	19,33333*	1.22023	.000
	T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	23,08333*	1.22023	.000
	T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	27,00000*	1.33670	.000
T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-10,33333*	1.14468	.000
	T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	9,00000*	1.26810	.000
	T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	12,75000*	1.26810	.000
	T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	16,66667*	1.38054	.000
T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-19,33333*	1.22023	.000
	T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-9,00000*	1.26810	.000
	T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	3,75000	1.33670	.079
	T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	7,66667*	1.44380	.000
T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-23,08333*	1.22023	.000
	T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-12,75000*	1.26810	.000
	T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-3,75000	1.33670	.079
	T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	3,91667	1.44380	.093

(\*) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva.

Tabla 20. Efecto del cadmio en el número de nudos a los 50 días después de la aplicación de tratamientos:

A. Prueba de normalidad

Tratamientos (a)	Kolmogorov-Smirnov <sup>(b)</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T <sub>0</sub> o control	.357	6	.016	.787	6	.045
T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.221	5	.200*	.902	5	.421
T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.283	4		.863	4	.272
T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.283	4		.863	4	.272
T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.385	3		.750	3	.000

(a) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva. (b) Corrección de significación de Lilliefors \* Límite inferior de la significación verdadera.

B. Estadísticos descriptivos

Tratamientos	N*	Media
T <sub>0</sub> o control (solución nutritiva)	6	23.5000
T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva	5	13.8000
T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	4	9.2500
T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	4	5.7500
T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	3	3.3333
<b>Total</b>	<b>22</b>	<b>12.7273</b>

\*Número de repeticiones

C. Comparaciones múltiples (HSD Tukey)

Tratamientos (*)		Diferencia de medias	Error estándar	Sig.
T <sub>0</sub> o control	T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	9,70000*	1.12296	.000
	T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	14,25000*	1.19708	.000
	T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	17,75000*	1.19708	.000
	T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	20,16667*	1.31134	.000
T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-9,70000*	1.12296	.000
	T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	4,55000*	1.24404	.015
	T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	8,05000*	1.24404	.000
	T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	10,46667*	1.35434	.000
T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-14,25000*	1.19708	.000
	T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-4,55000*	1.24404	.015
	T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	3.50000	1.31134	.101
	T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	5,91667*	1.41641	.005
T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-17,75000*	1.19708	.000
	T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-8,05000*	1.24404	.000
	T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-3.50000	1.31134	.101
	T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	2.41667	1.41641	.456

(\*) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva.

Tabla 21. Efecto del cadmio en el área de los folíolos (cm<sup>2</sup>) a los 50 días después de la aplicación de tratamientos:

A. Prueba de normalidad

Tratamientos (a)	Kolmogorov-Smirnov <sup>(b)</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T <sub>0</sub> o control	.193	6	,200*	.913	6	.455
T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.365	5	.028	.775	5	.050
T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.263	4		.906	4	.462
T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.314	4		.817	4	.137
T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.304	3		.907	3	.407

(a) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva. (b) Corrección de significación de Lilliefors \* Límite inferior de la significación verdadera.

B. Estadísticos descriptivos

Tratamientos	N*	Media
T <sub>0</sub> o control (solución nutritiva)	6	2.3633
T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva	5	1.3400
T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	4	1.1300
T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	4	.5924
T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	3	.3333
<b>Total</b>	<b>22</b>	<b>1.3077</b>

\*Número de repeticiones

C. Comparaciones múltiples (HSD Tukey)

Tratamientos (*)		Diferencia de medias	Error estándar	Sig.
T <sub>0</sub> o control	T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1,02333*	,15322	.000
	T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1,23333*	,16333	.000
	T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1,77091*	,16333	.000
	T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	2,03000*	,17892	.000
T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-1,02333*	,15322	.000
	T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	,21000	,16974	.731
	T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	,74757*	,16974	.003
	T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1,00667*	,18479	.000
T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-1,23333*	,16333	.000
	T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-,21000	,16974	.731
	T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	,53758	,17892	.154
	T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	,79667*	,19325	.006
T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-1,77091*	,16333	.000
	T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-,74757*	,16974	.003
	T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-,53758	,17892	.154
	T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	,25909	,19325	.671

(\*) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva.

Tabla 22. Efecto del cadmio en el número de folíolos a los 50 días después de la aplicación de tratamientos:

A. Prueba de normalidad

Tratamientos (a)	Kolmogorov-Smirnov <sup>(b)</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T <sub>0</sub> o control	.265	6	,200*	.869	6	.221
T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.198	5	,200*	.957	5	.787
T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.250	4		.927	4	.577
T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.329	4		.895	4	.406
T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.253	3		.964	3	.637

(a) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva. (b) Corrección de significación de Lilliefors \* Límite inferior de la significación verdadera.

B. Estadísticos descriptivos

Tratamientos	N*	Media
T <sub>0</sub> o control (solución nutritiva)	6	55.5000
T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva	5	47.4000
T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	4	37.0000
T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	4	26.7500
T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	3	9.6667
<b>Total</b>	<b>22</b>	<b>38.8182</b>

\*Número de repeticiones

C. Comparaciones múltiples (HSD Tukey)

Tratamientos (*)		Diferencia de medias	Error estándar	Sig.
T <sub>0</sub> o control	T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	8,10000*	1.21210	.000
	T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	18,50000*	1.29210	.000
	T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	28,75000*	1.29210	.000
	T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	45,83333*	1.41543	.000
T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-8,10000*	1.21210	.000
	T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	10,40000*	1.34279	.000
	T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	20,65000*	1.34279	.000
	T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	37,73333*	1.46185	.000
T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-18,50000*	1.29210	.000
	T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-10,40000*	1.34279	.000
	T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	10,25000*	1.41543	.000
	T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	27,33333*	1.52884	.000
T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-28,75000*	1.29210	.000
	T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-20,65000*	1.34279	.000
	T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-10,25000*	1.41543	.000
	T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	17,08333*	1.52884	.000

(\*) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva.

Tabla 23. Efecto del cadmio en la longitud de la raíz principal (cm) a los 65 días después de la aplicación de tratamientos:

A. Prueba de normalidad

Tratamientos (a)	Kolmogorov-Smirnov <sup>(b)</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T <sub>0</sub> o control	0.195	6	,200*	0.981	6	0.937
T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	0.252	4		0.903	4	0.444
T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	0.28	4		0.808	4	0.117
T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	0.175	3		1	3	1
T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	0.26	2				

(a) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva. (b) Corrección de significación de Lilliefors \* Límite inferior de la significación verdadera.

B. Estadísticos descriptivos

Tratamientos	N*	Media
T <sub>0</sub> o control (solución nutritiva)	6	31,0600
T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva	4	6,6250
T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	4	4,6750
T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	3	4,0000
T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	2	3,5500
<b>Total</b>	<b>19</b>	<b>12,2000</b>

\*Número de repeticiones

C. Comparaciones múltiples (HSD Tukey)

Tratamientos (*)		Diferencia de medias	Error estándar	Sig.
T <sub>0</sub> o control	T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	24,43500*	1,50613	.000
	T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	26,38500*	1,50613	.000
	T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	27,06000*	1.63966	.000
	T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	27,51000*	1.87847	.000
T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-24,43500*	1.50613	.000
	T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1,95000	1.58760	.736
	T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	2,62500	1.71480	.562
	T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	3,07500	1.94440	.533
T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-26,38500*	1.50613	.000
	T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-1,95000	1.58760	.736
	T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	,67500	1.71480	.994
	T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1,12500	1.94440	.976
T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-27,06000*	1.63966	.000
	T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-2,62500	1.71480	.562
	T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-,67500	1.71480	.994
	T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	,45000	2,09958	.999

(\*) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva.

Tabla 24. Efecto del cadmio en número de raíces secundarias a los 65 días después de la aplicación de tratamientos:

A. Prueba de normalidad

Tratamientos (a)	Kolmogorov-Smirnov <sup>(b)</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T <sub>0</sub> o control	.300	6	.161	.833	6	.146
T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.298	4		.849	4	.224
T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.151	4		.993	4	.972
T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.385	3		.750	3	.000
T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.260	2				

(a) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva. (b) Corrección de significación de Lilliefors \* Límite inferior de la significación verdadera.

B. Estadísticos descriptivos

Tratamientos	N*	Media
T <sub>0</sub> o control (solución nutritiva)	6	60.0000
T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva	4	23.2500
T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	4	19.5000
T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	3	19.3333
T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	2	12.5000
<b>Total</b>	<b>19</b>	<b>30.7778</b>

\*Número de repeticiones

C. Comparaciones múltiples (HSD Tukey)

Tratamientos (*)		Diferencia de medias	Error estándar	Sig.
T <sub>0</sub> o control	T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	36,75000*	.80920	.000
	T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	40,50000*	.80920	.000
	T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	40,66667*	.88095	.000
	T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	47,50000*	1.00925	.000
T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-36,75000*	.80920	.000
	T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	3,75000*	.85297	.005
	T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	3,91667*	.92132	.007
	T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	10,75000*	1.04468	.000
T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-40,50000*	.80920	.000
	T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-3,75000*	.85297	.005
	T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.16667	.92132	1.000
	T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	7,00000*	1.04468	.000
T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-40,66667*	.88095	.000
	T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-3,91667*	.92132	.007
	T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-.16667	.92132	1.000
	T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	6,83333*	1.10118	.000

(\*) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva.

Tabla 25. Efecto del cadmio en la longitud del tallo (cm) a los 65 días después de la aplicación de tratamientos:

A. Prueba de normalidad

Tratamientos (a)	Kolmogorov-Smirnov <sup>(b)</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T <sub>0</sub> o control	.348	6	.047	.779	6	.054
T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.236	4		.940	4	.653
T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.329	4		.895	4	.406
T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.253	3		.964	3	.637
T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.260	2				

(a) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva. (b) Corrección de significación de Lilliefors \* Límite inferior de la significación verdadera.

B. Estadísticos descriptivos

Tratamientos	N*	Media
T <sub>0</sub> o control (solución nutritiva)	6	41.2000
T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva	4	31.0000
T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	4	22.7500
T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	3	19.3333
T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	2	12.0000
<b>Total</b>	<b>19</b>	<b>27.9444</b>

\*Número de repeticiones

C. Comparaciones múltiples (HSD Tukey)

Tratamientos (*)		Diferencia de medias	Error estándar	Sig.
T <sub>0</sub> o control	T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	10,20000*	1.34443	.000
	T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	18,45000*	1.34443	.000
	T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	21,86667*	1.46363	.000
	T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	29,20000*	1.67680	.000
T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-10,20000*	1.34443	.000
	T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	8,25000*	1.41716	.000
	T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	11,66667*	1.53070	.000
	T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	19,00000*	1.73566	.000
T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-18,45000*	1.34443	.000
	T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-8,25000*	1.41716	.000
	T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	3.41667	1.53070	.228
	T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	10,75000*	1.73566	.000
T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-21,86667*	1.46363	.000
	T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-11,66667*	1.53070	.000
	T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-3.41667	1.53070	.228
	T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	7,33333*	1.82954	.011

(\*) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva.

Tabla 26. Efecto del cadmio en el número de nudos a los 65 días después de la aplicación de tratamientos:

A. Prueba de normalidad

Tratamientos (a)	Kolmogorov-Smirnov <sup>(b)</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T <sub>0</sub> o control	.261	6	.200*	.807	6	.093
T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.329	4		.895	4	.406
T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.283	4		.863	4	.272
T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.385	3		.750	3	.000

(a) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva. (b) Corrección de significación de Lilliefors \* Límite inferior de la significación verdadera. Número de nudos en el tallo es constante en T<sub>4</sub>: 16 mg de CdSO<sub>4</sub>/L, por lo que se omitió.

B. Estadísticos descriptivos

Tratamientos	N*	Media
T <sub>0</sub> o control (solución nutritiva)	6	26.6000
T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva	4	15.7500
T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	4	12.2500
T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	3	9.3333
T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	2	6.0000
<b>Total</b>	<b>19</b>	<b>15.8333</b>

\*Número de repeticiones

C. Comparaciones múltiples (HSD Tukey)

Tratamientos (*)	Diferencia de medias	Error estándar	Sig.	
T <sub>0</sub> o control	T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	10,85000*	1.38439	.000
	T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	14,35000*	1.38439	.000
	T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	17,26667*	1.50713	.000
	T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	20,60000*	1.72664	.000
T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-10,85000*	1.38439	.000
	T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	3.50000	1.45928	.177
	T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	6,41667*	1.57620	.010
	T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	9,75000*	1.78724	.001
T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-14,35000*	1.38439	.000
	T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-3.50000	1.45928	.177
	T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	2.91667	1.57620	.388
	T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	6,25000*	1.78724	.027
T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-17,26667*	1.50713	.000
	T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-6,41667*	1.57620	.010
	T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-2.91667	1.57620	.388
	T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	3.33333	1.88392	.430

(\*) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva.

Tabla 27. Efecto del cadmio en el área de los folíolos (cm<sup>2</sup>) a los 65 días después de la aplicación de tratamientos:

A. Prueba de normalidad

Tratamientos (a)	Kolmogorov-Smirnov <sup>(b)</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T <sub>0</sub> o control	.177	6	.200*	.979	6	.928
T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.227	4		.952	4	.726
T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.246	4		.927	4	.578
T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.302	3		.910	3	.417
T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.260	2				

(a) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva. (b) Corrección de significación de Lilliefors \* Límite inferior de la significación verdadera.

B. Estadísticos descriptivos

Tratamientos	N*	Media
T <sub>0</sub> o control (solución nutritiva)	6	2.7800
T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva	4	1.8700
T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	4	1.4900
T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	3	.8300
T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	2	.5150
<b>Total</b>	<b>19</b>	<b>1.7144</b>

\*Número de repeticiones

C. Comparaciones múltiples (HSD Tukey)

Tratamientos (*)		Diferencia de medias	Error estándar	Sig.
T <sub>0</sub> o control	T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.91000*	.10532	.000
	T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1,29000*	.10532	.000
	T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1,95000*	.11466	.000
	T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	2,26500*	.13136	.000
T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-,91000*	.10532	.000
	T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.,38000*	.11102	.031
	T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1,04000*	.11991	.000
	T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1,35500*	.13597	.000
T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-1,29000*	.10532	.000
	T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-,38000	.11102	.031
	T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.,66000*	.11991	.001
	T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.,97500*	.14597	.000
T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-1,95000*	.11466	.000
	T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-1,04000*	.11991	.000
	T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-,66000*	.11991	.001
	T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.,31500	.14332	.240

(\*) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva.

Tabla 48. Efecto del cadmio en el número de folíolos a los 65 días después de la aplicación de tratamientos:

A. Prueba de normalidad

Tratamientos (a)	Kolmogorov-Smirnov <sup>(b)</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
T <sub>0</sub> o control	.199	6	.200*	.941	6	.670
T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.214	4		.963	4	.798
T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.260	4		.827	4	.161
T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.253	3		.964	3	.637
T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	.260	2				

(a) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva. (b) Corrección de significación de Lilliefors \* Límite inferior de la significación verdadera.

B. Estadísticos descriptivos

Tratamientos	N*	Media
T <sub>0</sub> o control (solución nutritiva)	6	67.8000
T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva	4	51.2500
T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	4	40.0000
T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	3	29.6667
T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L + Solución nutritiva.	2	9.5000
<b>Total</b>	<b>19</b>	<b>45.1111</b>

\*Número de repeticiones

C. Comparaciones múltiples (HSD Tukey)

Tratamientos (*)		Diferencia de medias	Error estándar	Sig.
T <sub>0</sub> o control	T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	16,55000*	1.49673	.000
	T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	27,80000*	1.49673	.000
	T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	38,13333*	1.62943	.000
	T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	58,30000*	1.86675	.000
T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-16,55000*	1.49673	.000
	T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	11,25000*	1.57769	.000
	T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	21,58333*	1.70410	.000
	T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	41,75000*	1.93227	.000
T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-27,80000*	1.49673	.000
	T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-11,25000*	1.57769	.000
	T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	10,33333*	1.70410	.000
	T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	30,50000*	1.93227	.000
T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	T <sub>0</sub> : control	-38,13333*	1.62943	.000
	T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-21,58333*	1.70410	.000
	T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	-10,33333*	1.70410	.000
	T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	20,16667*	2.03679	.000

(\*) Todos los tratamientos tienen adición de solución nutritiva.

Tabla 29. Evaluación Histológica Cualitativa del daño ocasionado en la raíz, tallo y hoja, por la exposición a tratamientos con cadmio durante 20, 35, 50 y 65 días.

Días de evaluación después de la aplicación de tratamientos	Tratamientos (*)	Daño en raíz (a)				Daño en tallo (b)				Daño en hoja (c)			
		Si	No	No	Si	Si	No	No	Si	Si	No	No	
20 días	T <sub>0</sub> o control		X				X				X		
	T <sub>1</sub> : 1 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	X					X				X		
	T <sub>2</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	X					X				X		
	T <sub>3</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	X					X				X		
	T <sub>4</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	X					X				X		
35 días	T <sub>0</sub> o control		X				X				X		
	T <sub>1</sub> : 2 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	X					X				X		
	T <sub>2</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	X					X				X		
	T <sub>3</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	X					X				X		
	T <sub>4</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	X					X				X		
50 días	T <sub>0</sub> o control		X				X				X		
	T <sub>1</sub> : 3 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	X					X				X		
	T <sub>2</sub> : 6 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	X					X				X		
	T <sub>3</sub> : 9 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	X					X		X		X		
	T <sub>4</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	X					X		X		X		
65 días	T <sub>0</sub> o control		X				X				X		
	T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	X					X				X		
	T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	X					X		X		X		
	T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	X					X		X		X		
	T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	X					X		X		X		

(\*) Todos los tratamientos contienen solución nutritiva. (a), (b), (c) La presencia/ausencia de daño fue determinada mediante microscopio de luz óptica Leica modelo C EMZ

Tabla 30. Índice de tolerancia de plantas de *Lupinus mutabilis* Sweet evaluadas después de 65 días de la aplicación de tratamientos con cadmio.

Tratamientos (*)	Biomasa aérea (gr.) (a)	Índice de tolerancia (b)	Porcentaje (%)
T <sub>0</sub> o control	10.47	1	100
T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	7.15	0.682903534	68.29
T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	6.54	0.624641834	62.46
T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	4.32	0.41260745	41.26
T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	2.97	0.283667622	28.36

(\*) Todos los tratamientos incluyen solución nutritiva (a) La biomasa aérea es la suma del peso seco de tallo y hojas (foliolos). (b) Índice de tolerancia = Biomasa aérea de un tratamiento con cd/ Biomasa aérea del tratamiento control.

Tabla 31. Concentración de Cadmio (mg/kg) analizada en sustrato y plantas para cada tratamiento después de 65 días de aplicación.

Tratamientos (*)	Concentración de cd en mg/kg		
	Aplicada (a)	Sustrato	Planta (b)
T <sub>0</sub> o control	0	0	0
T <sub>1</sub>	4	2.21 (55.25%)	1.79 (44.75%)
T <sub>2</sub>	8	6.41 (80.15%)	1.58 (19.85%)
T <sub>3</sub>	12	10.68 (89%)	1.31 (11%)
T <sub>4</sub>	16	12.59 (78.69%)	3.41 (21.31%)

(\*) Todos los tratamientos incluyen solución nutritiva (a) El cd fue suministrado en forma de CdSO<sub>4</sub> (b) El resultado es la sumatoria de las concentraciones en encontradas en raíz, tallo y hojas (foliolos).

Tabla 32. Concentración de cadmio en cada órgano de la planta analizada para cada tratamiento después de 65 días de la aplicación.

Tratamientos (*)	Concentración de Cadmio (mg/kg)**		
	Raíz	Tallo	Hoja (foliolos)
T <sub>0</sub> o control	0	0	0
T <sub>1</sub> : 4 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1.5 (83.79%)	0.21 (11.73%)	0.08 (4.47%)
T <sub>2</sub> : 8 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1.37 (86.44%)	0.184 (11.61)	0.031 (1.96%)
T <sub>3</sub> : 12 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	1.15 (87.52%)	0.11 (8.37%)	0.054 (4.11%)
T <sub>4</sub> : 16 mg de CdSO <sub>4</sub> /L	3.13 (91.79%)	0.15 (4.40%)	0.13 (3.81%)

(\*) Todos los tratamientos incluyen solución nutritiva. (\*\*) Los porcentajes están en función a la concentración de la planta.