

Bioacumulación de cadmio y plomo en *Raphanus sativus* L. "rabanito" en condiciones de invernadero, Trujillo – Perú, 2023.

Bioaccumulation of cadmium and lead in *Raphanus sativus* L. "rabanito" under greenhouse conditions, Trujillo – Peru, 2023.

Gloria Maritha Bacilio Cortez¹
<https://orcid.org/0009-0005-9052-6886>

Armando Efraín Gil Rivero¹
<https://orcid.org/0000-0002-4521-5588>

Segundo Eloy Lopéz Medina¹ 
<https://orcid.org/0000-0001-7719-8607>

José Mostacero León¹
<https://orcid.org/0000-0003-2556-3013>

Anthony J. De La Cruz Castillo¹
<https://orcid.org/0000-0002-5409-6146>

Cristian Gines Yepez Altamirano²
<https://orcid.org/0009-0004-0889-6208>

Juan Carlos Rodríguez Soto³
<https://orcid.org/0000-0002-8743-4797>

Linder Ramírez Viena⁴
<https://orcid.org/0009-0009-1939-7566>

1 Departamento de Ciencias Biológicas. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Trujillo. Ciudad Universitaria, Av. Juan Pablo Segundo S/N, Trujillo- Perú.

2 Ingeniero Ambiental. Gerente de la empresa Altamirano Proyectos Sostenibles S.A.A., Trujillo- Perú.

3 Departamento de Ciencias Biológicas. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Trujillo. Ciudad Universitaria, Av. Juan Pablo Segundo S/N, Trujillo- Perú. Grupo de Investigación Augusto Weberbauer

4 Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. Pje. Mercedes Indacochea 609, Huacho. Perú.

Recibido: 22.11.2024

Aceptado: 01.04.2025

Publicado (en línea): 20.01.2026

Citación: Bacilio, G.; A. Gil; S. Lopez; J. Mostacero; A. De La Cruz; C. Yepez; J. Rodríguez & L. Ramírez. 2024. Bioacumulación de cadmio y plomo en *Raphanus sativus* L. "rabanito" en condiciones de invernadero, Trujillo – Perú, 2023. *Arnaldoa* 31(3): 349 - 363.
<http://doi.org/10.22497/arnaldoa.313.31304>

Resumen: *Raphanus sativus* L., conocido como "rabanito," es una hortaliza saludable con bajo contenido calórico y alto en vitamina C, lo cual refuerza el sistema inmunológico. Sin embargo, esta planta requiere fertilizantes inorgánicos, muchos de los cuales están contaminados con metales pesados, como el cadmio y el plomo, lo que representa un riesgo potencial para la seguridad alimentaria. Por ello, se planteó como objetivo de investigación analizar la bioacumulación de cadmio y plomo en *R. sativus* "rabanito" a los 15, 30 y 45 días después de la fertilización con sulfato de zinc. La fase experimental se realizó en un invernadero, donde se instalaron macetas y se sembraron plantas de *R. sativus*, las cuales fueron fertilizadas con sulfato de zinc que contenía 125.175 ppm de cadmio y 7.554 ppm de plomo, aplicándose el fertilizante a los 25 días de siembra. Se utilizó un diseño completamente aleatorio, con un grupo control y tres tratamientos: T2 (15 días después de la aplicación - DDA), T3 (30 DDA) y T4 (45 DDA), con 4 repeticiones por tratamiento. Los resultados indicaron que la mayor bioacumulación de plomo en las raíces (0.096 ppm) ocurrió a los 15 DDA, mientras que en las hojas (0.333 ppm) se registró a los 45 DDA. En cuanto al cadmio, la mayor concentración en raíces (0.0584 ppm) se observó en el grupo control a los 45 DDA, mientras que en las hojas (0.1057 ppm) ocurrió a los 15 DDA tras la fertilización con sulfato de zinc. En conclusión, el uso de sulfato de zinc como fertilizante incrementa la bioacumulación de cadmio y plomo en *R. sativus*, siendo esta mayor en las hojas y menor en las raíces.

Palabras clave: Bioacumulación, cadmio, plomo, fertilizante.

Abstract: *Raphanus sativus* L., known as "rabanito," is a healthy vegetable with low caloric content and high in vitamin C, which strengthens the immune system. However, this plant requires inorganic fertilizers, many of which are contaminated with heavy metals, such as cadmium and lead, which represents a potential risk for food safety. Therefore, the objective of this research was to analyze the bioaccumulation of cadmium and lead in *R. sativus* "rabanito" at 15, 30 and 45 days after fertilization with zinc sulfate. The experimental phase was carried out in a greenhouse, where pots were installed and *R. sativus* plants were planted, which were fertilized with zinc sulfate containing 125.175 ppm of cadmium and 7.554 ppm of lead, applying the fertilizer 25 days after planting. A completely randomized design was used, with a control group and three treatments: T2 (15 days after application - DAA), T3 (30 DAA) and T4 (45 DAA), with 4 repetitions per treatment. The results indicated that the highest bioaccumulation of lead in the roots (0.096 ppm) occurred at 15 DAA, while in the leaves (0.333 ppm) it was recorded at 45 DAA. Regarding cadmium, the highest concentration in roots (0.0584 ppm) was observed in the control group at 45 DAA, while in the leaves (0.1057 ppm) it occurred at 15 DAA after fertilization with zinc sulphate. In conclusion, the use of zinc sulphate as a fertilizer increases the bioaccumulation of cadmium and lead in *R. sativus*, being higher in the leaves and lower in the roots.

Keyword: Bioaccumulation, cadmium, lead, fertilizer.



INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental ha surgido como uno de los problemas más significativos y pertinentes para la civilización en el siglo XXI, socavando los ideales de sostenibilidad y crecimiento. Las mayores concentraciones de contaminantes, incluidas diversas especies y cantidades de metales pesados, se encuentran en las matrices del aire, el agua y el suelo. Estos contaminantes se bioacumulan en peces y moluscos, así como en numerosas especies vegetales que son consumidas por los seres humanos (Huang *et al.*, 2014).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) y algunas autoridades medioambientales y sanitarias han definido las cantidades permitidas de plomo (Pb) y cadmio (Cd) en determinadas hortalizas. Para las hortalizas del género Brassicaceae, las hortalizas de bulbo, las hortalizas leguminosas, las raíces y los tubérculos, el límite de Pb es de 0,01 mg/kg, para las hortalizas de hoja es de 0,03 mg/kg y para las hortalizas de fruto es de 0,05 mg/kg. Para las legumbres, raíces y tubérculos, tallos y brotes, el límite de Cd es de 0,01 mg/kg; para las hortalizas de hoja, de 0,02 mg/kg; y para las hortalizas Brassicaceae, hortalizas de bulbo y hortalizas de fruto, de 0,05 mg/kg. No hay límites permitidos para el mercurio (Hg) y el arsénico (As), a pesar de que numerosos estudios han demostrado que estos elementos se bioacumulan en las plantas comestibles, lo que subraya la importancia de establecer niveles máximos permitidos (Allevato *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2019).

Dado que los metales pesados no se descomponen de forma natural mediante procesos biológicos o químicos como la mayoría de los contaminantes orgánicos, la contaminación por metales pesados es uno de los tipos de contaminación ambiental más dañinos. Los compuestos que contienen metales pesados pueden cambiar, pero los componentes metálicos siempre permanecen; en algunas situaciones, estos cambios pueden hacer que el metal adopte formas más peligrosas (Chiang, 1988).

Los suelos agrícolas suelen incluir metales pesados como el cadmio debido a la deposición atmosférica, la fertilización y la utilización de aguas residuales (Qin *et al.*, 2020). Químicamente disuelto en el agua del suelo, adsorbido como componente de minerales en superficies orgánicas e inorgánicas, precipitado con otros componentes del suelo e integrado en estructuras biológicas. A través de las raíces, el Cd entra en las plantas en la forma divalente Cd^{2+} , que posteriormente es transportado por el xilema antes de almacenarse en las hojas o en algunos órganos de las plantas (Clements y Feng, 2016; Piršelová, 2016).

Bajos niveles de Cd pueden dañar fisiológicamente el sistema fotosintético, la transpiración y la apertura de estomas. Otros efectos de la exposición al Cd son la oxidación de las proteínas, la sobreproducción de especies reactivas del oxígeno (ROS), la clorosis, la laminación de las hojas, las lesiones necróticas, el marchitamiento, la inhibición de las plantas cultivadas, la reducción de la biomasa, los desequilibrios en la absorción de agua, los desequilibrios en los sistemas de nutrientes, la inhibición de la replicación del ADN y la inhibición bioquímica de las enzimas de fijación del CO_2 (Amir *et al.*, 2019; Jaskulak y Grobelak, 2019; Qin *et al.*, 2020; Rady *et al.*, 2019; Roy, 2019).

Los efectos agudos y a largo plazo sobre la salud del consumo de hortalizas cultivadas en aguas contaminadas con plomo y cadmio incluyen daños en el sistema nervioso, circulatorio, gastrointestinal, hematológico y reproductor, así como efectos acumulativos en los riñones, los huesos y los pulmones (González *et al.*, 2006; Nava y Méndez, 2011; Pérez y Azcona, 2012).

Se han realizado investigaciones desde que los países se han informado del hallazgo de metales pesados en verduras u otros alimentos destinados al consumo humano. Así, por ejemplo, en China e India se trabaja intensamente con el fin de i) evaluar la acumulación sobre las hojas de vegetales expuestas a fertilizantes que contienen grandes cantidades de cadmio (Cd), plomo (Pb), mercurio (Hg) entre otros. ii) Identificar la toxicidad causada por consumo de hortalizas como brócoli y lechuga. iii) analizar riesgos en la salud por ingesta de vegetales (irrigadas con aguas contaminadas), cereales y leche. iv) entender la bioacumulación de metales en algunas especies como calabaza de botella, calabaza esponja, coliflor, repollo, berenjena, tomates, amaranto, calabaza, trigo, arroz y rabanitos (Reyes, 2020).

En el Perú, las empresas agroexportadoras han analizado diferentes agroquímicos para no afectar nuestro ambiente y asegurar la inocuidad alimentaria en cuanto a metales pesados por ello dentro de los agroquímicos evaluados han detectado que algunos fertilizantes que son usados como fuentes de zinc presentan metales pesados en altas concentraciones de cadmio y plomo, esto se debe a que los fertilizantes minerales a base de zinc, según lo descubierto en 1817, por Stromeyer, en Göttingen, y por Herman en Schöneber se puede encontrar en toda la corteza terrestre, pero en su mayoría se produce como subproducto del refinado de los minerales de zinc debido al proceso de extracción de zinc en zonas mineras y también se conoce que no es un elemento naturalmente puro pero si tiene afinidades químicas con el metal zinc, plomo, cobre o con elementos como el óxido de cadmio, el cloruro de cadmio o el sulfuro (sulfato o sulfuro de cadmio). En adición se tiene referencias que uno de los problemas ambientales más serios fue el ocurrido en Japón, en 1912, donde el arroz que consumían los habitantes de la ciudad de Toyama se regaba con las aguas procedentes del río Jintsu, contaminado por cadmio disuelto procedente de una mina de Zinc y Plomo situada río arriba (Reyes, 2020).

Por lo antes expuesto y debido a la falta de investigación sobre la bioacumulación de cadmio y plomo en plantas de consumo humano a través del uso de fertilizantes como Sulfato de Zinc ($ZnSO_4$) aplicados vía foliar o por sistema de riego y que si presentan residuos de metales pesados de cadmio y plomo, el cual fue analizado antes de iniciar el ensayo superando el valor permitido en fruta por la Norma Europea para frutas (LMR cadmio 0.05 ppm y plomo 0.10 ppm) justifica la necesidad de realizar estudios que demuestren que si existe bioacumulación de cadmio y plomo en las raíces de rabanito que son aplicadas con el fertilizante sulfato de zinc que si presenta cadmio y plomo.

MATERIAL Y MÉTODOS

El presente trabajo se realizó en condiciones de invernadero del Laboratorio de Biotecnología de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional de Trujillo.

1. Siembra de semillas en invernadero

Se adaptaron macetas plásticas de las dimensiones de 15.5 cm de alto, 79.6 cm de largo con la finalidad de evitar el exceso de agua.

En cada maceta se colocó 26 Kg de sustrato, compuesto de 20 kg de tierra preparada + 1 kg de humus + 5 kg de compost. de la marca 4 estaciones, seguidamente se realizó la siembra directa en cada maceta, distribuyendo 400 semillas certificadas de *Raphanus sativus* L. "rabanito" de la variedad Crimson Giant, a una profundidad de 0.5 cm, luego se cubrió con el mismo sustrato. Las macetas se colocaron en un espacio con radiación natural y se regaron de forma diaria con agua potable. A los 15 días de sembrado se realizó el deshije dejando solo 200 plantas por cada unidad experimental.

2. Análisis de cadmio y plomo en fertilizante sulfato de zinc

Se realizó la compra de 1 saco sellado de 25 Kg del fertilizante sulfato de zinc en la tienda de productos agrícolas QUIMICOS GOICOHEA, ubicada en la ciudad de Trujillo. Del fertilizante adquirido se obtuvo 1Kg de muestra (cantidad indicada por el laboratorio Ceimic que está establecida según procedimiento estandarizado de recepción de muestras para insumos químicos u orgánicos), el cual se colocó en una bolsa ziploc y se procedió al cierre hermético para evitar derrames, luego se etiquetó la bolsa ziploc con el nombre de la muestra; a su vez se adjuntó la hoja de identificación impresa, que contenía información como identificación del cliente, identificación de la muestra, servicio requerido (análisis de metales pesados cadmio y plomo). Posteriormente la muestra se colocó dentro de una caja de tecnoport con su respectivo rotulo indicando nombre y dirección del laboratorio externo, el cual utilizó el método AOAC 2015.01 21th. Edition 2019 Heavy Metals in Food. Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry, siguiendo el siguiente procedimiento:

Se pesó alícuotas de muestra (normalmente 0.25 g de muestra) en recipientes de digestión por microondas. Se añadió 4 mL de HNO₃ concentrado y 1 mL de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) al 30% a cada recipiente de digestión. Se añadió 0,1 mL de la solución de 50 mg/L de Au + Lu a cada recipiente de digestión. Se tapó bien los recipientes y se insertó en camisas de presión. Se colocó los recipientes en el sistema de microondas de acuerdo con las instrucciones del fabricante y se conectó los sensores de temperatura y/o presión adecuados. Las muestras se digirieron a una temperatura mínima de 190°C durante un tiempo mínimo de 10 minutos.

En el programa de microondas se incluyeron tiempos de rampa y de enfriamiento apropiados, según el tipo de muestra y modelo de sistema de digestión por microondas. La digestión por microondas se realizó mediante control de la temperatura y cuando se utilizó este mecanismo para alcanzar objetivos de digestión varió según el número de

muestras que pueden digerirse simultáneamente y de este número dependerá la potencia de la unidad, del número de recipientes y de las características de pérdida de calor de los recipientes y finalmente se aseguró que todos los recipientes alcanzaran al menos 190°C y se mantuvieran a esta temperatura durante al menos 10 minutos para después seguir con el proceso de lectura de cadmio y plomo presente en la muestra de fertilizante.

3. Preparación y fertilización con sulfato de zinc

Se preparó la solución de fertilización, en el cual se disolvió 0.06 gramos de fertilizante de sulfato de zinc del proveedor Químicos Goicochea en 150 mililitros de agua, luego esta solución fue trasvasada en un frasco pulverizador (con capacidad de 1L) para realizar la fertilización de *R. sativus* "rabanito" a los 25 días de haberse sembrado. Esta aplicación de fertilizante sulfato de zinc se realizó una sola vez en el ensayo para las 12 unidades experimentales (T2R1, T2R2, T2R3, T2R4; T3R1, T3R2, T3R3, T3R4; T4R1, T4R2, T4R3 y T4R4).

4. Medición de parámetros biométricos y análisis de cadmio y plomo en hojas y raíces de *R. sativus* "rabanito"

Para la medición de los parámetros biométricos se cosecharon a los 15 días de haberse fertilizado (15 DDA), las 4 unidades experimentales del tratamiento 2 y su grupo control de 15 días (T15), del mismo modo se procedió con la cosecha para el tratamiento 3 (a los 30 días de haberse fertilizado= 30 DDA) y su grupo control de 30 días (T30) y por último se cosecharon las 4 unidades experimentales del tratamiento 4 (a los 45 días de haberse fertilizado= 45 DDA) y su grupo control de 45 días (T45).

En cada fecha de cosecha de los tratamientos se procedió a obtener el porcentaje de plantas cloróticas, porcentaje de materia seca de hojas, diámetro ecuatorial de raíces, porcentaje de materia seca de raíces, residuos de cadmio y plomo en hojas, residuos de cadmio y plomo en raíces.

4.1. Grupo Control Testigo (T15= Grupo control a los 15 días de tiempo esperado, T30= Grupo control a los 30 días de tiempo esperado, T45= Grupo control a los 45 días de tiempo esperado).

El grupo control (T15) se cosechó en la misma fecha que el tratamiento 2, el grupo control (T30) se cosechó en la misma fecha que el tratamiento 3 y el grupo control (T45) se cosechó en la misma fecha que el tratamiento 4, para obtener el porcentaje de plantas cloróticas, porcentaje de materia seca de hojas, diámetro ecuatorial de raíces, porcentaje de materia seca de raíces, residuos de cadmio y plomo en hojas, residuos de cadmio y plomo en raíces.

- Porcentaje de plantas cloróticas y porcentaje de materia seca de hojas: Se eligieron 20 plantas tomadas al azar de cada unidad experimental, se procedió a registrar las plantas que presentaban clorosis en las hojas (Anexo 4, 5, 6) y se obtuvo el porcentaje de plantas con clorosis mediante la formula: número de plantas con clorosis/20 x 100.

Después se procedió a pesar las hojas para obtener el peso fresco, posteriormente esta muestra se empaquetó en sobre manila rotuladas respectivamente, para ser

trasladadas al laboratorio SAM – 405 de la Escuela de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional de Trujillo para ser deshidratadas haciendo uso de la estufa y obtener el peso seco de hojas. Por consiguiente, se obtuvo el porcentaje de materia seca de hojas mediante la fórmula: peso seco/peso fresco x 100, y se repitió de la misma forma para cada unidad experimental.

- Medición de diámetro ecuatorial y Porcentaje de materia seca de raíces: Se tomaron las 20 raíces de las mismas plantas tomadas para obtener la materia seca de hojas. Se procedió a medir el diámetro ecuatorial utilizando un vernier, después se inició con el pesado de las raíces para obtener el peso fresco de raíz y luego estas 20 raíces se empaquetaron en sobre manila para ser trasladadas al laboratorio SAM - 405 de la Escuela de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional de Trujillo para ser deshidratadas haciendo uso de la estufa y obtener el peso seco de raíces.

Finalmente se procedió a obtener el porcentaje de materia seca de raíces mediante la fórmula: peso seco/peso fresco x 100, y se repitió de la misma forma para cada unidad experimental.

- Análisis de concentración de cadmio y plomo en hojas y raíces: Se colectaron las plantas de la unidad experimental sin consideraciones de exclusión para obtener 0.5 Kg de hojas frescas y 1 Kg de raíces frescas de cada unidad experimental, las cuales se empaquetaron en bolsa de papel kraft para las hojas y en bolsa plástica ziploc para las raíces. Posteriormente la muestra se colocó dentro de una caja de tecnopor con su respectivo rotulo indicando nombre y dirección del laboratorio externo, el cual utilizó el método LAB-IT-014: Determination of metals in Food. Referencia: AOAC 2015.01 / Method EPA 6020B, siguiendo el siguiente procedimiento:

La muestra se preparó por digestión húmeda utilizando el sistema de digestión por microondas en el cual se pesó con precisión 25 mg de muestra bien homogenizada en un plato de sílice limpio. Luego se añadió 25 ml de ácido sulfúrico al 20%, mezclando bien con una varilla agitadora de vidrio asegurándose de que todo el material de la muestra se humedezca con el ácido, se enjuagó la varilla agitadora con agua en la cápsula de sílice. Se procedió a secar bien el contenido de la cápsula en un horno a 110°C. Cuando la muestra estuvo completamente seca, se calentó el contenido de la cápsula con una llama suave (similar al mechero Bunsen) hasta que se eliminó toda la materia volátil.

Luego se colocó en el horno a 250°C, aumentando lentamente la temperatura hasta 500°C, se mantuvo a la temperatura entre 6 y 8 horas. Se retiró y se colocó a enfriar. La ceniza obtenida fue blanca sin restos de carbono, se repitió el colocar la cápsula en el horno a 500°C y se calcinó durante 30 minutos. Se repitió el tratamiento con ácido nítrico utilizando incrementos de 1mL de HNO₃ hasta obtener cenizas blancas/rojas parduscas y sin carbono.

Se retiró la placa del horno, se enfrió y añadió 1mL de HNO₃ y 10mL de agua. Se calentó en placa caliente hasta que se disolvió la ceniza de la muestra, posteriormente

se transfirió cuantitativamente el contenido del plato a un matraz aforado de 50mL, y se calentó el plato con 10mL de HCl (1+1) y finalmente se transfirió de nuevo la solución al mismo matraz aforado para aforar con agua para después seguir con el proceso de lectura de cadmio y plomo presente en la muestra de hojas y raíces de *R. sativus* "rabanito".

4.2 Tratamiento 2 (T2= 15 DDA: a los 15 días de haberse fertilizado).

Las unidades experimentales del Tratamiento 2, se cosechó a los 15 días de haberse fertilizado obteniendo el porcentaje de plantas cloróticas, porcentaje de materia seca de hojas, diámetro ecuatorial de raíces, porcentaje de materia seca de raíces, residuos de cadmio y plomo en hojas, residuos de cadmio y plomo en raíces.

Porcentaje de plantas cloróticas y porcentaje de materia seca de hojas: Se eligieron 20 plantas tomadas al azar de cada unidad experimental, se procedió a registrar las plantas que presentaban clorosis en las hojas (Anexo 4) y se obtuvo el porcentaje de plantas con clorosis mediante la fórmula: número de plantas con clorosis/20 x 100.

Después se procedió a pesar las hojas para obtener el peso fresco, posteriormente esta muestra se empaquetó en sobre manila rotuladas respectivamente, para ser trasladadas al laboratorio SAM – 405 de la Escuela de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional de Trujillo para ser deshidratadas haciendo uso de la estufa y obtener el peso seco de hojas.

Por consiguiente, se obtuvo el porcentaje de materia seca de hojas mediante la fórmula: peso seco/peso fresco x 100, y se repitió de la misma forma para cada unidad experimental.

Medición de diámetro ecuatorial y Porcentaje de materia seca de raíces: Se tomaron las 20 raíces de las mismas plantas tomadas para obtener la materia seca de hojas. Se procedió a medir el diámetro ecuatorial utilizando un vernier, después se inició con el pesado de las raíces para obtener el peso fresco de raíz y luego estas 20 raíces se empaquetaron en sobre manila para ser trasladadas al laboratorio SAM - 405 de la Escuela de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional de Trujillo para ser deshidratadas haciendo uso de la estufa y obtener el peso seco de raíces. Finalmente se procedió a obtener el porcentaje de materia seca de raíces mediante la fórmula: peso seco/peso fresco x 100, y se repitió de la misma forma para cada unidad experimental.

- Análisis de concentración de cadmio y plomo en hojas y raíces: Se colectaron las plantas de la unidad experimental para obtener 0.5 Kg de hojas frescas y 1 Kg de raíces frescas de cada unidad experimental, las cuales se empaquetaron en bolsa de papel kraft para las hojas y en bolsa plástica ziploc para las raíces y luego fueron etiquetadas y enviadas al laboratorio externo, el cual utilizó el método LAB-IT-014: DETERMINATION OF METALS IN FOOD. Referencia: AOAC 2015.01 / Method EPA 6020B para obtener la concentración de cadmio y plomo en hojas y raíces de *R. sativus* "rabanito".

4.3 Tratamiento 3 (T3= 30 DDA: a los 30 días de haberse fertilizado).

Las unidades experimentales del Tratamiento 3, se cosechará a los 30 días de haberse fertilizado para obtener el porcentaje de plantas cloróticas, porcentaje de materia seca de hojas, diámetro ecuatorial de raíces, porcentaje de materia seca de raíces, residuos de cadmio y plomo en hojas, residuos de cadmio y plomo en raíces.

- Porcentaje de plantas cloróticas y porcentaje de materia seca de hojas: Se eligieron 20 plantas tomadas al azar de cada unidad experimental, se procedió a registrar las plantas que presentaban clorosis en las hojas (Anexo 5) y se obtuvo el porcentaje de plantas con clorosis mediante la formula: número de plantas con clorosis/20 x 100.

Después se procedió a pesar las hojas para obtener el peso fresco, posteriormente esta muestra se empaquetó en sobre manila rotuladas respectivamente, para ser trasladadas al laboratorio SAM – 405 de la Escuela de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional de Trujillo para ser deshidratadas haciendo uso de la estufa y obtener el peso seco de hojas.

Por consiguiente, se obtuvo el porcentaje de materia seca de hojas mediante la formula: peso seco/peso fresco x 100, y se repitió de la misma forma para cada unidad experimental.

- Medición de diámetro ecuatorial y Porcentaje de materia seca de raíces: Se tomaron las 20 raíces de las mismas plantas tomadas para obtener la materia seca de hojas. Se procedió a medir el diámetro ecuatorial utilizando un vernier, después se inició con el pesado de las raíces para obtener el peso fresco de raíz y luego estas 20 raíces se empaquetaron en sobre manila para ser trasladadas al laboratorio SAM - 405 de la Escuela de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional de Trujillo para ser deshidratadas haciendo uso de la estufa y obtener el peso seco de raíces.

Finalmente se procedió a obtener el porcentaje de materia seca de raíces mediante la formula: peso seco/peso fresco x 100, y se repitió de la misma forma para cada unidad experimental.

- Análisis de concentración de cadmio y plomo en hojas y raíces: Se colectaron las plantas de la unidad experimental para obtener 0.5 Kg de hojas frescas y 1 Kg de raíces frescas de cada unidad experimental, las cuales se empaquetaron en bolsa de papel kraft para las hojas y en bolsa plástica ziploc para las raíces y luego fueron etiquetadas y enviadas al laboratorio externo, el cual utilizó el método LAB-IT-014: DETERMINATION OF METALS IN FOOD. Referencia: AOAC 2015.01 / Method EPA 6020B para obtener la concentración de cadmio y plomo en hojas y raíces de *R. sativus* L. "rabanito".

4.4 Tratamiento 4 (T4= 45 DDA: a los 45 días de haberse fertilizado).

Las unidades experimentales del Tratamiento 4, se cosechará a los 45 días de haberse fertilizado para obtener el porcentaje de plantas cloróticas, porcentaje de materia seca de hojas, diámetro ecuatorial de raíces, porcentaje de materia seca de raíces, residuos de cadmio y plomo en hojas, residuos de cadmio y plomo en raíces.

- Porcentaje de plantas cloróticas y porcentaje de materia seca de hojas: Se eligieron 20 plantas tomadas al azar de cada unidad experimental, se procedió a registrar las plantas que presentaban clorosis en las hojas (Anexo 6) y se obtuvo el porcentaje de plantas con clorosis mediante la formula: número de plantas con clorosis/20 x 100.

Después se procedió a pesar las hojas para obtener el peso fresco, posteriormente esta muestra se empaquetó en sobre manila rotuladas respectivamente, para ser trasladadas al laboratorio SAM – 405 de la Escuela de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional de Trujillo para ser deshidratadas haciendo uso de la estufa y obtener el peso seco de hojas.

Por consiguiente, se obtuvo el porcentaje de materia seca de hojas mediante la formula: peso seco/peso fresco x 100, y se repitió de la misma forma para cada unidad experimental.

- Medición de diámetro ecuatorial y Porcentaje de materia seca de raíces: Se tomaron las 20 raíces de las mismas plantas tomadas para obtener la materia seca de hojas. Se procedió a medir el diámetro ecuatorial utilizando un vernier, después se inició con el pesado de las raíces para obtener el peso fresco de raíz y luego estas 20 raíces se empaquetaron en sobre manila para ser trasladadas al laboratorio SAM - 405 de la Escuela de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional de Trujillo para ser deshidratadas haciendo uso de la estufa y obtener el peso seco de raíces.

Finalmente se procedió a obtener el porcentaje de materia seca de raíces mediante la formula: peso seco/peso fresco x 100, y se repitió de la misma forma para cada unidad experimental.

- Análisis de concentración de cadmio y plomo en hojas y raíces: Se colectaron las plantas de la unidad experimental para obtener 0.5 Kg de hojas frescas y 1 Kg de raíces frescas de cada unidad experimental, las cuales se empaquetaron en bolsa de papel kraft para las hojas y en bolsa plástica ziploc para las raíces y luego fueron etiquetadas y enviadas al laboratorio externo, el cual utilizó el método LAB-IT-014: DETERMINATION OF METALS IN FOOD. Referencia: AOAC 2015.01 / Method EPA 6020B para obtener la concentración de cadmio y plomo en hojas y raíces de *R. sativus* "rabanito".

5. Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos a el primer análisis estadístico aplicado ANOVA, posteriormente para la determinación de diferencias significativas en los tratamientos se aplicó la prueba de Tukey, diagrama de box plot y finalmente se sometió a correlación de Pearson y Post Hoc.

6. Consideraciones éticas y rigor

Se cumplieron con todos los aspectos éticos y regulatorios establecidos por la Universidad Nacional de Trujillo como justicia, principio de beneficencia, principio de no maleficencia, respeto, cuidado del medioambiente, respeto a la biodiversidad, responsabilidad, rigor científico, veracidad y políticas antiplagio.

RESULTADOS

Los resultados para determinar la bioacumulación de cadmio y plomo en *Raphanus sativus* "rabanito" a los 15, 30 y 45 días de fertilizado con sulfato de zinc que presentaba 125.175 ppm de cadmio y 7.554 ppm de plomo en condiciones de invernadero son los siguientes:

De la tabla 1, figura 1 y figura 2; se obtiene que la mayor bioacumulación de cadmio en raíz es de 0.0584 ppm en el testigo a 45 días superando el límite permitido de 0.0200 ppm y la mayor bioacumulación de cadmio en hojas estuvo en el tratamiento 2 (a los 15 días de la aplicación del fertilizante: T2-15DDA) con 0.1057ppm y en el tratamiento 4 (a los 45 días de la aplicación del fertilizante: T4-45 DDA) con 0.1000ppm.

Tabla 1. Bioacumulación de cadmio en hojas y raíz de *R. sativus* "rabanito" a los 15, 30 y 45 días después de aplicado el fertilizante sulfato de zinc y del grupo testigo en condiciones de invernadero.

Metal pesado	Tratamiento	Repetición	Residuo detectado (ppm)	Medias / tratamiento	Testigo (ppm)	LMR
CADMIO EN HOJAS	T2 (15DDA)	T2R1	0.1100	0.1057	0.0965	
		T2R2	0.1077			
		T2R3	0.0977			
		T2R4	0.1080			
CADMIO EN RAIZ		T2R1	0.0244	0.0223	0.0158	0.0200
		T2R2	0.0207			
		T2R3	0.0190			
		T2R4	0.0238			
CADMIO EN HOJAS	T3 (30 DDA)	T3R1	0.0722	0.0758	0.0652	
		T3R2	0.0753			
		T3R3	0.0793			
		T3R4	0.0765			
CADMIO EN RAIZ		T3R1	0.0141	0.0172	0.0147	0.0200
		T3R2	0.0160			
		T3R3	0.0213			
		T3R4	0.0184			
CADMIO EN HOJAS	T4 (45 DDA)	T4R1	0.0853	0.1000	0.0909	
		T4R2	0.0940			
		T4R3	0.1013			
		T4R4	0.1229			
CADMIO EN RAIZ		T4R1	0.0190	0.0220	0.0584	0.0200
		T4R2	0.0255			
		T4R3	0.0231			
		T4R4	0.0208			

Legenda: DDA: Días después de aplicado el fertilizante; LMR: Límite máximo de residuos.

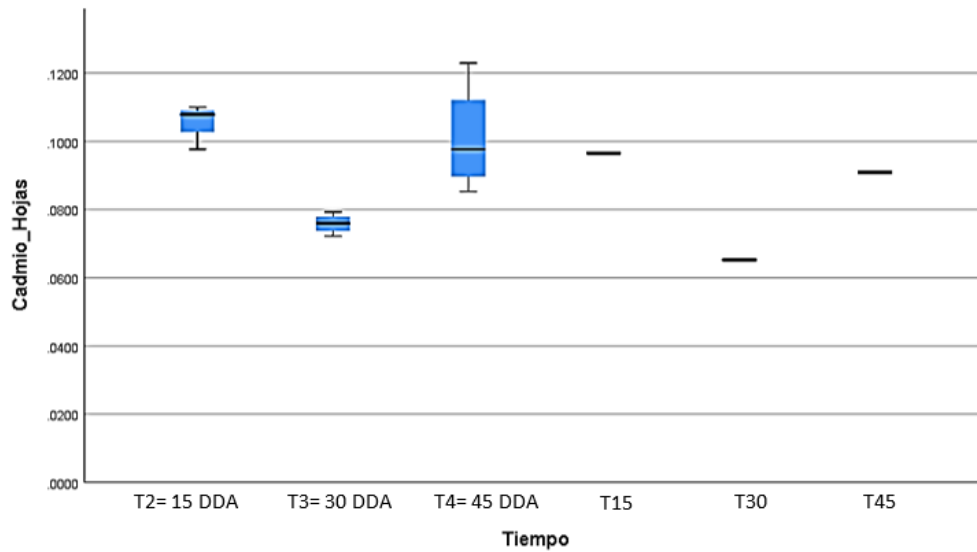


Fig. 1. Bioacumulación de cadmio en hojas de *R. sativus* L. "rabanito" a los 15, 30 y 45 días después de fertilizado con sulfato de zinc (15, 30 y 45) versus el grupo testigo control (T15, T30, T45) en condiciones de invernadero.

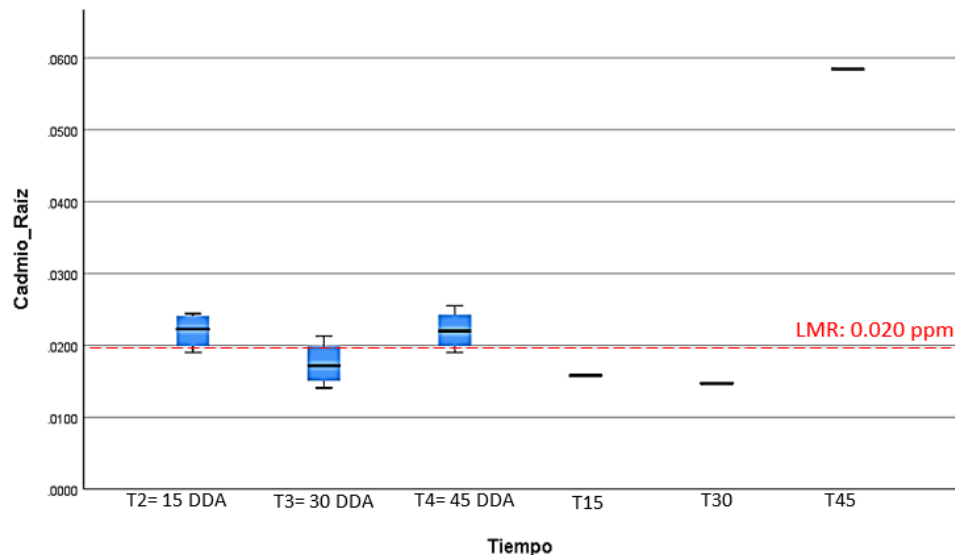


Fig. 2. Bioacumulación de cadmio en raíz de *R. sativus* L. "rabanito" a los 15, 30 y 45 días después de fertilizado con sulfato de zinc (15DDA, 30DDA y 45DDA) versus el grupo testigo control (T15, T30, T45) en condiciones de invernadero comparado con el límite máximo de residuos (LMR).

De la Figura 1, se verifica que, la bioacumulación de cadmio en hojas de *R. sativus* L. "rabanito" presenta mayor absorción media en la hoja a los 15 y 45 días de aplicado el fertilizante sulfato de zinc, la cual no difiere significativamente de los testigos.

De la figura 2, se verifica que, la bioacumulación de cadmio en raíz de *R. sativus* L. "rabanito" presenta mayor absorción media en la raíz del grupo testigo sin aplicación a 45 días de tiempo esperado (T45), la cual difiere significativamente de los otros testigos y de los tratamientos 2, tratamiento

3 y tratamiento 4. Así mismo se verifica, que la absorción media de cadmio en ppm a los 15, 30 y 45 días no difieren significativamente, en la raíz.

De la tabla 2, figura 3 y figura 4; se obtiene que la mayor bioacumulación de plomo en raíz es de 0.0960 ppm en el tratamiento 2 (a los 15 días de la aplicación del fertilizante: T2-15DDA) sin superar el límite permitido de 0.1000 ppm y la mayor bioacumulación de plomo en hojas estuvo en el tratamiento 4 (a los 45 días de la aplicación del fertilizante: T4-45DDA) con 0.3333 ppm.

Tabla 2. Bioacumulación de plomo en hojas y raíz de *R. sativus* L. "rabanito" a los 15, 30 y 45 días después de aplicado el fertilizante sulfato de zinc y del grupo testigo en condiciones de invernadero.

Metal pesado	Tratamiento	Repetición	Residuo detectado (ppm)	Medias / tratamiento	Testigo (ppm)	LMR
PLOMO EN HOJAS	T2 (15DDA)	T2R1	0.1430	0.1680	0.2600	
		T2R2	0.2530			
		T2R3	0.1720			
		T2R4	0.1280			
PLOMO EN RAIZ		T2R1	0.1180	0.0960	0.0120	0.1000
		T2R2	0.0420			
		T2R3	0.0740			
		T2R4	0.1660			
PLOMO EN HOJAS	T3 (30 DDA)	T3R1	0.1090	0.0735	0.1590	
		T3R2	0.1270			
		T3R3	0.0880			
		T3R4	0.0240			
PLOMO EN RAIZ		T3R1	0.0150	0.0195	0.0250	0.1000
		T3R2	0.0070			
		T3R3	0.0240			
		T3R4	0.0240			
PLOMO EN HOJAS	T4 (45 DDA)	T4R1	0.2840	0.3333	0.3740	
		T4R2	0.2540			
		T4R3	0.3680			
		T4R4	0.4650			
PLOMO EN RAIZ		T4R1	0.0100	0.0190	0.0280	0.1000
		T4R2	0.0210			
		T4R3	0.0260			
		T4R4	0.0170			

Legenda: DDA: Días después de aplicado el fertilizante, LMR: Límite máximo de residuos.

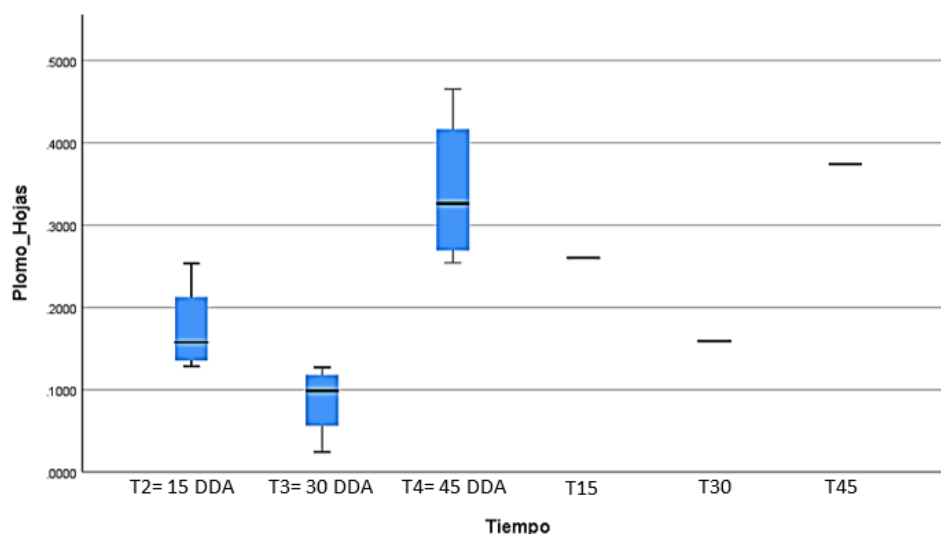


Fig. 3. Bioacumulación de plomo en hojas de *R. sativus* “rabanito” a los 15, 30 y 45 días de fertilizado con sulfato de zinc (15, 30 y 45) versus el grupo testigo control (T15, T30, T45) en condiciones de invernadero.

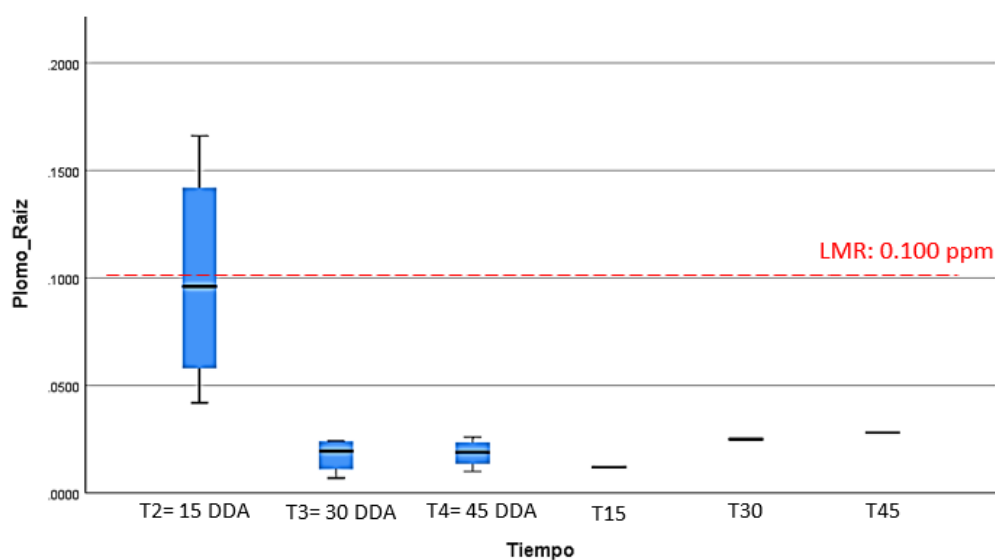


Fig. 4. Bioacumulación de plomo en raíz de *R. sativus* L. “rabanito” a los 15, 30 y 45 días de fertilizado con sulfato de zinc (15DDA, 30DDA y 45DDA) versus el grupo testigo control (T15, T30, T45) en condiciones de invernadero comparado con el límite máximo de residuos (LMR).

De la Figura 3, se verifica que, la bioacumulación de plomo en hojas de *R. sativus* L. “rabanito” presenta mayor absorción media en las hojas a los 45 días, la cual difiere significativamente de las observaciones a los 15 y 30.

De la Figura 4, se verifica que, la bioacumulación de plomo en raíz de *Raphanus sativus* L. “rabanito” presenta mayor absorción media en la raíz en el tratamiento 2 (a los 15 días de fertilizado), la cual difiere significativamente de los otros testigos y de los tratamientos 3 (T3=30 DDA) y tratamiento 4 (T4= 45 DDA).

De la tabla 3, se verifica que, a nivel de raíz, si se encontró diferencias significativas en la bioacumulación del cadmio (F: 37.139; sig<0.05) y plomo (F: 3.859; sig<0.05). Así mismo, se verifica mayor potencia en la prueba realizada en la bioacumulación de cadmio con 100%, comprobándose que existe diferencia estadísticamente significativa entre las concentraciones promedio de los metales encontradas en la raíz entre un tiempo y otro.

Tabla 3. ANOVA en bioacumulación de cadmio y plomo en raíz de *R. sativus* “rabanito” para los tratamientos (15, 30 y 45 días de fertilizado con sulfato de zinc).

Origen	Variable dependiente	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.	Eta parcial al cuadrado	Potencia observada ^c
Modelo corregido	Cadmio_Raíz	,001 ^a	5	,000	37,139	,000	,954	1,000
	Plomo_Raíz	,019 ^b	5	,004	3,859	,038	,682	0,719
Intersección	Cadmio_Raíz	,006	1	,006	748,048	,000	,988	1,000
	Plomo_Raíz	,011	1	,011	10,705	,010	,543	0,829
Tiempo	Cadmio_Raíz	,001	5	,000	37,139	,000	,954	1,000
	Plomo_Raíz	,019	5	,004	3,859	,038	,682	0,719
Error	Cadmio_Raíz	7,260E-5	9	8,066E-6				
	Plomo_Raíz	,009	9	,001				
Total	Cadmio_Raíz	,009	15					
	Plomo_Raíz	,053	15					
Total corregido	Cadmio_Raíz	,002	14					
	Plomo_Raíz	,028	14					

Tabla 4. ANOVA en bioacumulación de cadmio y plomo en hojas de *R. sativus*. “rabanito” para los tratamientos (15, 30 y 45 días de fertilizado con sulfato de zinc).

Origen	Variable dependiente	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.	Eta parcial al cuadrado	Potencia observada ^c
Modelo corregido	Cadmio-hojas	,003 ^a	5	,001	5,783	,012	,763	,889
	Plomo-hojas	,168 ^b	5	,034	7,150	,006	,799	,947
Intersección	Cadmio-hojas	,076	1	,076	769,884	,000	,988	1,000
	Plomo-hojas	,520	1	,520	110,725	,000	,925	1,000
Tiempo	Cadmio-hojas	,003	5	,001	5,783	,012	,763	,889
	Plomo-hojas	,168	5	,034	7,150	,006	,799	,947
Error	Cadmio-hojas	,001	9	9,920E-5				
	Plomo-hojas	,042	9	,005				
Total	Cadmio-hojas	,131	15					
	Plomo-hojas	,896	15					
Total corregido	Cadmio-hojas	,004	14					
	Plomo-hojas	,210	14					

De la tabla 4, se verifica que, a nivel de hojas, si se encontraron diferencias significativas en la bioacumulación del cadmio (F: 5.783; sig<0.05) y plomo (F: 7.150; sig<0.05). Así mismo, se encontró mayor potencia en la prueba realizada en la bioacumulación de plomo con 94.7%, comprobándose que existe diferencia estadísticamente significativa entre las concentraciones promedio de los metales entre un tiempo y otro.

De la tabla 5, se verifica que no existe relación significativa (sig>0.05) entre el peso seco en hojas y la concentración de cadmio y plomo en hojas de *Raphanus sativus* L.

Tabla 5. Relación entre el peso seco de hojas y la concentración de cadmio y plomo en hojas de *R. sativus* "rabanito".

		Cadmio_ Hojas	Plomo_ Hojas
Peso seco en hojas	Correlación de Pearson	-,262	,392
	Sig. (bilateral)	,346	,149
	N	15	15

De la tabla 6, se verifica que si existe relación inversa significativa (sig<0.05) entre el peso seco en raíz y la concentración de plomo en raíz, con un coeficiente de -0.532 indicando que, a menor peso seco en raíz, mayor es la bioacumulación de plomo en raíz.

Tabla 6. Relación entre el peso seco de la raíz y la concentración de cadmio y plomo en raíz de *R. sativus* "rabanito".

		Cadmio_ Raíz	Plomo_ Raíz
Peso seco en raíz	Correlación de Pearson	,463	-,532*
	Sig. (bilateral)	,082	,041
	N	15	15

De la tabla 7, se verifica que no existe relación significativa (sig>0.05) entre la concentración de cadmio en hojas y la concentración de cadmio en raíz de *R. sativus* L. "rabanito".

Tabla 7. Relación entre la concentración de cadmio en hojas y la concentración de cadmio en raíz de *R. sativus* "rabanito".

		Cadmio_ Raíz
Cadmio_ Hojas	Correlación de Pearson	,199
	Sig. (bilateral)	,478
	N	15

De la tabla 8, se verifica que no existe relación significativa (sig>0.05) entre la concentración de plomo en hojas y la concentración de plomo en raíz de *R. sativus* "rabanito".

Tabla 8. Relación entre la concentración de plomo en hojas y la concentración de plomo en raíz de *R. sativus* L. "rabanito".

		Plomo_ Raíz
Plomo_ Hojas	Correlación de Pearson	-,263
	Sig. (bilateral)	,344
	N	15

De la tabla 9, se verifica que no existe relación significativa (sig>0.05) entre el diámetro ecuatorial de la raíz y la concentración de cadmio en raíz de *R. sativus* "rabanito".

Tabla 9. Relación entre el diámetro ecuatorial de la raíz y la concentración de cadmio en raíz de *R. sativus* "rabanito".

		Diámetro	Cadmio_ Raíz
Diámetro	Correlación de Pearson	1	,316
	Sig. (bilateral)		,251
	N	15	15
Cadmio_ Raíz	Correlación de Pearson	,316	1
	Sig. (bilateral)	,251	
	N	15	15

De la tabla 10, se verifica que existe relación significativa (sig<0.05) entre el diámetro ecuatorial de la raíz y la concentración de plomo en raíz de *R. sativus*, con un coeficiente de -0.608, indicando que, a menor diámetro ecuatorial de la raíz, mayor es la concentración de plomo en raíz.

Tabla 10. Relación entre el diámetro ecuatorial de la raíz y la concentración de plomo en raíz de *R. sativus* "rabanito".

		Diámetro	Plomo_ Raíz
Diámetro	Correlación de Pearson	1	-,608*
	Sig. (bilateral)		,016
	N	15	15
Plomo_ Raíz	Correlación de Pearson	-,608*	1
	Sig. (bilateral)	,016	
	N	15	15

*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

De la tabla 11, en raíz, se tiene que el mayor peso seco (47.37 g) y el mayor diámetro ecuatorial (31.83 mm) se obtuvo en el grupo control testigo a los 45 días de fertilizado (T45) y se obtuvo el mayor residuo de cadmio en raíz (0.0584 ppm) en *R. sativus* L. "rabanito".

Tabla 11. Peso seco, diámetro ecuatorial de raíces y residuos de cadmio y plomo detectados en raíces por tratamientos y residuos de cadmio y plomo detectados en raíces de *R. sativus* "rabanito".

Descripción de tratamiento	Fecha de muestreo	Peso seco total (g)	Diámetro ecuatorial (mm)	Residuo cadmio en raíz (ppm)	Residuo plomo en raíz (ppm)
Tratamiento 2 (15 DDA)	30/10/2023	12.41	18.79	0.0223	0.0960
Grupo control Testigo (T15)		18.17	20.19	0.0158	0.0120
Tratamiento 3 (30 DDA)	14/11/2023	22.94	26.23	0.0172	0.0195
Grupo control Testigo (T30)		27.27	29.18	0.0147	0.0250
Tratamiento 4 (45 DDA)	29/11/2023	36.44	26.30	0.0220	0.0190
Grupo control Testigo (T45)		47.37	31.83	0.0584	0.0280

Tabla 12. Peso seco, porcentaje de plantas con clorosis por tratamientos y residuos de cadmio y plomo detectados en hojas de *R. sativus* "rabanito".

Descripción de tratamiento	Fecha de muestreo	Peso seco total en hojas (g)	%Plantas con clorosis	Residuo cadmio en hoja (ppm)	Residuo plomo en hoja (ppm)
Tratamiento 2 (15 DDA)	30/10/2023	24.80	30.0%	0.1057	0.1680
Grupo control Testigo (T15)		7.26	20.0%	0.0965	0.2600
Tratamiento 3 (30 DDA)	14/11/2023	76.92	73.8%	0.0758	0.0735
Grupo control Testigo (T30)		19.89	70.0%	0.0652	0.1590
Tratamiento 4 (45 DDA)	29/11/2023	104.29	80.0%	0.1000	0.3333
Grupo control Testigo (T45)		28.63	45.0%	0.0909	0.3740

Tabla 13. Porcentaje de materia seca en hojas y raíces por tratamientos en *R. sativus* "rabanito".

Descripción de tratamiento	Fecha de muestreo	%Materia seca en hojas	%Materia seca en raíz
Tratamiento 2 (15 DDA)	30/10/2023	10.0%	3.0%
Grupo control Testigo (T15)		12.0%	15.0%
Tratamiento 3 (30 DDA)	14/11/2023	9.0%	2.0%
Grupo control Testigo (T30)		10.0%	9.0%
Tratamiento 4 (45 DDA)	29/11/2023	13.0%	3.0%
Grupo control Testigo (T45)		12.0%	11.0%

De la tabla 12, en hojas, se tiene que el mayor peso seco (104.29 g) y el mayor porcentaje de plantas con clorosis (80.0%) se obtuvo en el tratamiento 4 (a los 45 días de fertilizado: T4= 45DDA) y presenta mayor residuo de cadmio (0.1000ppm) y plomo (0.3333) en hojas de *R. sativus* "rabanito".

De la tabla 13, se obtuvo que el mayor porcentaje de materia seca en hojas (13%) fue en el tratamiento 4 (a los 45 días de fertilizado: T4= 45 DDA) y en raíz el mayor porcentaje de materia seca (15%) fue en el grupo testigo a los 15 días (T15).

Discusión

Raphanus sativus L. "rabanito" es una planta de tallo corto que está expuesta a absorber dentro de su estructura vegetal metales pesados (Prieto, 2011). En el presente trabajo de investigación se muestra en la tabla 1 y tabla 3 que, si existe bioacumulación de cadmio y plomo en hojas y raíz a los 15, 30 y 45 días después de la fertilización con sulfato de zinc.

En la tabla 1, muestra que, si hay bioacumulación de cadmio en hojas y raíz a 15 DDA, 30 DDA, 45 DDA. Esto se debe a que *R. sativus* "rabanito" tiene la capacidad de bioacumular el cadmio en tallo, raíz y hojas (Morales y Garcia, 2011). En otras investigaciones se tiene que el caso del cadmio (Cd) se moviliza a través de los pelos radicales que es la zona más activa para absorber los iones del suelo en forma de Cd²⁺ antes de translocarse vía xilema y almacenarse en las hojas o en algunos órganos de las plantas (Clements y Feng, 2016; Piršlová, 2016).

En la figura 2, se muestran que los resultados obtenidos de cadmio en raíz de *R. sativus* L. "rabanito" a 15 DDA (0.0223 ppm), 45 DDA (0.0220 ppm) estuvieron dentro del límite máximo permitido por el Codex Alimentarius (Cd= 0.050 ppm) pero superaron el límite establecido por el Reglamento Europeo (UE) 2021/1323 (Cd= 0.020 ppm), y a diferencia del plomo, figura 4, en el cual los valores encontrados en raíz no superaron los límites máximos permitidos de 0.100 ppm para plomo indicados por el Reglamento Europeo (UE) 2021/1317 y por el Codex Alimentarius. En la tabla 1 y tabla 3, muestra que el grupo testigo que no recibió fertilizante sulfato de zinc presentan trazas de cadmio y plomo en hoja y raíz, y esto se debe a que el sustrato de todas las unidades experimentales en el cual se desarrollaron las plantas de *R. sativus* L. "rabanito" presentaron 0.26 ppm de cadmio y 8.88 ppm de plomo, los cuales estaban dentro del valor establecido para suelos agrícolas (Cd= 1.40 ppm y Pb= 70.00 ppm) indicado en el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) según Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM. Siendo el "rabanito" una planta vulnerable a la absorción de metales presentes en el suelo (Prieto *et al.*, 2011), y también se conoce que existe contaminación del suelo por estos metales como desechos sólidos, que pueden provenir de los parques automotores, que liberan cadmio y plomo a la atmosfera y pueden ser transportados por el viento a la zona donde se preparan los sustratos (Beltrán, 2001; Nuñez, 2005), además teniendo los metales en el sustrato existe una relación direccional ascendente en el comportamiento de absorción de cadmio y plomo para *R. sativus* "rabanito" (Hoyos y Guerrero, 2014).

En la tabla 2 se observa que, si hay bioacumulación de plomo en hojas y raíz a 15 DDA, 30 DDA, 45 DDA; y también se

observa que los valores de plomo en las hojas son mayores que los valores encontrados en la raíz, esto se sustenta porque *R. sativus* L. es una planta de tallo corto (Prieto, 2011). En la tabla 2, muestra que el plomo en raíz presentó mayor absorción a los 15 días de la fertilización con sulfato de zinc (0.0960 ppm) y no a los 45 DDA (0.0190 ppm) y esto se debe a que el plomo, como metal iónico es de mayor peso atómico que el cadmio (Chang y College, 2002), por tanto, se desplaza menos en las plantas y con menor movilidad en el suelo (García, 2008).

En la tabla 4, se evidencia que hay diferencia significativa en la bioacumulación de cadmio a nivel de raíz (F:37.139; sig <0.05) siendo el mayor valor acumulado en el testigo a 45 días del tiempo esperado (0.0584 ppm) a diferencia que los tratamientos aplicados con fertilizante sulfato de zinc, presentaron menor valor de cadmio en raíz. Esto se debe a que el zinc tiene un efecto antagónico al reducir significativamente la movilidad de cadmio (Muhammad *et al.*, 2023).

En la tabla 5, 7, 8 y 9, se evidencia que no existe relación significativa (sig>0.05) entre el peso seco en hojas, peso seco de raíces y la concentración de cadmio en *R. sativus*. Esto se debe a que el cadmio genera desequilibrio a nivel fisiológico generando un comportamiento atípico en el desarrollo de las hojas y ganancia de peso a nivel de las raíces (Chang y College, 2002; García, 2008).

De la tabla 6, 10 y 11, se muestra que existe relación significativa (sig<0.05) entre el peso, diámetro ecuatorial de la raíz y la concentración de plomo en raíz, con un coeficiente de -0.608 indicando que a mayor diámetro ecuatorial menor la concentración de plomo en raíz. Esto se debe a que a medida que el cultivo gana mayor biomasa menor será la concentración de metales pesados (Chang y College, 2002; Garcia, 2008).

En la tabla 12, se evidencia un mayor porcentaje de plantas con clorosis a los 45 DDA (80%) con respecto al tiempo esperado de 30 DDA (74%) y 15 DDA (30%) en *R. sativus* "rabanito". Esto se debe a que el metal pesado genera la clorosis, lesiones necróticas, marchitamiento, desequilibrios en la absorción de agua y de nutrientes (Amir *et al.*, 2019; Jaskulak y Grobelak, 2019).

En la tabla 13, se evidencia que el porcentaje de materia seca en raíz es menor en todos los tratamientos fertilizados con sulfato de zinc que contenía cadmio y plomo con respecto al grupo testigo y esto puede basarse en que los metales pesados ocasionan la reducción de la biomasa, desequilibrios en la absorción de agua y desequilibrios en los sistemas de nutrientes (Qin *et al.*, 2020; Rady *et al.*, 2019; Roy, 2019).

En el anexo 46, muestra que el fertilizante sulfato de zinc analizado en un laboratorio externo con acreditación ISO 17025 presentó 125.175 ppm de cadmio y 7.554 ppm de plomo y esto puede deberse a que la procedencia del zinc mayormente es de zonas mineras contaminados con plomo y cadmio a diferentes distancias, profundidad y concentración. Estos relaves contienen concentraciones significativas de metales pesados, como plomo (Pb), arsénico (As), mercurio (Hg) y cadmio (Cd). Estos metales pesados contaminan el agua y el suelo, lo que puede tener un impacto negativo en la

salud pública y la calidad ambiental (Falagán *et al.*, 2017; Puga *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2022).

Las concentraciones de metales pesados en el suelo y las absorbidas por cultivos destinados al consumo humano, como *R. sativus* "rabanito", son una de las principales materias que contribuyen a la contaminación ambiental, degradación de los recursos naturales y a la salud de todos los consumidores, generando a largo plazo daños en el sistemas nervioso, circulatorio, gastrointestinal, hematológico y reproductor, así como efectos acumulativos en los riñones, los huesos y los pulmones. Por lo tanto, es responsabilidad de todos mantener las funciones ecológicas, agrícolas del suelo y asegurar la salud de los consumidores (Durán, 2010; González *et al.*, 2006; Nava y Méndez, 2011; Pérez y Azcona, 2012).

CONCLUSIONES

La fertilización con sulfato de zinc contribuye con la bioacumulación de cadmio y plomo en *R. sativus* L. "rabanito".

La mayor bioacumulación de plomo en raíz (0.096 ppm) fue en el tratamiento 2 (a los 15 días, después de aplicado el fertilizante sulfato de zinc: T2=15 DDA) en *R. sativus* L. "rabanito".

La relación que existe entre el peso seco en raíz y la concentración de plomo en raíz, es inversamente significativa ($\text{sig} < 0.05$) con un coeficiente de -0.532 indicando que, a menor peso seco en raíz, mayor es la bioacumulación de plomo en raíz.

La mayor bioacumulación de plomo en hoja (0.333 ppm) fue en el tratamiento 4 (a los 45 días, después de aplicado el fertilizante sulfato de zinc: T4= 45 DDA) en *R. sativus* L. "rabanito" y no existe relación significativa ($\text{sig} > 0.05$) entre la concentración de plomo en hojas y la concentración de plomo en raíz de *R. sativus* L. "rabanito".

La mayor bioacumulación de cadmio en raíz (0.0584 ppm) se da a los 45 días del tiempo esperado en el grupo testigo, por tanto, se afirma que el testigo al no ser fertilizado con zinc no redujo la movilidad del cadmio en *R. sativus* L. "rabanito".

El mayor peso seco en hojas fue de 28.63g en el grupo testigo de 45 días de tiempo esperado mientras que el menor peso seco en hojas fue de 6.20 g en el tratamiento 2 (a los 15 días, después de aplicado el fertilizante sulfato de zinc: T2= 15DDA) y no existe relación significativa ($\text{sig} > 0.05$) entre el peso seco en hojas y la concentración de cadmio y plomo en hojas de *R. sativus* "rabanito".

El mayor diámetro ecuatorial fue de 31.80 mm a los 45 días del tiempo esperado del grupo testigo mientras que el menor diámetro ecuatorial fue de 18.79 mm en el tratamiento 2 (a los 15 días, después de aplicado el fertilizante sulfato de zinc: T2=15 DDA) en *R. sativus* L. "rabanito" y si existe relación significativa ($\text{sig} < 0.05$) entre el diámetro ecuatorial de la raíz y solo con la concentración de plomo en raíz de *R. sativus*, con un coeficiente de -0.608, indicando que, a menor diámetro ecuatorial de la raíz, mayor es la concentración de plomo en raíz.

El mayor porcentaje de plantas con clorosis de *R. sativus* L. "rabanito", se presenta en el tratamiento 4 (a los 45 días, después de aplicado el fertilizante sulfato de zinc: T4= 45 DDA) con 80%, seguido del tratamiento 3 (a los 30 días, después de aplicado el fertilizante sulfato de zinc: T3=30 DDA) con 73.8 % y por último 30% de plantas con clorosis en el tratamiento 2 (a los 15 días, después de aplicado el fertilizante sulfato de zinc: T2= 15DDA).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al *Herbarium Truxillense* de la Universidad Nacional de Trujillo (H.U.T.) y a la **VI Convocatoria CANON**, por el financiamiento de este artículo. En sus modalidades:

PIC-MODALIDAD 01: "valoración de la biodiversidad en el norte del Perú: rol de las exploraciones biológicas y los herbarios", ganador de la "VI Convocatoria de Proyectos de Ciencia y Tecnología en la Universidad Nacional de Trujillo con Fondos Públicos provenientes del Canon", según se detalla en la Resolución Rectoral N° 0356-2023/UNT, Resolución de Consejo Universitario N° 001-2023/UNT y Resolución Vicerrectoral de Investigación N°137-2023-VIN-UNT.

PIC 02 MODALIDAD 02: "Proyecto de Investigación de Tesis, categoría consolidada Laboratorio de Biotecnología".

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

G.M., B.C.; Concepción, ejecución en campo; A.E., G.R.: Orientación y revisión de metodología; S.E., L.M.: Revisión y redacción; J., M. L.: Revisión y redacción; A.J., D.C.: Trabajo de laboratorio; C., Y.A.: Análisis estadístico; J., R.S.: Análisis estadístico; L., R.V.: Trabajo de laboratorio

CONFLICTO DE INTERESES

Todos los autores realizaron aportes significativos al documento y quienes están de acuerdo con su publicación y manifiestan que no existe, conflictos de interés en la presente investigación.

LITERATURA CITADA

- Allevato, E.; S. Stazi; R. Marabottini & R. D'Annibale.** 2019. Mechanisms of arsenic assimilation by plants and countermeasures to attenuate its accumulation in crops other than rice. *Ecotoxicol Environ Saf*, 185(15): 109701.
- Amir, R.; F. Munir; G. Kubra; T. Lqbal & M. Khan.** 2019. *Plant Signaling Molecules and Cadmium Stress Tolerance*. Academis Press, 1(1): 367-399.
- Beltrán, M.** 2001. Fitoextracción en suelos contaminados con cadmio y zinc usando especies vegetales comestibles. Proyecto de investigación para obtener el grado de Maestra en Ciencias e Ingeniería Ambientales. Universidad Autónoma Metropolitana. México.
- Chang, R. & W. College.** 2002. QUIMICA, Séptima edición. McGraw-Hill. Colombia. 132p.

- Chiang, J.** 1988. Niveles de Metales Pesados en Organismos, Agua y Sedimentos Marinos Recolectados en la V Región de Chile. Memorias del Simposio de los Recursos Vivos y las Pesquerías en el Pacífico Sudeste. Rev. Pacífico Sur, 9(13): 205-215.
- Clemens, S. & M. J. Feng.** 2016. Toxic Heavy Metal and Metalloid Accumulation in Crop Plants and Foods. Rev Plant Biol, 67(1): 489-512.
- Durán, P.** 2010. Transferencia de metales de suelo a planta en áreas mineras: Ejemplo de los Andes peruanos y de la Cordillera Prelitoral Catalana. [Tesis para optar el grado de Doctora en Biología Vegetal. Universidad Barcelona. España].
- Falagán, C., B. Grail & D. Johnson.** 2017. New approaches for extracting and recovering metals from mine tailings. Minerals Engineering, 106: 71-78.
- García, L.** 2008. Capacidad de *Helianthus annuus* L. "girasol" para acumular plomo y su efecto en el crecimiento. (Tesis para obtener el título de Biólogo. Universidad Nacional de Trujillo). Trujillo, Perú. 31p.
- González, J.; G. Alfaro; M. Arriagada; C. Castillo; V. Muñoz; J. Espina y W. Aranda.** 2006. Exposición ocupacional a plomo y cadmio en personal de salud. Rev Chil Salud Pública. Chile, 10(3): 139-145.
- Hoyos, M. & A. Guerrero.** 2014. Bioacumulación de plomo y cadmio en *Brassica oleracea* subsp. Capitata (L.) Metz. y *Raphanus sativus* L. (Tesis para optar el título de Biólogo, Universidad Nacional de Trujillo, Perú).
- Huang, Z.; X.D. Pan; P.G. Gu; J.L. Han & Q. Chen.** 2014. Heavy metals in vegetables and the health risk to population in Zhejiang, China. Rev. Food Control, 36(1): 248-252. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956713513004283>
- Jaskulak, M. & A. Grobelak.** 2019. Cadmium Phytotoxicity—Biomarkers. Rev. Academic Press, 6(1):177-191.
- Morales, M. & I. García.** 2011. Evaluación de *Raphanus sativus* como bioacumulador de cadmio, XIV Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería. México https://smbb.mx/congresos%20smbb/queretaro11/IV_ambiental.html
- Muhammad, U.; Z. Muhammad; R. Muhammad; T. Abbas; A. Muhammad; A., Naeem; H. Alharby; N. Alabdallah; B. Alabdallah; J. Muhammad; A. Shafagat.** 2023. Effect of soil texture and zinc oxide nanoparticles on growth and accumulation of cadmium by wheat: a life cycle study. Revista Environmental Research, 216 (1-10). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114397>
- Nava, C. & M. Méndez.** 2011. Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). Arch Neurocién. México, 16 (3), 140-147. <https://www.medigraphic.com/pdfs/arcneu/ane-2011/ane113f.pdf>
- Núñez, J.** 2005. Bioacumulación de plomo en *Amaranthus caudatus* L. "kiwicha" en condiciones de laboratorio. (Tesis para optar el título de Biólogo. Universidad Nacional de Trujillo. Perú).
- Pérez, P. & M. Azcona.** 2012. Los efectos del cadmio en la salud. España- Rev de Especialidades Médico Quirúrgicas, 17(3): 199-205.
- Piršelová, B.; R. Kuna; P. Lukáč; M. Havrlentová.** 2016. Effect of cadmium on growth, photosynthetic pigments, iron and cadmium accumulation of faba bean (*Vicia faba* cv. Aštar). Agriculture Poľnohospodárstvo, 62(2): 72-79. <https://doi.org/10.1515/agri-2016-0008>
- Prieto, J.; C. González; A. Román & F. Prieto.** 2009. Contaminación y Fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. Tropical and Subtropical Agroecosystems, 10(1): 29-44.
- Puga, S.; M. Sosa; T. Lebgue; C. Quintana & A. Campos.** 2006. Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera. Rev. Ecología Aplicada, 5 (1).
- Qin, S.; H. Liu; Z. Nie et al.** 2020. Toxicity of cadmium and its competition with mineral nutrients for uptake by plants. Rev. Pedosphere, 30(2): 168-180. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(20\)60002-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(20)60002-9)
- Rady, M.; S. Ahmed; M. Seif & H. Taie.** 2019. Alleviation of Cadmium Stress in Wheat by Polyamines. Rev. Academic Press, 17 (1): 463-496. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815794-7.00017-5>
- Reyes, Y.** 2020. Estudio de bioacumulación de metales pesados en plantas de consumo humano para sensado molecular In situ. (Tesis de doctorado, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia).
- Roy, S.** 2019. Cadmium Accumulation in Crops and the Increasing Risk of Dietary Cadmium Exposure an Overview. Rev. Academic Press, 9(1), 247-254. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815794-7.00009-6>
- Wang, L.; Y. Tao; B. Su; L. Wang; P. Liu.** 2022. Environmental and health risks posed by heavy metal contamination of groundwater in the sunan coal Mine, China. Toxics, 10(390): 1-16.
- Yang, B.; Y. Gao; C. Zhang; X. Zheng & B. Li.** 2019. Mercury accumulation and transformation of main leaf vegetable crops in Cambosol and Ferrosol soil in China. Environ Sci Pollut Res, 27(8). <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06798-0>