

BIOACUMULACIÓN DE PLOMO Y CADMIO EN *Brassica oleracea* SUBSP. CAPITATA (L.) METZG. Y *Raphanus sativus* L.

Bioaccumulation of lead and cadmium in Brassica oleracea subsp. capitata (L.) Metzg. and Raphanus sativus L.

Marlon Hoyos-Cerna, Ana Guerrero-Padilla.

Facultad de Ciencias Biológicas – Universidad Nacional de Trujillo-Perú.

marleguerrero@hotmail.com

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo determinar la concentración de plomo y cadmio por bioacumulación en *Brassica oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg. y *Raphanus sativus* L., regadas con aguas a diferentes concentraciones de cada metal. Para ello se trabajó con 20 plantas de *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg. y *R. sativus* L., con 14 días de desarrollo vegetativo, trasplantadas aleatoriamente y de forma individual en pozas experimentales con suelo homogenizado franco arenoso libre de metales plomo y cadmio. Éstas, asimismo, fueron sometidas a tratamientos de 0, 150 y 300 mg/L de cada metal con 4 repeticiones durante 60 días, se recolectaron muestras de suelo, raíz y parte aérea de cada especie vegetal para los análisis correspondientes de plomo y cadmio por espectrofotometría de absorción atómica Perkin Elmer. Los resultados con un nivel de confianza del 95% refieren que en la parte aérea de *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg., en la raíz de *R. sativus* L., y en el suelo donde fueron cultivadas, existe diferencia estadísticamente significativa entre las concentraciones de plomo y cadmio de un tratamiento a otro. Se concluye, por tanto, que en la parte aérea de *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg., y en la raíz de *R. sativus* L., el plomo y el cadmio se bioacumulan con mayor concentración en soluciones de 300 mg/L, lo que demuestra que existe una relación direccional ascendente con las soluciones concentradas de los diferentes tratamientos.

Palabras clave: Bioacumulación, plomo, cadmio.

ABSTRACT

The present research was aimed to determine the lead and cadmium concentration by bioaccumulation in *Brassica oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg. and *Raphanus sativus* L., irrigated with different concentration water for each metal; for which it was worked with 20 plants of *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg. and *R. sativus* L., for 4 days of vegetative growth, they were randomly and individually transplanted in experimental ponds with homogenized sandy soil free of lead and cadmium. These were subjected to treatments of 0, 150 and 300 mg/L b per each metal with 4 repetitions during 60 days. Samples of soil, root and aerial part for each vegetal specie were collected for the corresponding lead and cadmium analysis by atomic absorption spectrophotometry Perkin Elmer. The results with a confidence level of 95 % reported in the aerial part of *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg, the root of *R. sativus* L. and soil, where those were grown, there is statistically significant difference between the concentrations of lead and cadmium from one treatment to another. The present study concludes that in the aerial part of *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg. and at the root of *R. sativus* L., lead and cadmium both bioaccumulate in a major 300 mg/L solution concentration, this confirm there is an upward directional relationship with different treatments concentrated solutions.

Keywords: bioaccumulation, lead, cadmium.

Recibido: 28 mayo de 2014

Aceptado: 25 de junio de 2014

INTRODUCCIÓN

La contaminación del ambiente, es uno de los problemas más evidenciados por la sociedad a nivel mundial y que ocupa un lugar importante en los problemas sociales y políticos, por la progresiva degradación de los recursos naturales causada por los diferentes contaminantes tóxicos orgánicos e inorgánicos presentes en la atmosfera, agua, suelo y subsuelo procedentes de diversas actividades naturales y antropogénicas, lo cual genera un irremediable deterioro del ambiente ¹.

La explosión demográfica y el acelerado proceso de industrialización, realizado por países desarrollados y en vías de desarrollo, ha contribuido seriamente a la contaminación del ambiente por la presencia de metales pesados. Esto provoca un incremento de su concentración en el ambiente y su migración a suelos no contaminados que deterioran la calidad del suelo, del aire y del agua ^{2,3}.

La mayor parte de la contaminación por metales pesados que afecta al ambiente, por consiguiente, ha sido inducida por el hombre a través del empleo de prácticas agrícolas inadecuadas, procesos industriales, explotación minera, fundiciones, aguas residuales, procesos nucleares y manufacturas de gran variedad de productos como baterías, componentes eléctricos, aleaciones de metales, plaguicidas y fertilizantes ^{4,5}. Axiomáticamente, es una de las formas más peligrosas de contaminación en el ambiente, ya que, a diferencia de la mayoría de contaminantes orgánicos, los metales pesados no se degradan ni biológica ni químicamente en la naturaleza, debido a que la mayoría de ellos no tienen funciones metabólicas específicas en los seres vivos, generando alteraciones en la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas ^{6,7,8}.

Metales pesados como el zinc y el hierro, son esenciales para el buen funcionamiento de las células, y otros como el plomo y el cadmio que no son esenciales para los organismos del suelo, plantas, animales y el ser humano, resultan altamente lesivos, por ser contaminantes prioritarios muy tóxicos ^{9,10}.

El plomo, sin embargo, es usado en los procesos industriales y a la vez desechado como producto de residuos y en muchos casos, transportado con las aguas residuales. En estas condiciones suele encontrarse en reacción de equilibrio con otros metales como el cadmio, que también proviene de los procesos industriales ^{11,12}. Estas aguas residuales desempeñan una importante función como sustituto del agua de abastecimiento. La misma es empleada para el riego en la agricultura con el fin de conservar el agua y ofrecer beneficios económicos ¹³. Sin embargo, el uso continuo y discriminado de estas aguas puede conducir a la acumulación excesiva de estos contaminantes en el suelo, el cual se iría deteriorando de forma temporal o definitiva modificando así sus propiedades físicas y químicas ¹⁴.

En el suelo, el plomo y el cadmio pueden quedar retenidos por procesos de adsorción, complejación y precipitación ¹⁵. Teniendo en cuenta que la función más importante del suelo es su productividad -base de supervivencia de los seres humanos- vale rescatar aquí la producción de hortalizas. Ésta tiene especial importancia en el sector agrícola, debido, principalmente, a su valor económico, alimenticio y curativo. Según estudios científicos, estos vegetales son fuente importante de vitaminas, minerales, energía y fibra, por lo que su consumo es muy saludable para la población en general ¹⁶.

El plomo y el cadmio se incorporan a las cadenas tróficas, especialmente, a través de estos cultivos que absorben agua de riego contaminada; en consecuencia, bioacumulan estos metales en diferentes concentraciones, lo cual dependerá de la especie vegetal, y de las características y concentraciones de aquellos en el suelo^{17,6}.

El consumo de hortalizas regadas por aguas contaminadas con plomo y cadmio, produce efectos agudos y crónicos en la salud, como daños en los órganos de los sistemas neurológico, cardiovascular, gastrointestinal, hematológico y reproductivo; o efectos específicos de acumulación en riñones, huesos y pulmones^{18,19,20}.

Brassica oleracea subsp. *capitata* (L.) Metzg. y *Raphanus sativus* L., en consecuencia, son hortalizas producidas y destinadas para el consumo humano de forma cruda o cocida²¹; sin embargo se desconoce las concentraciones reales de plomo y cadmio que se podrían estar ingiriendo al consumir este tipo de alimento.

Nuestro trabajo de investigación tuvo como objetivo determinar la concentración de plomo y cadmio por bioacumulación en *Brassica oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg. y *Raphanus sativus* L., regadas con aguas a diferentes concentraciones de plomo y cadmio.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se adquirieron semillas importadas de los Estados Unidos de América (U.S.A) de *Brassica oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg. y *Raphanus sativus* L. en la empresa agrícola HORTUS S.A "Casa y Jardín" en la Ciudad de Trujillo, Provincia de Trujillo, Región La Libertad.

Las semillas fueron sembradas en germinadores con sustrato de 80 % musgo y 20 % humus y regadas con agua destilada en condiciones de total oscuridad. Posterior a la germinación fueron colocadas en un ambiente de 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad. Catorce días después de la germinación, las plantas que presentaron las primeras 4 hojas verdaderas fueron utilizadas para el trasplante.

Se realizó la preparación del área de experimentación en el campo del Centro de Producción de Cultivo y Crianza de Animales Menores (CEPCAM) de la Universidad Nacional de Trujillo. Allí se adecuó un área plana y nivelada de 40 m² para la construcción de 40 pozas de 0.4 m de lado, 0.3 m de profundidad y 0.4 m de separación entre ellas. Las mismas fueron impermeabilizadas con polietileno, para evitar la difusión del agua y translocación de los metales pesados a utilizarse durante la experimentación. Por otro lado, se colocó dentro de cada poza, suelo homogenizado franco arenoso libre de plomo y cadmio, gracias al accionar de lavados y cernidos sucesivos. Asimismo se realizó un análisis previo, utilizando el método AY-3 - Analysis of Soils and Sediments²² en un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer, a fin de asegurar la confiabilidad de los datos en los análisis químicos.

Para preparar la solución patrón de plomo, se mezcló en una probeta de 2 litros de capacidad 1,598 gramos de Pb(NO₃)₂ con 1 litro de agua destilada para obtener plomo concentrado a 1000 mg/L. Del mismo modo, para preparar la solución patrón de cadmio, se mezcló en una probeta de 2 litros de capacidad 2,744 gramos de Cd(NO₃)₂.4H₂O con 1 litro de agua destilada para obtener cadmio concentrado a 1000 mg/L. Ambas soluciones patrones fueron vertidas

en recipientes de vidrio de capacidad de 2 litros y almacenadas en el laboratorio hasta su posterior dilución para la aplicación de los tratamientos. Para el trasplante y la distribución de las unidades experimentales se eligieron al azar 20 plantas de *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg. y *R. sativus* L., de 14 días de desarrollo vegetativo, las cuales fueron distribuidas aleatoriamente y de forma individual en cada poza con suelo homogenizado franco arenoso libre de metales plomo y cadmio. Cada planta en su respectiva poza, fue considerada como una unidad experimental para los procesos de toma de datos, determinaciones y análisis correspondientes. A partir de las soluciones patrón de plomo y cadmio, se determinó el volumen necesario a diluir para la preparación de cada concentración según el tratamiento, utilizando la fórmula propuesta por Chang y Colledge ²³:

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

Donde:

C_1 : Concentración de la solución patrón C_2 : Concentración a aplicar en el tratamiento

V_1 : Volumen necesario a diluir V_2 : Volumen necesario en el tratamiento

Para cada especie de hortaliza se trabajó con 4 tratamientos, 4 repeticiones y un testigo.

Tratamiento 1 (T_1): Representado por 4 plantas de cada especie, las cuales fueron regadas con agua destilada contaminada artificialmente por plomo a concentración de 100mg/L por 60 días, cada 8 días.

Tratamiento 2 (T_2): Representado por 4 plantas de cada especie, las cuales fueron regadas con agua destilada contaminada artificialmente por plomo a concentración de 300 mg/L por 60 días, cada 8 días.

Tratamiento 3 (T_3): Representado por 4 plantas de cada especie, las cuales fueron regadas con agua destilada contaminada artificialmente por cadmio a concentración de 100 mg/L por 60 días, cada 8 días.

Tratamiento 4 (T_4): Representado por 4 plantas de cada especie, las cuales fueron regadas con agua destilada contaminada artificialmente por cadmio a concentración de 300 mg/L por 60 días, cada 8 días.

Testigo: Representado por 4 plantas de cada especie, las cuales fueron regadas con agua destilada libre de metales contaminantes por 60 días, cada 8 días.

Se realizaron controles de plagas agrícolas propuesto por Cisneros ²⁴; como el control cultural, mecánico, etológico y biológico. Al finalizar los 60 días de tratamiento (Fig. 3) se colectaron muestras de suelo, raíz y parte aérea (tallos y hojas) de cada unidad experimental. Se colectaron, también, 200 gramos de muestra de suelo en bolsas de 1 kg; las muestras de raíz (50 gramos) y parte aérea (100 gramos) fueron colocadas por separadas en sobres de papel y codificadas para su identificación. Luego fueron trasladadas al laboratorio DELTAS S.R.L. y al laboratorio de edafología de TECSUP de la ciudad de Trujillo para los análisis correspondientes. La concentración de plomo y cadmio se determinaron en un equipo de espectrofotometría de absorción atómica Perkin Elmer: AY-3 - Analysis of Soils and Sediments: Total Cations; AY-4 - Analysis of Plant Tissue: Dry Ashing; Standard Atomic Absorption Conditions for Pb y Standard Atomic Absorption Conditions for Cd ²².

Los datos de acumulación de plomo y cadmio, fueron almacenados en tablas y analizados utilizando el programa Statgraphics Plus 5.1 para el análisis estadístico de varianza (ANAVA) con la finalidad de encontrar la diferencia entre tratamientos al 95% de confiabilidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. 1 se aprecia que en la parte aérea de *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg., existió la mayor concentración promedio de plomo y cadmio, cuyos valores según el tratamiento fueron de 118 y 127.75 mg Pb/kg de peso seco y 144 y 180 mg Cd/kg de peso seco. En el suelo la menor concentración de plomo y cadmio, según el tratamiento fueron de 15.5 y 27 mg Pb/kg de peso seco y 11 y 39 mg Cd/kg de peso seco.

En la Fig. 2 se aprecia que en la raíz de *R. sativus* L. existió la mayor concentración promedio de plomo y cadmio, cuyos valores según el tratamiento son de 85.5 y 112 mg Pb/kg de peso seco y 108.75 y 125.5 mg Cd/kg de peso seco. En el suelo la menor concentración de plomo y cadmio, según el tratamiento fueron de 9 y 23 mg Pb/kg de peso seco y 8.75 y 28.5 mg Cd/kg de peso seco.

El análisis de varianza (ANAVA) determinó que en el suelo y en la parte aérea de *B. oleracea* subsp. *Capitata* (L.) Metzg. existió diferencia estadísticamente significativa entre las concentraciones promedio de plomo y cadmio de un tratamiento a otro, con un nivel de confianza del 95% (Tabla 1). En el suelo y en la raíz de *R. sativus* L., existió diferencia estadísticamente significativa entre las concentraciones promedio de plomo y cadmio de un tratamiento a otro, con un nivel de confianza del 95% (Tabla 2).

Las plantas tiene la capacidad de absorber o incluir dentro de sus órganos sustancias o elementos químicos de la naturaleza, de los cuales muchos de ellos son beneficiosos para su subsistencia y otros son perjudiciales para sus procesos fisiológicos como los metales pesados; sin embargo, esta acumulación es en distinto grado, depende de la especie vegetal, de las características y concentración de los metales en el suelo⁸. Las plantas más expuestas, indudablemente, son aquellas que poseen un tallo corto, como es el caso de las hortalizas, las cuales no alcanzan el metro de altura lo que las hace más susceptibles a la absorción de estos metales.

La Fig. 1 muestra que *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg., presentó mayor concentración de plomo y cadmio en la parte aérea que en la raíz cuando fue tratado con soluciones concentradas de 100 y 300 mg/L para cada metal; contrario a ello *R. sativus* L., presentó mayor concentración de plomo y cadmio en la raíz que en la parte aérea cuando fue expuesta a los mismos tratamientos (Fig. 2). Esto concordó con investigaciones realizadas en la agricultura del cono Este de la ciudad de Lima Metropolitana, donde se dio a conocer que el contenido de plomo y cadmio en el suelo es acumulado en mayor concentración en la parte comestible de hortalizas de follaje y en hortalizas de raíces²⁶.

Correspondiente a esto *R. sativus* L., a diferencia de *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg., presenta una especialización extrema de almacenamiento por tener una raíz primaria morfológicamente de reserva, lo cual no deja pasar completamente los iones metálicos a la parte aérea²⁷. Algunos investigadores mencionaron que la concentración de un metal en diferentes órganos de una

planta tiende a ser mayor en la raíz, seguido de las hojas, los tallos, las inflorescencias y las semillas. Tal orden varía según la especie ²⁸.

En algunas plantas el Pb es capaz de acumularse principalmente en las raíces siendo mínima su presencia

en otras partes u órganos de los cultivos ²⁹. Esto se afirmó en la Fig. 2, donde se observó que con T₁ en

R. sativus L. La concentración en la raíz fue de 85.5 mg Pb/kg peso seco y en la parte aérea fue de 43.75 mg

Pb/kg peso seco; con T₂ la concentración en la raíz fue de 112 mg Pb/kg peso seco y en la parte aérea fue de

49.5 mg Pb/kg peso seco. Estos resultados fueron yuxtapuestos por otras investigaciones realizadas en

bioacumulación de metales pesados en *R. sativus*, donde concluyeron que *R. sativus* restringe la mayor

concentración de plomo en la raíz y en menor concentración en la parte aérea ³⁰. La poca preponderancia

para translocar el plomo desde las raíces hasta la parte aérea probablemente se debió a que el movimiento del

metal en la raíz, sea vía apoplasto, de esta manera se acumuló de una forma radial a través de la corteza y alrededor de la endodermis ²⁸.

Estudios realizados en la parte comestible de *Brassica oleracea*, concluyeron que esta especie acumula plomo en mayor concentración en la parte aérea y en menor concentración en la raíz ³⁰. Este axioma concordó con la Fig. 1,

donde se observó que con T₁ en *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg., la concentración en la raíz fue de 39 mg Pb/kg peso seco y en la parte aérea fue

de 118 mg Pb/kg peso seco; con T₂ la concentración en la raíz fue de 44 y en la parte aérea fue de 127.75 mg Pb/kg peso seco. Investigadores mencionaron

que algunas especies podrían poseer un sistema interno muy específico de bombear metales de los tejidos radicales hacia la parte aérea ³¹; como *Brassica*

juncea, *Brassica carinata* y *Brassica campestris*; especies que acumulan plomo en la parte aérea en mayor concentración que en la raíz ^{32,33}.

La concentración de cadmio en la raíz de *R. sativus* L. con T₃ fue de 108.75 mg/kg peso seco y en la parte aérea fue de 61.5 mg/kg peso seco; con T₄ la

concentración en la raíz fue de 125.5 mg/kg peso seco y en la parte aérea fue de 3.25 mg/kg peso seco (Fig. 2). La poca movilidad del metal a través de la

planta fue debido a que se mantiene adherido a la pared celular de las raíces y, en menor cantidad se transporta a las partes aéreas ³⁴. Investigadores

explicaron que especies como *R. sativus* L., no realizan una translocación completa de todos los iones metálicos hacia la parte aérea, debido a que

presentan una raíz tuberosa de reserva, explicando así porque es común encontrarlo en las raíces ²⁶. En contraste, otras investigaciones en *R. sativus*

dieron a conocer que el cadmio puede ser absorbido, translocado y acumulado en las hojas en mayor concentración que en las raíces ⁶. Estas afirmaciones

contradijeron los resultados encontrados en la experimentación.

En la Fig. 1, se observa que *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg., con T₃ acumuló en la raíz 47 mg Cd/kg peso seco y en la parte aérea 144 mg Cd/kg

peso seco; con T₄ acumuló 58.25 mg Cd/kg en la raíz y en la parte aérea 180 mg Cd/kg peso seco. Esta mayor acumulación de cadmio en la parte aérea se

debió a que esta hortaliza podría poseer un sistema interno muy específico para translocar el metal ³¹, como sucede con *B. juncea* L. y *Thlaspi*

caerulescens, que no solo acumulan plomo, también cadmio en la parte aérea en mayor concentración que la raíz ³⁵.

La raíz y parte aérea de *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg. y *R. sativus*, presentó mayor concentración de cadmio que plomo cuando fueron tratadas con soluciones concentradas de 100 y 300 mg/L para cada metal; en contraste con el suelo que presentó mayor concentración de plomo que cadmio con los mismos tratamientos en ambas hortalizas (Fig. 1 y 2). Esto se debería a que el plomo es un metal iónico de mayor peso atómico que el cadmio ²², por lo que su translocación en las plantas y movilidad en el suelo es relativamente baja en comparación con el cadmio ³⁶.

En contraste, la movilidad de un metal no sólo depende de su especiación química, también del pH debido a que en suelos ácidos se produce una competencia entre los iones de hidrógeno (H⁺) y los cationes metálicos por los sitios de intercambio, aumentando su concentración y biodisponibilidad en el suelo, influyendo directamente en la absorción de iones por las raíces. En adverso, un elevado valor de pH provoca que estos iones metálicos queden adsorbidos en las partículas del suelo, disminuyendo así su biodisponibilidad ^{37,38}.

Se encontraron concentraciones de plomo y cadmio menores a 1 mg/kg peso seco en el suelo, raíz y parte aérea de los testigos de *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg. y *R. sativus* L., que fueron tratados con 0 mg/L (Fig. 1 y 2), a pesar que el sustrato fue lavado y cernido varias veces antes de la experimentación. Este método no sosegó la separación total de los metales del suelo ya que presentan una permanencia a largo plazo, por lo que fueron complicados de extraer ^{39,40}. En contraste, otra fuente de contaminación del suelo por estos metales fue el ambiente de la ciudad cercano al área de experimentación, como la disposición de residuos sólidos y el uso de combustibles fósiles como el petróleo del parque automotor que libera plomo y cadmio a la atmósfera en forma de tetraetilo de plomo, tetrametilo de plomo y óxido de cadmio. Estos elementos pueden ser transportados por acción del viento, acumularse en la superficie del suelo y quedar disponibles al consumo de las raíces de los cultivos ^{41,28,42}.

El análisis de varianza mostró que en la raíz de *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg., y la parte aérea de *R. sativus* L., el P-Valor fue mayor a 0.05, por lo tanto no existió una diferencia significativa entre las fuentes de variación de los tratamientos (Tabla 1 y 2). En consecuencia el plomo y cadmio, se acumularon indistintamente en la raíz de *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg. y en la parte aérea de *R. sativus* L.; posiblemente relacionado con la fisiología de cada especie al asimilar los elementos químicos durante la experimentación ⁴³.

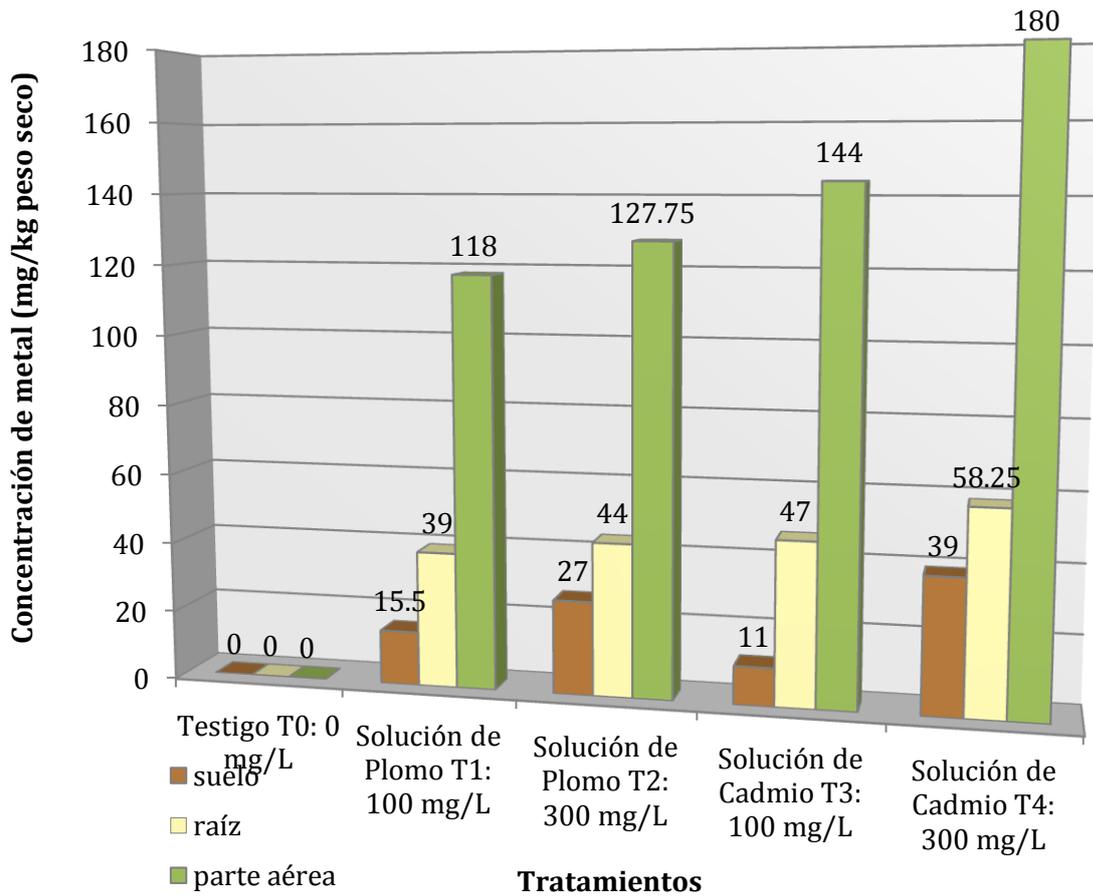


Fig. 1: Concentración promedio de plomo y cadmio (mg/kg peso seco) en suelo, raíz y parte aérea de *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg., expuestas a diferentes tratamientos durante 60 días

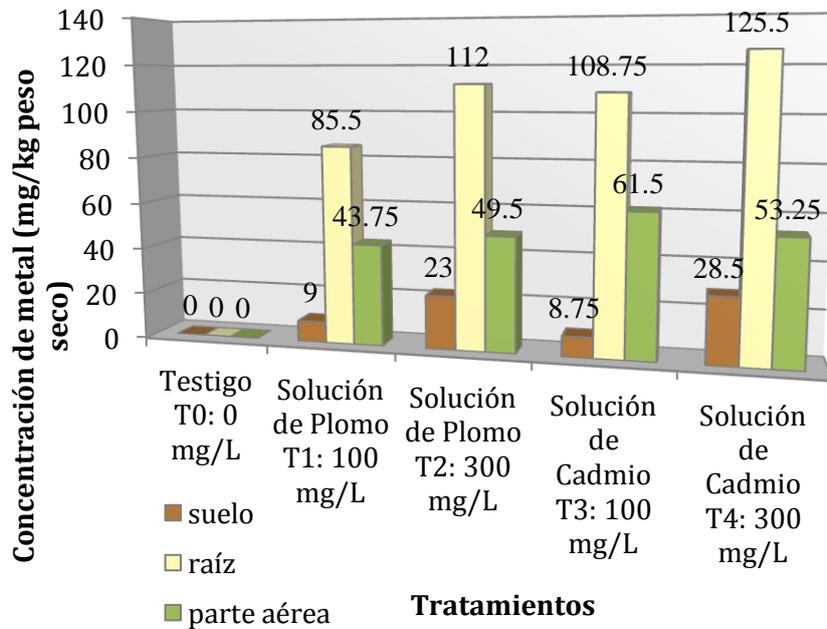


Fig. 2: Concentración promedio de plomo y cadmio (mg/kg peso seco) en suelo, raíz y parte aérea de *R. sativus* L. expuestas a diferentes tratamientos durante 60 días.

Tabla 1: Análisis de Varianza (ANOVA) de la concentración de plomo y cadmio (mg/kg peso seco) en suelo, raíz y parte aérea de *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg. al 95% de confianza.

Parte Evaluada	Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
SUELO	Entre Tratamientos	1888.75	3	629.583	13.61	0.0004*
	Entre Repeticiones	555	12	46.25		
	Total	2443.75	15			
RAÍZ	Entre Tratamientos	798.188	3	266.063	1.65	0.2313
	Entre Repeticiones	1940.75	12	161.729		
	Total	2738.94	15			
PARTE AEREA	Entre Tratamientos	8905.19	3	2968.4	13.26	0.0004*
	Entre Repeticiones	2686.75	12	223.896		
	Total	11591.9	15			

Tabla 2: Análisis de Varianza (ANOVA) de la concentración de plomo y cadmio (mg/kg peso seco) en suelo, raíz y parte aérea de *R. sativus* L. al 95% de confianza.

Parte Evaluada	Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
SUELO	Entre Tratamientos	1199.69	3	399.896	7.69	0.0039*
	Entre Repeticiones	623.75	12	51.9792		
	Total	1823.44	15			
RAÍZ	Entre Tratamientos	3316.19	3	1105.4	7.68	0.004*
	Entre Repeticiones	1726.75	12	143.896		
	Total	5042.94	15			
PARTE AEREA	Entre Tratamientos	664.5	3	221.5	1.92	0.1805
	Entre Repeticiones	1385.5	12	115.458		
	Total	2050	15			

En la parte aérea de *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg., en la raíz de *R. sativus* L., y en el suelo donde fueron cultivadas el P-Valor fue menor a 0.05; se afirmó, así, que existe diferencia estadísticamente significativa entre las concentraciones promedio de los metales de un tratamiento a otro (Tabla 1 y 2). En consecuencia, los diferentes tratamientos de plomo y cadmio influyeron en la acumulación de estos metales en la parte aérea de *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg., y en la raíz de *R. sativus* L., haciendo su propio efecto en las partes de las plantas de manera independiente. Estos resultados fueron sustentados por estudios realizados con cobre y zinc en *R. sativus* y *B. oleracea* donde se concluyó que cada tratamiento del metal ejerce una acción de manera independiente en la raíz y parte aérea, que estaría relacionado con los procesos de absorción en la raíz y el transporte por los vasos conductores

En este sentido, estas significancias demostraron que a medida que aumenta la concentración de plomo y cadmio en las soluciones de los tratamientos, existe mayor disponibilidad de estos metales en el suelo para ser absorbidos, translocados y acumulados en las partes comestibles. Esto interfiere con la translocación de algunos cationes metálicos con comportamiento electroquímico similar, que cumplen funciones fisiológicas importantes como el hierro, cuya deficiencia en la translocación de las raíces hacia las hojas originó una baja actividad fotosintética por la disminución en la producción de clorofila, que se manifestó con síntomas de clorosis foliar (Fig. 4) en estas especies hortícolas^{41, 45,46}. Investigaciones relevantes desde el punto de vista ambiental, refieren que los diferentes metales presentan diversas dinámicas de procesamiento de acuerdo al tipo de suelo al cual se incorporan y la especie vegetal existente en el medio³⁰.

En hortalizas de hoja el contenido máximo permitido de plomo y cadmio es 0.3 y 0.2 kg/peso fresco, respectivamente; y en hortalizas de raíz el contenido máximo permitido de plomo y cadmio es 0.1 y 0.05 kg/peso fresco, respectivamente. En contraste, los resultados encontrados expresan un alto valor numérico en la concentración de los metales por estar expresados en kg/peso seco; en consecuencia no se puede inducir que las concentraciones de plomo y cadmio encontradas en la parte comestible de *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg. y *R. sativus* L superan los contenidos máximos permitidos establecidos por la Unión Europea⁴⁷.

Las concentraciones de metales pesados en el suelo y las absorbidas por los cultivos destinados al consumo humano como *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg. y *R. sativus* L., son una de las principales materias en contaminación ambiental y degradación de los recursos naturales que deben tomarse en cuenta en la investigación científica para el desarrollo social, económico y sostenible del país. Por consiguiente, el mantenimiento de las funciones ecológicas y agrícolas del suelo es una responsabilidad de toda la humanidad⁴⁸. Los axiomas encontrados en la presente investigación, compromete a seguir con los estudios de bioacumulación con el fin de dilucidar cuál es el mecanismo de translocación y concentración tóxica de cada metal en las especies hortícolas, así como sus posibles efectos colaterales en el ambiente y en la salud.

CONCLUSIONES

La parte aérea de *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg., presentó la mayor concentración de plomo y cadmio de 127.75 y 180 mg/kg peso seco respectivamente, en tratamientos con soluciones de 300 mg/L de cada metal.

La raíz de *R. sativus* L., presentó la mayor concentración de plomo y cadmio de 112 y 125.5 mg/kg peso seco respectivamente, en tratamientos con soluciones de 300 mg/L de cada metal.

En *B. oleracea* subsp. *capitata* (L.) Metzg. y *R. sativus* L., la concentración de plomo y cadmio tuvo relación direccional ascendente con las soluciones concentradas de los diferentes tratamientos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Pineda R. Presencia de hongos micorrízicos arbusculares y contribución de *Glomus intraradices* en la absorción y translocación de cinc y cobre en girasol

- Helianthus annuus* L. crecido en un suelo contaminado con residuos de mina. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias en el área de Biotecnología. Universidad de Colima. Tecomán, Colima. 135p. 2004
2. Chico J, De Chico L, Rodríguez M, Guerrero M. Capacidad remediadora de la raíz de girasol, *Helianthus annuus*, cuando es sometida a diferentes concentraciones de plomo. REBIOL. Trujillo, Perú; 32(2): 13-19. 2012.
 3. García L. Capacidad remediadora y bioacumuladora de los órganos de *Helianthus annuus* L. "girasol" cuando son sometidas a diferentes concentraciones de plomo. Tesis para optar el grado de Maestro en Ciencias mención en Biotecnología Agroindustrial y Ambiental. Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo, Perú. 39p. 2009.
 4. Rojas C. Efecto de la interacción hongo- *Dodonaea viscosa* L. Jacq en la fitorremediación de plomo en un sistema *in vitro*. Tesis para obtener el grado de maestro en Biotecnología. Universidad Autónoma Metropolitana. México D.F., México. 50p. 2010.
 5. Méndez T, Rodríguez L, Palacios S. Impacto del Riego con Aguas Contaminadas Conteniendo Metales Pesados. Terra. México; 18(4): 277-288. 2000.
 6. Prieto J, González C, Román A, Prieto F. Contaminación y Fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. Tropical and Subtropical Agroecosystems. Hidalgo, México; 10(1): 29-44. 2009.
 7. Valdés F, Cabrera V. La Contaminación por Metales Pesados en Torreón, Coahuila, México. Primera edición. 2-11p. Disponible en: [<http://www.texascenter.org/tcps/btep/breports.htm>]. 1999
 8. Roncal C. Identificación de Bioindicadores vegetales de la contaminación por plomo y cobre, en suelos de las pozas de tratamiento de relave minero en la microcuenca del sector Samne. Tesis para obtener el título de Biólogo. Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo, Perú. 40p. 2008.
 9. Monserrat V. Evaluación de los Mecanismos de Adsorción y Acumulación Intracelular de Plomo (Pb²⁺), en Sistemas Continuos de Fitorremediación con *Salvinia minima*. Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, Veracruz, México. 3p. 2009.
 10. Galán E, Romero A. Contaminación del Suelo por Metales Pesados. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola. Facultad de Química. Universidad de Sevilla. Revista De La Sociedad Española De Mineralogía. Macla; 10: 48-60. 2008.
 11. Huaranga F. Toxicidad letal del cobre, zinc y hierro en *Poecilia reticulata* (Peters, 1859) a diferentes tiempos de exposición. REBIOL. Trujillo, Perú; 24(1-2): 13-22. 2004.
 12. Ramírez A. Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. Anales de la Facultad de Medicina. Lima, Perú; 63(1): 51-64. 2002.
 13. Guerrero A, Florián J. Calidad de agua del efluente final de la planta de tratamiento de aguas residuales Covicorti, Trujillo, Perú. SCIÉENDO. Trujillo, Perú; 12(2): 7-26. 2009.
 14. Acosta M. Determinación de metales pesados en suelos agrícolas del Valle del Mezquital, HGO. Tesis para optar el título de Licenciado en Biología. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Hidalgo, México. 1-9p. 2007.
 15. Lora R, Bonilla H. Remediación de un suelo de la Cuenca alta del Rio Bogotá Contaminado con los Metales Pesados Cadmio y Cromo. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica. Bogotá, Colombia; 13 (2): 61-70. 2010.
 16. Torres S. Valoración agronómica en dos variedades de mostaza (*Brassica juncea*), pepino (*Cucumis sativus*) y rábano (*Raphanus sativus* L.). Tesis para obtener el

- grado de Licenciatura en Ciencias Agrícolas y el Título de Ingeniero Agrónomo. Universidad EARTH. Guácimo, Limón, Costa Rica. 37p. 2007.
17. Miranda D, Carranza C, Rojas C, Jerez C, Fischer G, Zurita J. Acumulación de metales pesados en suelo y plantas de cuatro cultivos hortícolas, regados con agua del río Bogotá. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. Colombia; (2): 180-191. 2008.
 18. Pérez P, Azcona M. Azcona. Los efectos del cadmio en la salud. España. *Rev Esp Méd Quir*; 17(3): 199-205. 2012.
 19. Nava-Ruiz C, Méndez-Armenta M. Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Arch Neurocién*. México; 16(3): 140-147. 2011.
 20. González J, Alfaro G, Arriagada M, Castillo C, Muñoz V, Espina J, Aranda W. Exposición ocupacional a plomo y cadmio en personal de salud. *Rev Chil Salud Pública*. Chile; 10 (3): 139-145. 2006.
 21. Ministerio de Agricultura. Producción Hortofrutícola 2010. OEEE. Lima, Perú. 8-12p. 2011.
 22. Perkin E. *Analytical Methods for Atomic Absorption Spectroscopy*. USA. 63, 96, 134 y 136p. Disponible en: [www.perkinelmer.com/atomicspectroscopy]. 1996.
 23. Chang R, College W. *Química*. Séptima edición. McGraw-Hill. Colombia. 132p. 2002.
 24. Cisneros F. *Control de Plagas Agrícolas*. Segunda edición. COPYRIGHT. Lima, Perú. 81, 91, 104 y 249p. 1995.
 25. Prieto M. *Determinación de Metales Pesados en Hortalizas distribuidas en Plazas de Mercado, Centros de Abasto e Hipermercados de la Ciudad de Bogotá D.C.* Tesis presentado como requisito parcial para optar por el título de Master en Gerencia de Programas Sanitarios en Inocuidad de Alimentos. Universidad para la Cooperación Internacional. San José, Costa Rica. 103p. 2011.
 26. Juárez, H. *Contaminación del Río Rímac por Metales Pesados y Efecto en la Agricultura en el Cono Este de Lima Metropolitana*. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales. Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima, Perú. 72p. 2006.
 27. Audesirk T, Audesirk G, Byers B. *Biología: La Vida en La Tierra*. PRENTICE HALL. Sexta edición. México. 489p. 2003
 28. Núñez J. *Bioacumulación de plomo en *Amaranthus caudatus* L. "Kiwicha" en condiciones de laboratorio*. Tesis para optar el título de Biólogo. Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo, Perú. 40p. 2005.
 29. Kabata-Pendias A. *Trace Elements in Soils and Plants*. Fourth edition. CRC Press. Taylor and Francis Group. USA. 338-352p. 2011.
 30. Casana M. *Concentración de los metales cobre, plomo, hierro y zinc, en la parte comestible de *Lactuca sativa*, *Daucus carota*, *Brassica oleracea* y *Raphanus sativus**. Tesis para optar el grado de Maestro en Ciencias mención en Ecología y Desarrollo Sustentable. Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo, Perú. 33p. 2004.
 31. Brown S, Chaney R, Angle J, Baker A. *Phytoremediation Potential of *Thlaspi caerulescens* and Bladder Champion for Zinc and Cadmium Contaminated Soil*. *J. Environ. Qual.* UK. 23: 1151-1157. 1994.
 32. Del Río M, Font A, De Haro A. *Uso de especies cultivadas de Brassica para la fitorremediación de suelos contaminados en Aznalcóllar*. Conferencia Internacional de Estadística en asuntos Ambientales. Libro de Actas. Universidad de Cádiz. Cordoba, España: 37-40p. 2001.
 33. Rodríguez J, Rodríguez H, De Lira G, Martínez J, Lara J. *Capacity of six plant species to accumulate lead in contaminated soils*. *Rev. Fitotec*; México. 29(3): 239-245. 2006.
 34. Barboza H. *Evaluación de la capacidad acumuladora de *Eichhornia crassipes* usando diferentes concentraciones de cadmio en condiciones de laboratorio*. Tesis

- para obtener el título profesional de Biólogo. Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo, Perú. 50p. 2012.
35. Pence N, Larsen P, Ebbs S, Letham D, Lasat M, Garvin D, Eide D, Kochian L. The molecular physiology of heavy metal transport in the Zn/Cd hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. PNAS. USA; 97(9): 4956-4960. 2000.
 36. García L. 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. 2008.
 37. Cuahutémoc C. Efecto de la interacción hongo – *Dodonaea viscosa* L. Jacq en la fitorremediación de plomo en un sistema *in vitro*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Biotecnología. Universidad Autónoma Metropolitana. México. 5-25p. 2010.
 38. Hernández M. Estudio de la acumulación de plomo y cadmio por *Asphodelus fistulosus* L. y *Brassica juncea* L. para fitorremediar jales. Tesis para obtener el grado de Maestría en Biotecnología. Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa. México. 8-28p. 2009.
 39. Becerril J, Barrutia O, García J, Hernández A, Olano J, Garbisu C. Especies Nativas de Suelos Contaminados por Metales: Aspectos Ecofisiológicos y su Uso en Fitorremediación. Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente. México; 16(2): 1-6. 2007.
 40. Sangabriel W, Ferrera R, Trejo D, Remedios M, López M, Cruz J, López C, Delgadillo J, Alarcón A. Tolerancia y Capacidad de Fitorremediación de Combustóleo en el Suelo por Seis Especies Vegetales. Revista Internacional de Contaminación Ambiental; México 22(2): 63-73. 2006.
 41. Beltrán M. Fitoextracción en suelos contaminados con cadmio y zinc usando especies vegetales comestibles. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ciencias e Ingeniería Ambientales. Universidad Autónoma Metropolitana. México. 145p. 2001.
 42. Puga S, Sosa M, Lebgue T, Quintana Q, Campos A. Contaminación por Metales Pesados en Suelo provocada por La Industria Minera. Ecología Aplicada, Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú; 5 (1,2): 149-155. 2006.
 43. Azcón-Bieto J, Talón M. Fundamentos de Fisiología Vegetal. McGraw-Hill. Barcelona, España. 83-99p. 2000.
 44. Guevara L. Influencia del cobre y zinc en la germinación de semillas *Brassica oleracea*, *Raphanus sativus* y *Daucus carota* en condiciones de laboratorio. Tesis para optar el título de Biólogo. Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo, Perú. 49p. 2012.
 45. Salas F. Selección *in vitro* de Plantas Tolerantes a Plomo para su Uso en Fitorremediación. Tesis para obtener el grado de especialista en Biotecnología. Universidad Autónoma Metropolitana. México. 37p. 2007.
 46. De La Cruz N. Especies de leguminosas como fitorremediadoras en suelos contaminados. Tesis presentada como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ciencias. Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas. México. 145p. 2010.
 47. Unión Europea. Contenido máximo de determinantes contaminantes en los productos alimenticios. Reglamento CE 1881/2006 de la Comisión. Diario Oficial de la Unión Europea 20.12.2006, L364/5 - L364/24. 2006.
 48. Durán P. 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 de Barcelona. Barcelona, España. 20p. 2010.