



Acumulación y distribución de cadmio en plantas de alcachofa (*Cynara scolymus* L.) cultivada en dos suelos agrícolas contaminados

Cadmium accumulation and distribution in artichoke plants (*Cynara scolymus* L.) grown in two contaminated agricultural soils

Levi Acevedo Villazana¹; Heizel S. Chacon Llanos¹; Valeria Meneses Cassani¹; Andrés A. Azabache Leyton^{1,*};

*Autor correspondiente: azabache@continental.edu.pe (A. A. Azabache Leyton).

ID ORCID de los autores

L. Acevedo Villazana:  <http://orcid.org/0000-0001-8834-151X>

H. S. Chacón Llanos:  <http://orcid.org/0000-0002-7113-7018>

V. Meneses Cassani:  <http://orcid.org/0000-0002-9601-2844>

A. A. Azabache Leyton:  <http://orcid.org/0000-0003-1128-3678>

RESUMEN

La contaminación de los suelos agrícolas, contribuye a la absorción de metales pesados por los cultivos y estos contaminantes ingresan a la cadena alimenticia, incrementando el riesgo de toxicidad en los organismos. El objetivo fue evaluar la concentración de cadmio (Cd) en plantas de alcachofa en los distritos de Mito y Nueve de Julio, de la provincia de Concepción, departamento de Junín. Se recogieron 10 muestras, en forma sistemática, de frutos, hojas y tallos de alcachofa; una muestra compuesta de suelo, y una muestra de agua de riego. El contenido de Cd en los suelos y el agua de riego, superaron el Estándar de Calidad Ambiental (ECA). La concentración de Cd (mg kg^{-1}) en 9 de Julio, fue: $0,100 \pm 0,052$ en fruto; $0,647 \pm 0,117$ en hoja; y $0,035 \pm 0,020$ en tallo; en Mito: $0,164 \pm 0,050$ en fruto; $0,719 \pm 0,201$ en hoja; y $0,142 \pm 0,061$ en tallo. Los valores de Cd en hojas superaron el límite permisible, de $0,20 \text{ mg kg}^{-1}$ establecido para hortalizas, pero no en tallos y frutos. Se concluyó que la concentración de Cd en alcachofa tuvo el siguiente orden: hoja > tallo > fruto, mayor en Mito que en 9 de Julio.

Palabras clave: *Cynara scolymus* L.; cadmio; contaminación; suelo agrícola; Estándar de Calidad Ambiental.

ABSTRACT

The contamination of agricultural soils contributes to the absorption of heavy metals by crops and these pollutants enter the food chain, increasing the risk of toxicity in organisms. The objective was to evaluate the concentration of cadmium (Cd) in artichoke plants in the districts of Mito and 9 de Julio, in the province of Concepción, department of Junín. 10 samples were collected, systematically, of artichoke fruits, leaves and stems; a composite sample of soil, and a sample of irrigation water. The Cd content in soils and irrigation water exceeded the Environmental Quality Standard (ECA). The concentration of Cd (mg kg^{-1}) on July 9, was: 0.100 ± 0.052 in fruit; 0.647 ± 0.117 in sheet; and 0.035 ± 0.020 in stem; in Mito: 0.164 ± 0.050 in fruit; 0.719 ± 0.201 in sheet; and 0.142 ± 0.061 in stem. The Cd values in leaves exceeded the permissible limit of 0.20 mg kg^{-1} established for vegetables, but not in stems and fruits. It was concluded that the concentration of Cd in artichoke had the following order: leaf > stem > fruit, higher in Mito than in July 9.

Keywords: *Cynara scolymus* L.; cadmium; contamination; agricultural soil; Environmental Quality Standard.

Recibido: 20-09-2021.

Aceptado: 28-11-2021.



Esta obra está publicada bajo la licencia [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUCCIÓN

El Perú, caracterizado por su déficit de agua para la producción agrícola, tiene áreas irrigadas con agua contaminada por elementos potencialmente tóxicos que a largo plazo favorecen la absorción por los cultivos alimenticios (Custodio et al., 2020). El cultivo de alcachofa (*Cynara scolymus* L.), utilizado para la alimentación, por su alta calidad nutritiva, en la provincia de Concepción, departamento de Junín, utiliza las aguas del río Mantaro para irrigar los campos de cultivo, como en los distritos como Huaychulo y Mito, debido a las condiciones favorables de clima para su desarrollo. La contaminación del río Mantaro con metales pesados y metaloides debido a las actividades industriales, principalmente la minería, ha restringido su uso para el consumo humano (MINEM, 2009).

Antes de revelar sus síntomas de contaminación, Concepción era el principal productor de alcachofas de Junín. Varios años después, florece solo lo que sobrevive a la toxicidad del río Mantaro, un río que discurre sus aguas desde La Oroya, una de las 10 ciudades más contaminadas del mundo. Progresivamente, por la alta concentración de plomo, cadmio, arsénico, zinc y cobre en el agua, se está afectando a los productores agrarios (Diario Correo, 2010).

La contaminación del cultivo de alcachofa por ciertas especies metálicas, como el cadmio, debido a la absorción desde el suelo o desde el agua de riego, es una preocupación creciente a nivel mundial, debido a la presencia de estas especies en la cadena alimenticia (Machado, 2016).

La absorción de elementos del suelo por los cultivos es reportada en diferentes lugares del mundo. Machado (2016) reportó la concentración de Cd en hojas y frutos de alcachofa de cultivo comercial, en cuatro localidades de Uruguay, con promedios de 0,11 y 0,09 mg kg⁻¹, respectivamente, cumpliendo con los valores de 0,3 mg kg⁻¹ Cd establecidos por el reglamento de MERCOSUR. Lizarazo et al. (2020) evaluaron en Sibapé, Colombia, la contaminación de metales pesados en alcachofa, reportando para cadmio: 0,08; 0,16; 0,18; y 0,22 mg kg⁻¹ en flores, raíces, tallos y hojas, respectivamente. El factor de transferencia para Cd, del suelo a la planta, fue de 78%.

Asimismo, Karimi et al. (2019) encontraron que *Cynara scolymus* L. acumuló más cadmio en tallos que en raíces en un ensayo hidropónico. El factor de bioacumulación fue de 0,52; 1,08 y 2,10 con dosis de 10, 50 y 500 µM de Cd.

La contaminación por metales pesados en hortalizas no puede ser subestimada, en la medida que estos vegetales son componentes importantes de la dieta humana. Son ricas en vitaminas, minerales, y fibras, y también tiene efectos antioxidantes benéficos (Ali & Al-Qahtani, 2012). Las tierras agrícolas adyacentes a actividades industriales son vulnerables debido al riesgo de la presencia de elementos traza que están siendo acumulados en los cultivos y subsecuentemente en los humanos (Antoniadis et al., 2019).

Kharazi et al. (2021), al evaluar la concentración de metales en suelos de uso agrícola, agua y cultivos de Irán, concluyó que el riego con aguas residuales, a largo plazo incrementa los metales pesados en el suelo, y la probabilidad de transferencia a los cultivos.

Estos metales tienen efectos perjudiciales sobre la producción agrícola, disminuyendo el rendimiento y la calidad de los cultivos, cuando sus concentraciones alcanzan niveles tóxicos (White & Pongrac, 2017).

El cadmio ha recibido bastante atención en los últimos años, debido a su importancia en la calidad alimenticia, y salud humana. El consumo de alimentos con alto contenido de Cd produce disfunción renal, alteración del metabolismo del calcio, y defectos en los sistemas reproductivos y respiratorios (WHO, 2010).

Gan et al. (2017) investigaron la concentración de cadmio (Cd), y otros contaminantes en cultivos, suelo y agua de riego, en 36 lugares al sur de China, concluyendo que las hojas y raíces de las plantas tuvieron mayor concentración que los frutos.

Gruszecka-Kosowska (2019) investigó ocho grupos de plantas cultivadas en el sur de Polonia, encontrando el siguiente orden de elementos: Zn > Cu > No > Cd > Pb > Sb > Hg > Tl > As > Co. Las concentraciones en los grupos de plantas disminuyeron así: hojas > raíces > tubérculos > leguminosas > inflorescencias > semillas > tallos > frutos. Los factores de transferencia suelo-planta revelaron que las plantas de hoja tienen la más alta capacidad de absorber Cd, Hg, Tl y Zn (p. 7).

El factor de bioacumulación (FBC) está definido como la relación de la cantidad de metal en la planta (raíz, tallo u hoja) a la cantidad en el suelo (mg.kg⁻¹ peso seco), quedando expresado así: $FBC = \frac{C_{\text{parte aérea de planta}}}{C_{\text{suelo}}}$ (Bi et al., 2018).

El FBC indica el potencial de absorción de un metal pesado desde el suelo a las partes comestibles de las plantas (Li et al., 2012).

Los factores que afectan la acumulación de contaminantes del suelo en la planta incluyen: especie de planta, tasa de transpiración y translocación, pH, temperatura, textura, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica, concentración de elementos traza, fuente y forma del metal (Gupta et al., 2019). Cada uno de estos factores influye en la absorción de Cd por la planta de alcachofa.

La magnitud de la absorción de metales del ambiente a través del consumo de hortalizas depende de los parámetros: tipo de suelo, clima, deposición atmosférica y la naturaleza de los productos hortícolas (Ghasemidehkordi et al., 2018).

La cantidad de cadmio que la planta de alcachofa absorbe y acumula en sus diversos órganos, probablemente proviene del suelo contaminado y del agua de riego utilizada; pero no se tiene datos precisos de la cantidad absorbida de este metal pesado y su distribución en la planta, que se cultiva en los distritos de Nueve de Julio y Mito, conside-

rando la importancia del consumo de alcachofa, en esta zona, por su calidad nutritiva, es necesario evaluar los campos de producción de esta especie, para estimar la distribución de la cantidad de este metal pesado, acumulada en la planta.

El objetivo del presente trabajo de investigación fue evaluar la concentración de cadmio y el factor de bioacumulación en los órganos de la planta de alcachofa, en los distritos de Nueve de Julio y Mito, provincia de Concepción.

MATERIAL Y MÉTODOS

Lugar de estudio

La investigación se realizó en los distritos de Mito y Nueve de Julio, provincia de Concepción. El área de estudio en Nueve de Julio fue de 5348,6 m². La parcela de Mito tuvo una superficie de 2496,3 m². Los puntos de ubicación del recojo de las muestras de agua fueron para Nueve de Julio y Mito; 467342 Este, 8685751 Norte; 462942 Este 8680814 Norte, respectivamente. El agua de riego para la parcela del distrito de Mito proviene del río Mantaro y para la parcela de distrito de Nueve de Julio proviene del río Chía, que se inicia en la laguna Pomacocha.

Colección de muestra

El muestreo de suelo fue sistemático, para lo cual se hizo uso de una pala, que sirvió para el recojo de las muestras a una profundidad de 30 cm, un costalillo donde se realizó la homogenización de las muestras para conseguir una muestra compuesta. La muestra fue colocada en una bolsa tipo ziploc para su envío al laboratorio y ser analizada en Cd. El muestreo se realizó de acuerdo a la Guía para Muestreo de Suelos del Ministerio del Ambiente (MINAM, 2014). El muestreo de agua se realizó de acuerdo al Protocolo de monitoreo de recursos hídricos superficiales (ANA, 2016); se hizo uso de envases de plástico de boca ancha con cierre hermético, esto para analizar el metal pesado cadmio; para la toma de muestra se procedió a abrir el envase y sumergirlo a 20 cm de profundidad de la superficie del canal de riego y seguidamente se preservó la muestra por 24 horas y se envió al laboratorio. El muestreo de *Cynara scolymus* L. fue no probabilístico en cada localidad, a criterio del investigador, eligiendo diez plantas en producción, para obtener muestras de tallo, hoja y

fruto. Luego, las muestras fueron colocadas en bolsas tipo ziploc, debidamente identificadas y selladas para su envío al laboratorio y el análisis de cadmio.

Métodos

El método de investigación general fue hipotético deductivo, el método específico fue de análisis, para determinar el contenido de Cd, el tipo de la investigación fue aplicada, el diseño no experimental – transversal y el nivel de investigación fue explicativo.

Factor de Bioacumulación (FBC)

El FBC fue calculado para hoja (H), tallo (T) y fruto (F), mediante la siguiente expresión $FBC = (Cd_{planta} / Cd_{suelo})$ (Bi et al., 2018)

La concentración de Cd en suelo y las partes de la planta se expresó en mg kg⁻¹ de peso seco.

Análisis estadístico

Los datos son presentados como promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de cadmio en las muestras de las dos localidades. Se utilizó el análisis de variancia para comparar la concentración de Cd entre los grupos de muestras. Previamente, se examinó la distribución normal de los datos por la prueba de Shapiro-Wilk, a un nivel de significación de $p > 0,05$. Un p -valor $< 0,05$ fue considerado estadísticamente significativo. Para los datos distribuidos normalmente se usó el análisis de variancia y la prueba de Duncan. Para los datos que no tuvieron distribución normal se usó la prueba de Kruskal-Wallis. Los datos fueron procesados mediante el software INFOSAT.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentración de cadmio

Los contenidos de Cd en *Cynara Scolymus* L., tuvieron el siguiente orden en ambas localidades: hoja > fruto > tallo, indicando que la absorción del metal se concentra en las hojas. En el distrito de Nueve de Julio, la concentración en hojas superó significativamente a la de tallos y frutos. En Mito, no se observó significación estadística en los tres órganos evaluados. Los datos evaluados presentan alta variabilidad, evidenciado por el alto valor del coeficiente de variación ($> 18\%$), siendo el más bajo, para las muestras de hoja en Nueve de Julio ($< 18\%$) (Tabla 1).

Estos resultados son diferentes a lo reportado por Karimi et al. (2019), quienes, en un ensayo hidropónico, observaron mayor acumulación de Cd en tallos de *Cynara scolymus* L. Asimismo, los datos

de esta evaluación, son superiores a los reportados por Lizarazo et al. (2020) y Machado (2016), indicando una alta traslocación del Cd absorbido hacia las hojas, y alta contaminación del cultivo de alcachofa en los distritos de Nueve de Julio y Mito.

Tabla 1

Acumulación de cadmio en los órganos de *Cynara scolymus* L. (mg kg⁻¹)

Distrito	Órgano	Media (mg kg ⁻¹)	S	CV (%)
Nueve de Julio	Hoja	0,647 a	0,117	18,011
	Tallo	0,035 b	0,020	55,940
	Fruto	0,100 b	0,052	51,640
Mito	Hoja	0,719 a	0,201	27,989
	Tallo	0,142 a	0,061	42,617
	Fruto	0,164 a	0,050	30,583

En Mito se observó mayor concentración de Cd en hojas, tallos y frutos de *Cynara scolymus* L. en el distrito Nueve de Julio (Tabla 2). Se atribuye mayor concentración de Cd en suelo y agua en Mito (suelo = 3,62 mg kg⁻¹, agua = 0,025 mg L⁻¹), que en Nueve de Julio (suelo = 2,20 mg kg⁻¹, agua = 0,023 mg L⁻¹). El factor de enriquecimiento del suelo (Cd suelo/Cd ECA) fue de 2,58 y 1,57 para Mito y Nueve de Julio, respectivamente. Los resultados superan los parámetros de calidad ambiental del ECA para agua de riego. Estos datos indican contaminación de ambos recursos. A largo plazo, alta concentración de Cd en el agua de riego del río Mantaro incrementará la cantidad de Cd absorbido por Alcachofa (Custodio et al., 2020; MINAM, 2019).

Tabla 2

Concentración de cadmio en suelo y agua, de las localidades de Nueve de Julio y Mito

Localidad/LMP	Cd (mg kg ⁻¹) en suelo	Cd (mg L ⁻¹) en agua de riego
Nueve de Julio	2,20	0,023
Mito	3,62	0,025
Límite máximo permisible (ECA)	1,40	0,010

La presencia de Cd en cultivos como la alcachofa causa un incremento potencial en la cantidad absorbida por humanos y animales, pues son alimentos de consumo cotidiano, que se incorporan a la cadena alimenticia, y se acumulan en los organismos (Antoniadis et al., 2019).

La concentración de Cd en hojas de *Cynara scolymus* L. superó los límites permisibles establecidos internacionalmente, de 0,2 mg kg⁻¹ para hortalizas de hoja (FAO/WHO, 2019), como se observa en la Figura 1, pero en tallos y frutos no se superó el límite permisible para hortalizas. La presencia de este metal pesado en plantas de alcachofa se acumulará en los canales alimenticios (Pan et al., 2016). En este caso, el suelo, por su alta concentración de Cd en ambas localidades es el principal factor responsable de la acumulación de este contaminante en plantas de alcachofa. Como reportan Yadav et al. (2018), los factores que dan como resultado la movilización de metales pesados en el suelo, incluyen la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el contenido de arcilla, el contenido de materia orgánica, entre otras propiedades, que hacen que los suelos sesa diferentes en su manejo y control de la contaminación.

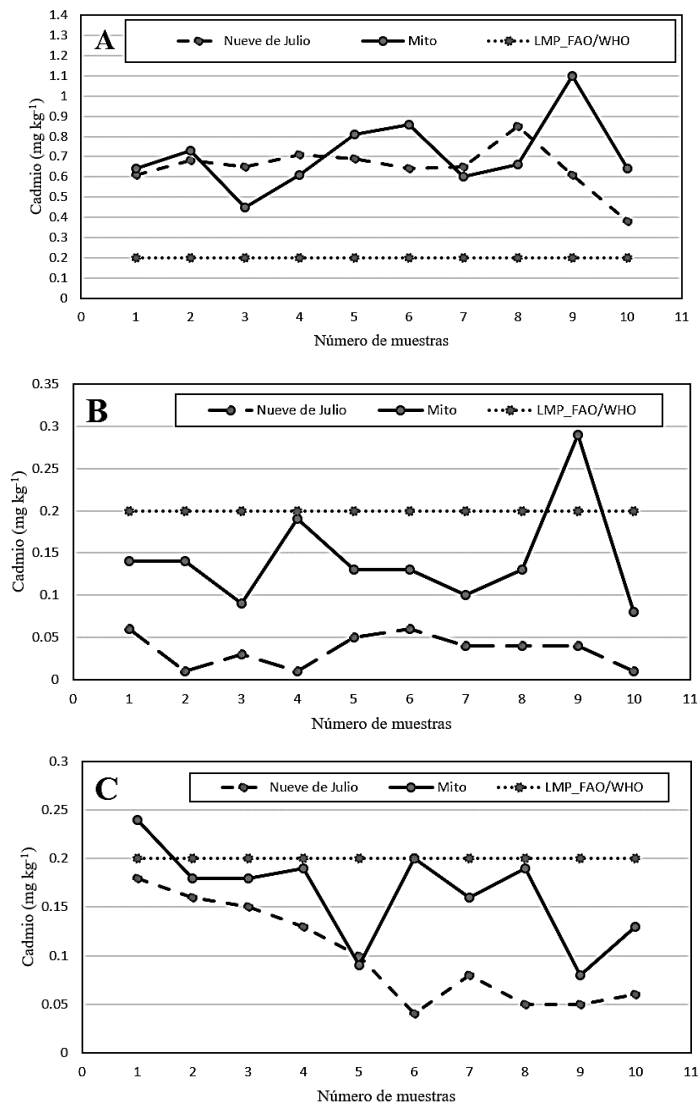


Figura 1. Cadmio total (mg kg⁻¹) en muestras de hojas (A), tallos (B) y frutos (C) de alcachofa (*Cynara scolymus* L.) en dos localidades y comparadas al límite máximo de 0,20 mg kg⁻¹ (FAO/WHO, 2019).

Factor de bioacumulación

El diagrama de caja y bigotes (Figura 2), muestra que el FBC, que relacionan la concentración del metal pesado en los órganos de *Cynara scolymus* L., respecto a la concentración en el suelo (Bi et al., 2018), fueron mayores para hoja, seguido de frutos y finalmente los tallos, siendo significativamente mayor en hojas y tallos en Mito, que en Nueve de Julio. En frutos no hubo diferencias significativas entre ambas localidades.

La concentración de metales pesados en los órganos de la planta, afectan a la planta de alcachofa, debido, a que elementos como el Cd no es

un elemento esencial y cuando se concentra en la planta, interfieren en la absorción y transporte de otros elementos esenciales, alterando el sistema de transferencia de electrones, fotosíntesis, respiración, actividad enzimática, crecimiento y reproducción (Xu & Shi, 2000).

El FBC es inferior a la unidad en los tres órganos evaluados de *Cynara scolymus* L., indicando que esta especie no es bioacumuladora; pues cuando este valor es superior a la unidad indica alta capacidad de la planta para absorber metales del suelo agrícola (Bi et al., 2018).

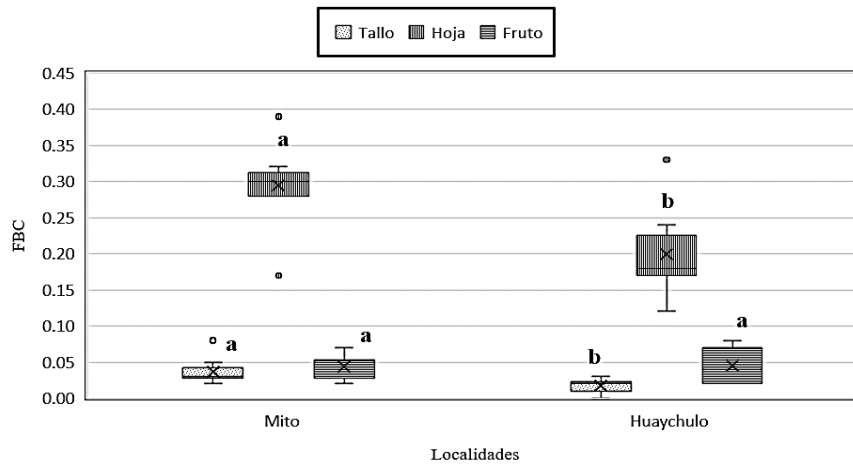


Figura 2. Cajas y bigotes del factor de bioacumulación de cadmio total en alcachofa (*Cynara scolymus* L.) en Nueve de Julio (n = 10), y Mito (n = 10). (Línea = media, caja = percentil 25 y 75). Letras diferentes indican diferencias significativas (p < 0,05).

CONCLUSIONES

La concentración de Cd y el factor de bioconcentración en *Cynara scolymus* L tuvo el siguiente orden: hoja > fruto > tallo. Los valores en hoja superaron los límites permisibles para hortalizas, mas no los frutos y tallos. La cantidad de este metal pesado en la planta, fue mayor en Mito que en Nueve de Julio, atribuible a la mayor concentración en el suelo y en el agua, al comparar ambas localidades. Los suelos de Mito y Nueve de

Julio superaron los valores permisibles establecidos por el ECA del Perú. El agua de riego superó el límite permisible del ECA. El factor de bioacumulación fue inferior a la unidad, revelando que *Cynara scolymus* L. no es una planta bioacumuladora. Se recomienda descontaminar los suelos de ambos distritos para disminuir la absorción de Cd por alcachofa y el riesgo potencial de toxicidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ali, M.; & Al-Qahrani, K. (2012). Assessment of some heavy metals in vegetables, cereals and fruits in Saudi Arabian markets. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 38, 31-37.
- ANA (2016). Protocolo Nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos Superficiales. Autoridad Nacional del Agua. Resolución Jefatural N° 010-2016-ANA. (pp. 63-65).
- Antoniadis, V., Golia, E., Lui, Y., Wang, S., & Shaheen, S. (2019). Soil and maize contamination by trace elements and associated health risk assessment in the industrial area of Volos, Greece. *Environment International*, 124, 79-88.
- Bi, C.; Zhou, Y.; Chen, Z.; Jia, J.; & Bao, X. (2018). Heavy metals and lead isotopes in soils, road dust and leafy vegetables and health risks via vegetable consumption in the industrial areas of Shanghai, China. *Sci. Total Environ.*, 619, 1349-1357.
- Custodio, M., Peñalosa, R., Alvarado, J., Chanamé, F., & Maldonado, E. (2020). Surface water quality in the Mantaro river watershed assessed after the cessation of anthropogenic activities due to the COVID-19 pandemic. *Pol. J. Environ. Stud.*, 30, 3005-3018.
- Diario Correo. (2010). Se reducen los cultivos de alcachofa. Huancayo, Perú.
- FAO/WHO. (2019). Codex Alimentarius International Food Standards: General standard for contaminants and toxins in food and feed (CXS 193-1995).
- Gan, Y., Wang, L., Yang, G., Dai, J., & Wang, R. (2017). Multiple factors impact the contents of heavy metals in vegetables in high natural background area of China. *Chemosphere*, 184, 1388-1395.
- Ghasemidehkordi, B., Malekirad, A., Nazem, H., Fazilati, M., Salavati, H., Shariatifar, N., Rezaei, M., Fakhiri, Y., & Khaneghah, A. (2018). Concentration of lead and mercury in collected vegetables and herbs form Markazi province, Iran: a non-carcinogenic risk assessment. *Food Che. Toxic.*, 113, 204-210.
- Gruszecka - Kosowska, A. (2019). Potentially harmful element concentrations in the vegetables cultivated on arable soils, with human health-risk implications. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16, 4053, 1-25.
- Gupta, N., Yasav, K., Kumar, V., Kumar, S., Chadd, R., & Kumar, A. (2019). Trace elements in soil-vegetables interface: translocation, bioaccumulation, toxicity and amelioration - A review. *Science of the Total Environment*, 651, 2927-2942.

- Karimi, N., Khanahmadi, M., & Soheilikhah, Z. (2013). The effect of arsenic and heavy metals on growth and metal accumulation by artichoke (*Cynara scolymus* L.) and Savory (*Satureja hortensis* L. *Iranian Journal of Plant Physiology*, 3(3), 737-743.
- Kharazi, A., Leli M., Khazaei, M., & Alikhani, M. (2021). Human health risk assessment of heavy metals in agricultural soil and food crops in Hamadan Iran. *Journal of Food Composition and Analysis*, 100, 103890.
- Li, Q., Chen, Y., Fu, H., Cui, Z., Shi, L., Wang, L., & Liu, Z. (2012). Health risk of heavy metals in food crops grown on reclaimed tidal flat soil in the Pearl River Estuary, China. *J. Hazard. Mater*, 227, 148-154.
- Lizarazo, M., Herrera, C., Celis, C., Pombo, L., Teherán, A., Piñeros, L., Forero, S., Velandia, J., Díaz, F., Andrade, W., and Rodríguez, O. (2020). Contamination of staple crops by heavy metals in Sibaté, Colombia. *Heliyon*, 6, E04212.
- Machado, I. (2016). Estudios conjunto de trazas de metales y compuestos orgánicos en alcachofa (*Cynara scolymus*), como insumos para evaluar su calidad nutracéutica e inocuidad alimentaria. Tesis de doctorado, Universidad de La República, Montevideo. Uruguay. 244 pp.
- MINEM. (2009). Identification of pollution sources in the Mantaro river watershed.
- MINAM. (2014). Guía para el muestreo de suelos. (pp. 16-21).
- Pan, X., Wu, P., Wu, P., & Jiang, X. 2016. Levels and potential health risk of heavy metals in marketed vegetables in Zhejiang, China. *Sci. Rep.*, 6, 20317.
- White, P., and Pongrac, P. (2017). Heavy-metals toxicity in plants. In: Shalaba, S. (ed.) *Plant Stress Physiology*, second ed. CABI, Boston, p. 300.
- WHO. (2010). *Exposure to Cadmium a Major Health Concern*. WHO document Production Services, Geneva, Switzerland.
- Xu, Q. and Shi, G. (2000). The toxic effects of single Cd and interaction of Cd with Zn on some physiological index of [*Oenanthe javanica* (Blume) DC], *J. Nanjing Normal University (Natural Science)*, 23(4), 97-100.
- Yadav, K., Gupta, N., Kumar, A., Reece, L., Singh, N., Rezaia, S., & Khan, S. (2018). Mechanistic understanding and holistic approach of phytoremediation; a review on application and future prospects. *Ecol. Eng.*, 120, 274-298.