

Metales pesados en hortalizas y suelos agrícolas irrigados con aguas superficiales: una revisión sistemática

Heavy metals in vegetables and agricultural soils irrigated with surface water: a systematic review

Mario Antonio Anaya Raymundo^{1*}, Fabio Manuel Rangel Morales¹,
José Alberto Iannacone Óliver¹, Luis Miguel Romero Echevarría²

RESUMEN

Este artículo de revisión describe la información reportada en diferentes publicaciones científicas, con relación a los niveles de concentración de metales pesados en hortalizas y suelos de cultivo en distintas partes del mundo. La identificación de las fuentes y los procesos que conducen a la contaminación de suelos de cultivo por metales pesados es relevante para lograr una producción de hortalizas segura y sostenible. El objetivo del estudio fue analizar artículos originales sobre los niveles de concentración de metales pesados en hortalizas y suelos agrícolas irrigados con aguas superficiales, a partir de la revisión de la literatura científica publicada en los últimos cinco años. La búsqueda de información se realizó mediante la metodología PRISMA con bases de datos científicas de ScienceDirect y Scielo. El resultado incluyó el análisis de 21 estudios, publicados entre 2018 y 2022, con información relevante acerca de los diferentes metales pesados y sus niveles de concentración en hortalizas y suelos de cultivos, la metodología de análisis en el laboratorio, basado en el proceso de digestión por vía húmeda y espectrometría de absorción atómica. También se pone en evidencia que la mayoría de los estudios se realizaron en Asia y África.

Palabras clave: suelos contaminados, bioabsorción, cultivos agrícolas, agricultura.

ABSTRACT

This review describes the information reported in different scientific publications in relation to the concentration levels of heavy metals in vegetables and crop soils in the world, considering that the identification of the sources and the processes that lead to contamination of crop soils by heavy metals are relevant to achieve safe and sustainable vegetable production. The objective of this study was to analyze research articles about concentration levels of heavy metals in vegetables and agricultural soils irrigated with surface water, from the review of the literature published in the last five years, considering a rigorous search defined by the PRISMA methodology in scientific databases from ScienceDirect and Scielo. The result added the analysis of 21 studies, published between 2018 and 2022, with relevant information about the different heavy metals and their concentration levels in vegetables and crop soils, the analysis methodology in the laboratory, based on the wet digestion process and atomic absorption spectrometry. Also, it is shown that most of the studies were carried out in Asia and Africa.

Keywords: contaminated soils, bioabsorption, agricultural crops, agriculture.

Introducción

La contaminación del suelo y los vegetales debido a la acumulación de metales pesados (MP) se ha convertido en un problema relevante en la actualidad (ur Rehman *et al.*, 2018), ya que es uno de los aspectos determinantes de una creciente crisis ecológica y de salud. Se aplica la denominación

de MP al grupo de elementos metálicos y metaloides con densidad atómica superior a 4 g cm⁻³ (Edelstein y Ben-Hurb, 2018). En general, estos metales son tóxicos para los humanos, incluso en concentraciones bajas (Rehman *et al.*, 2018; Gupta *et al.*, 2021). Los MP incluyen elementos como B, Ni, Cu, Zn, Mo y Fe, esenciales para el crecimiento de las plantas, pero tóxicos para

¹ Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima - Perú. Escuela Universitaria de Posgrado. Lima, Perú.

² Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo. Huancavelica-Perú.

* Autor para correspondencia: 2019320122@unfv.edu.pe

animales y plantas cuando sus concentraciones exceden ciertos niveles de umbral. En algunos de estos elementos el margen entre las concentraciones recomendadas y las tóxicas es bastante estrecho. Otro grupo de MP lo constituyen el As, Hg, Cd y Pb, entre otros elementos que no son esenciales para las plantas o animales (Tibbett *et al.*, 2021).

La incorporación de los MP en la cadena alimentaria suele ocurrir a través de suelos contaminados, las fuentes de agua y la deposición atmosférica (Muhammad *et al.*, 2019). Una parte importante de la dieta humana consiste en vegetales, que contienen proteínas, carbohidratos, vitaminas y minerales, antioxidantes y fibras dietéticas. Los minerales esenciales para las plantas (metales y no metales) son sustancias inorgánicas que mantienen estructuras y procesos fisicoquímicos. Se clasifican en micro (trazas) o macrominerales (elementos principales) (Gharaibeh *et al.*, 2019). Los macrominerales, constituidos por el nitrógeno (N), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), fósforo (P) y azufre (S), se encuentran en las plantas en concentraciones de >0,1% del peso del tejido seco, mientras que los microminerales (principalmente metales), que incluyen el hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn), cobre (Cu), boro (B), cloro (Cl), molibdeno (Mo) y níquel (Ni), se hallan en concentraciones de <0,01% (Gupta *et al.*, 2021).

Las hortalizas pueden contener altas concentraciones de MP absorbiéndolos de suelos contaminados y mediante la deposición atmosférica de partículas de diferentes fuentes. En general, las plantas absorben estos MP primero a nivel de las raíces y luego se desplazan a distintas partes de estas a través de varias vías. Algunos MP son tóxicos para las plantas en concentraciones muy bajas, mientras que otros pueden acumularse en los tejidos de las plantas a niveles relativamente altos sin síntomas visibles o reducción del rendimiento. El exceso de MP provoca una reducción del crecimiento debido a la alteración de las actividades fisiológicas, bioquímicas y metabólicas en las plantas (Liu *et al.*, 2021).

La acumulación excesiva de MP en el suelo provoca que los cultivos se contaminen, por lo que su consumo afecta la salud humana. Además afecta el rendimiento de los cultivos debido a la inhibición de los procesos metabólicos (Kharazi *et al.*, 2021).

La absorción de MP a través de las raíces de las plantas está determinada por muchos factores,

como el contenido soluble de MP en el suelo, el nivel de pH, la materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, las etapas de crecimiento de las plantas, el tipo de cultivo, los fertilizantes y el tipo de suelo (Zhang *et al.*, 2018). Las aguas superficiales utilizadas para el riego de cultivos agrícolas, contaminadas con aguas residuales de origen doméstico o industrial, son una de las fuentes principales de MP en el suelo. Las hortalizas cultivadas en suelos agrícolas irrigados continuamente y a largo plazo con aguas residuales suelen tener altos niveles de acumulación de MP (ur Rehman *et al.*, 2019).

Las fuentes comunes de MP en los agroecosistemas son tanto naturales como antropogénicas. Las fuentes naturales incluyen emisiones de polvo, volcanes y productos de meteorización de rocas ricas en metales (Gharaibeh *et al.*, 2019). Las fuentes antropogénicas incluyen minas minerales, aplicaciones industriales y agroquímicos como pesticidas, fertilizantes, herbicidas y reguladores de crecimiento en suelos agrícolas, escorrentía superficial de industrias manufactureras y de procesamiento (Atikpo *et al.*, 2021). Diversos estudios han concluido que los metales esenciales (Cu, Zn, Cr y Mn) y los metales no esenciales (Cd y Pb) son altamente tóxicos para los microorganismos del suelo, la vida acuática, los animales y humanos en altas concentraciones y se han ido acumulando en ecosistemas agrícolas de diferentes partes del mundo (Chaoua *et al.*, 2019; Xiang *et al.*, 2021).

Esta revisión sistemática considera principalmente la contaminación de suelos y cultivos hortícolas, y tiene como objetivo analizar artículos originales sobre los niveles de concentración de metales pesados en hortalizas y suelos agrícolas irrigados con aguas superficiales.

Materiales y métodos

El trabajo de investigación se sustenta en la declaración PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses), considerando estudios que se enfoquen en los niveles de concentración de metales pesados en hortalizas y suelos agrícolas irrigados con aguas superficiales.

Se realizó una búsqueda y recopilación de artículos originales relevantes publicados a nivel mundial en los últimos cinco años, del 2018 al

2022. Se consideraron solo aquellos artículos publicados en idioma inglés o español. Para la síntesis de la información se agruparon los artículos tomando en cuenta que incluyeran información sobre concentración de metales pesados en suelos de cultivo y concentración de metales pesados en hortalizas irrigadas con aguas superficiales.

Las bases de datos científicas consideradas como fuentes de información fueron ScienceDirect y Scielo. Para la búsqueda de los estudios se utilizó la siguiente cadena de búsqueda booleana: “heavy metals” and “vegetables” and “soil” and “crops”.

El proceso de extracción y organización de la información se gestionó utilizando una hoja de datos Excel, donde se incluyeron datos referidos a título en inglés o en español, revista, país del estudio, referencia, base de datos, tipo de estudio, metodología, métodos de investigación y variables que analiza (Tabla 1).

Resultados y discusión

La búsqueda en las diferentes bases de datos consultadas arrojó un total de 2764 registros. Se revisaron los 2764 registros a nivel de títulos y resúmenes, excluyéndose 1939, por ser artículos de revisión, estudios enfocados en análisis microbiológico del suelo, considerar suelos agrícolas tratados o por ser estudios que en su contenido no evidencian una declaración explícita de niveles de concentración de metales pesados. Finalmente, se incluyeron 21 artículos originales para su análisis y elaboración de la revisión sistemática (Figura 1).

La mayoría de los estudios corresponden a diseños transversales (96%), basándose en el levantamiento de muestras (suelo de cultivo, hortalizas y agua de riego) en un determinado momento, para su posterior análisis. En menor número se utilizaron los diseños de investigación

Tabla 1. Datos para la consolidación de información de las publicaciones.

Información general	Metodología del estudio	Elementos conceptuales
Título	Lugar del estudio	Metales pesados
Referencia	Muestra	Concentración de metales pesados en el suelo y hortalizas
Revista	Tipo de análisis de laboratorio	Fuentes de contaminación
Año	Diseño de investigación	
País		
Base de datos		

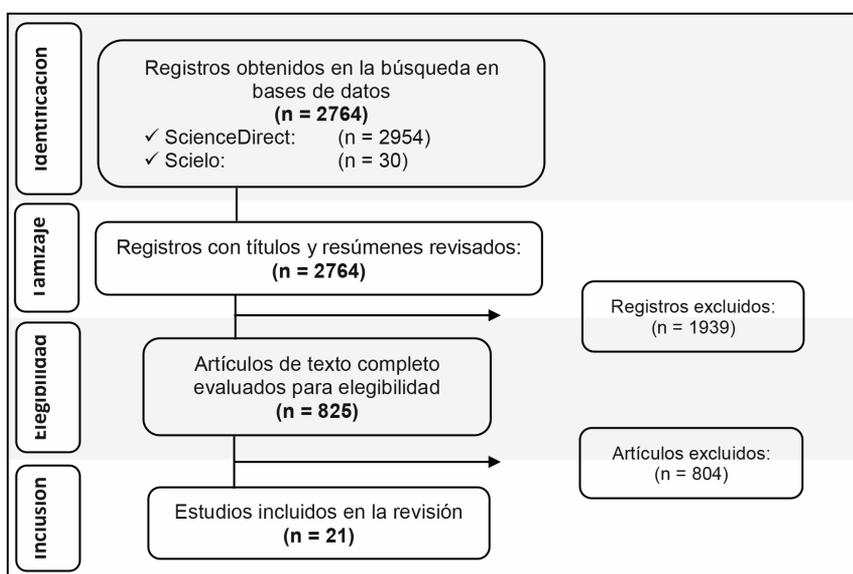


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA de la revisión y selección de artículos.

longitudinales (4%), que corresponden a estudios comparativos respecto a ciertas regiones territoriales en dos periodos estacionales. En cuanto al alcance de la investigación, el 100% de los estudios revisados son descriptivos-correlacionales. En todos se describe información respecto a la contaminación de metales pesados y sus niveles de concentración en los suelos de cultivo, hortalizas y aguas utilizadas en el riego.

Los estudios analizados fueron realizados en 10 países, en su mayoría asiáticos y africanos. Como tema base se abarcan aspectos sobre la contaminación del suelo, cultivos agrícolas, la contaminación de las aguas de riego y el riesgo que representan los metales pesados para la salud humana (Tabla 2).

Metales pesados en suelos de cultivo

Respecto a los tipos de MP presentes en los suelos de cultivo, se incluyen el Zn, Fe, Ni, Cu, Cr, Hg, Pb, Mn, Co, As, Mo, V y Cd. La determinación de los MP se realizó por los métodos de análisis de espectrometría de absorción atómica, espectrometría de emisión óptica (OES) de plasma acoplado inductivamente (ICP), espectroscopia de fluorescencia de rayos X, espectrómetro de fluorescencia atómica de doble canal, entre otros (Tabla 3a y b).

En cuanto al tipo de suelo basado en su textura, muchas de las áreas de estudio variaron de naturaleza arenosa a franco arenosa con un valor promedio de 0,98% - 3,57% arcilla, 5,42% - 24,89% limo y 71,31% - 93,12% arena (Wan *et al.*, 2021). Los suelos de cultivo analizados se encuentran a orillas de ríos o cuencas hidrográficas, por lo que estas contienen alta cantidad de partículas de cuarzo producto de la meteorización de rocas (Zhang *et al.*, 2018; Tomno *et al.*, 2020). Las muestras de suelo recogidas reflejaron que eran de naturaleza alcalina y no salina. Respecto al contenido de materia orgánica en las muestras de suelo, se reportaron valores en el rango de 1,14% - 4,76%. Por lo general, los suelos se caracterizaron por la labranza excesiva y la erosión, por lo que muchos fueron considerados de naturaleza ligeramente calcárea (Lian *et al.*, 2019; Zheng *et al.*, 2020).

Muchos de los estudios reportan al Pb, Cu y Zn como los MP dominantes en los suelos de cultivo, con concentraciones que sobrepasan los límites permisibles según los estándares de referencia considerados (Ji *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2018; Lian *et al.*, 2019; Zheng *et al.*, 2020; Xiang *et al.*, 2021; Wan *et al.*, 2021).

Otras fuentes que contribuyen a la contaminación de los suelos por MP son las emisiones y residuos industriales, el riego con aguas residuales y la

Tabla 2. Artículos de investigación incluidos para el análisis de la revisión sistemática.

N°	Referencia	Revista	País del estudio	Base de datos
01	(Moyo <i>et al.</i> , 2020)	Water SA	Sudáfrica	Scielo
02	(Eissa y Negim, 2018)	Journal of soil science and plant nutrition	Egipto	Scielo
03	(Liu <i>et al.</i> , 2021)	Science of The Total Environment	China	ScienceDirect
04	(Tomno <i>et al.</i> , 2020)	Science of The Total Environment	Kenya	ScienceDirect
05	(Gupta <i>et al.</i> , 2021)	Environmental Toxicology and Pharmacology	India	ScienceDirect
06	(ur Rehman <i>et al.</i> , 2018)	Pedosphere	Pakistan	ScienceDirect
07	(Kharazi <i>et al.</i> , 2021)	Journal of Food Composition and Analysis	Irán	ScienceDirect
08	(Xiang <i>et al.</i> , 2021)	Environmental Pollution	China	ScienceDirect
09	(Wan <i>et al.</i> , 2021)	Science of the Total Environment	China	ScienceDirect
10	(Zheng <i>et al.</i> , 2020)	Food Chemistry	China	ScienceDirect
11	(Lian <i>et al.</i> , 2019)	Ecotoxicology and Environmental Safety	China	ScienceDirect
12	(Zhang <i>et al.</i> , 2018)	Environmental Pollution	China	ScienceDirect
13	(Chaoua <i>et al.</i> , 2019)	Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences	Marruecos	ScienceDirect
14	(Sihlahla <i>et al.</i> , 2019)	Journal of African Earth Sciences	Sudáfrica	ScienceDirect
15	(ur Rehman <i>et al.</i> , 2019)	Agricultural Water Management	Pakistán	ScienceDirect
16	(Gharaibeh <i>et al.</i> , 2019)	Geoderma Regional	Arabia	ScienceDirect
17	(Edogbo <i>et al.</i> ; 2020)	Scientific African	Nigeria	ScienceDirect
18	(Hussain <i>et al.</i> , 2021)	Saudi Journal of Biological Sciences	Pakistán	ScienceDirect
19	(Muhammad <i>et al.</i> , 2019)	Microchemical Journal	Pakistán	ScienceDirect
20	(Atikpo <i>et al.</i> , 2021)	Heliyon	Nigeria	ScienceDirect
21	(Ji <i>et al.</i> , 2018)	Chemosphere	China	ScienceDirect

Tabla 3a. Niveles de concentración y método de análisis de MP en suelos de cultivo según reporte en los estudios.

Región / país	Nivel de concentración de MP	Referencia
Zhejiang - China	Cd, Pb, Cr, Cu, Ni y Zn rango de 0,208 a 6,209 mg/kg, 18,18 a 2060 mg/kg, 56 a 172 mg/kg, 30 a 1865 mg/kg, 21 a 305 mg/kg, y 15 a 2707mg/kg.	(Liu <i>et al.</i> , 2021)
Machakos - Kenya	Zn > Cu > Cr > Pb > Cd	(Tomno <i>et al.</i> , 2020)
Thohoyandou - Sudáfrica	Mn > Ni > Cd Las concentraciones de Cd, Mn y Ni oscilaron entre 0,03 y 1,07 mg·kg ⁻¹ , 204,99–249,13 mg·kg ⁻¹ y 48,47–88,23 mg·kg ⁻¹ , respectivamente.	(Moyo <i>et al.</i> , 2020)
Arab Imadabegh - Egipto	Las concentraciones de Zn, Cu, Pb, Cd y Ni fueron de 620 a 310, 300, 6,5 y 130 mg kg ⁻¹ , respectivamente.	(Eissa y Negim, 2018)
Hamadan - Irán	Fe > Mn > Zn > Pb > Ni > Cr > Cu > As > Co > Cd > Hg El Fe mostró concentración media más alta (23 mg/ kg), el Hg mostró la concentración media más baja (0,15 mg/kg).	(Kharazi <i>et al.</i> , 2021)
Ningbo - China	Hg > Pb > As > Cr > Zn > Cu > Ni > Cd Los riesgos ecológicos de los MP fueron leve, excepto los riesgos prominentes de Cd y Hg.	(Xiang <i>et al.</i> , 2021)
Nanjing - China	Las concentraciones medias fueron: Zn (107,92 ± 22,62 mg kg ⁻¹) > Cu (38,57 ± 9,30 mg kg ⁻¹) > Pb (32,63 ± 7,51 mg kg ⁻¹) > As (11,07 ± 2,05 mg kg ⁻¹) > Cd (0,26 ± 0,11 mg kg ⁻¹) > Hg (0,09 ± 0,05 mg kg ⁻¹), todos superiores a los correspondientes valores de fondo.	(Wan <i>et al.</i> , 2021)
Delta urban agglomeration - China	Los contenidos de Cd, Cr, Pb, Hg y As en el suelo fueron 0,27 ± 0,39, 51,78 ± 33,62, 47,27 ± 30,58, 0,26 ± 0,40 y 13,04 ± 14,22 mg/kg, respectivamente. El contenido de Cd, Hg y As en el 2,6%, 1,4% y 4,4% de las muestras de suelo, respectivamente, superó el estándar.	(Zheng <i>et al.</i> , 2020)
Kano - Nigeria	Los niveles de Cd y Cr estaban por encima de los límites permisibles de 3,0 mg/kg (para Cd); 150 mg/kg (para Cr) según lo establecido por la FAO.	(Edogbo <i>et al.</i> ; 2020)

deposición atmosférica. El riego con aguas residuales aumenta la concentración por metales pesados en los suelos irrigados (ur Rehman *et al.*, 2019; Tomno *et al.*, 2020). Asimismo, el aumento de la urbanización y la industrialización contribuyen a la contaminación por MP como As, Cr, Pb, Ni, Zn, Cd y Mn. La concentración de MP en el aire varía significativamente entre las zonas urbanas y zonas rurales. Así, la precipitación de los MP presentes en el aire contaminado impacta en los suelos y aguas de riego, lo que deriva en la absorción de estos elementos por los diferentes cultivos agrícolas y su consecuente ingreso en la cadena alimentaria. Los estudios que abarcaron suelos de cultivos aledaños a estas fuentes reportaron altas concentraciones de MP (Liu *et al.*, 2021; Chaoua *et al.*, 2019).

En la Figura 2 se muestra el número de estudios con relación al tipo de metal pesado analizado en los suelos de cultivo. Se señala al Cd y Pb como los MP más analizados y reportados en los estudios. Luego figuran el Zn, Cu, Cr y Ni como los otros tipos de MP de mayor abordaje. Se debe destacar que la mayoría de los artículos revisados se han llevado a cabo en países asiáticos y africanos.

Metales pesados en hortalizas

Para la determinación de los MP en las hortalizas, primero se consideró el método de digestión húmeda, utilizando ácidos, bases y agentes oxidantes, a fin de eliminar totalmente la materia orgánica de la muestra. Posteriormente, se determinaron

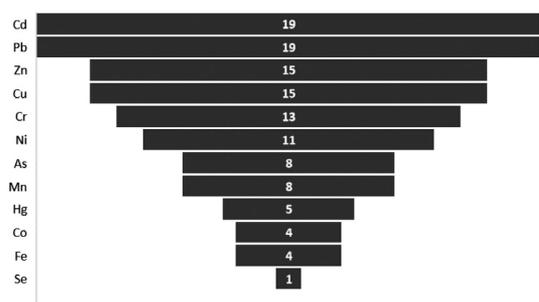


Figura 2. Número de estudios según metal pesado analizado en suelos de cultivo.

las concentraciones de MP mediante métodos espectrofotométricos, como la espectrometría de absorción atómica, espectrometría de emisión óptica (OES) de plasma acoplado inductivamente (ICP), espectroscopia de fluorescencia de rayos X, espectrómetro de fluorescencia atómica de doble canal. Se observa en los estudios revisados que las concentraciones de MP varían significativamente entre las hortalizas recolectadas de las zonas de investigación. La concentración media de Pb, Zn, Cd, Cr, Mn y Cu en los distintos cultivos reportados en los estudios se muestra en la Tabla 4.

Tabla 3b. Niveles de concentración y método de análisis de MP en suelos de cultivo según reporte en los estudios.

Región/país	Nivel de concentración de MP	Referencia
Sihui, Shunde - China	En promedio, Mn representó más del 80% de la suma de las concentraciones, seguido de Pb, Cu, Ni, As y Hg. El 52,9%, el 41,2%, el 66,2%, el 79,4%, el 44,1% y el 30,9% de las muestras de Sihui excedieron los valores de fondo de As, Cu, Hg, Mn, Ni y Pb, respectivamente.	(Zhang <i>et al.</i> , 2018)
Marrakech - Marruecos	Las concentraciones medias (mg/kg) de Zn, Cu, Pb y Cd fueron 112,71; 17,70; 57,36 y 11,22. La concentración media más alta fue para Zn seguido de Pb, Cu y la concentración mínima se observó para Cd.	(Chaoua <i>et al.</i> , 2019)
Mzimvubu - Sudáfrica	Las concentraciones estaban en el orden Fe > Mn > Cr > Zn > Ni > Cu > Co > Pb > As > Cd > Se. Las concentraciones de la mayoría de los MP superaban el nivel máximo permisivo.	(Sihlahla <i>et al.</i> , 2019)
Sahiwal - Pakistán	Suelo regado con agua subterránea, variaron de <0,01 a 45 mg kg ⁻¹ , con Mn teniendo la concentración media más alta (32 ± 6 mg kg ⁻¹) y la concentración media más baja en Cd (< 0,01 mg kg ⁻¹). Suelo regado con aguas residuales, oscilaron entre 0,01 y 191 mg kg ⁻¹ , con Mn que tiene la concentración media más alta (89 ± 63 mg kg ⁻¹) y concentración media más baja en Cd (0,01 ± 0,01 mg kg ⁻¹).	(ur Rehman <i>et al.</i> , 2019)
Chiyutuo - China	Las concentraciones, con Cd, Pb, Hg y Zn oscilaron entre 0,05 y 24,20, 14,50-215,00, 0,01-1,26 y 28,80-624,00 mg kg ⁻¹ , respectivamente. El Pb estaban por debajo del límite aceptable. El Cd en 248 muestras, Hg en 93 muestras, y Zn en 127 muestras estaban por encima del límite aceptable.	(Lian <i>et al.</i> , 2019)
Valle del Jordan - Arabia	Las concentraciones promedio de metales fueron generalmente más altas en suelos regados con aguas residuales tratadas que en suelos regados con agua superficial (As: 1,07 vs. 0,61, Cr: 27,39 vs. 18,68, Cu: 14,46 vs. 8,03, Pb: 43,93 vs. 33,66, Zn: 97,21 vs. 65,87 mg kg ⁻¹). Las concentraciones medias de los MP estaban por debajo de la concentración máxima permisible.	(Gharaibeh <i>et al.</i> , 2019)
Lahore - Pakistán	Suelo regados con agua subterránea valores mínimos y máximos (mg kg ⁻¹) de As, Cd y Pb de 2,36 y 6,39; 1,27 y 3,46 y 2,41 y 4,35 respectivamente. Suelos regados con agua de río valores mínimos y máximos (mg kg ⁻¹) de As, Cd y Pb de 3,87 y 9,21; 2,57 y 3,99 y 3,75 y 7,84 respectivamente.	(Hussain <i>et al.</i> , 2021)
Zhob, Loralai - Pakistán	Las concentraciones medias de MP más altas (48,872 mg kg ⁻¹) se observaron para Fe y las más bajas para Cd. Se observaron restos de concentraciones de HM en el suelo dentro de estos dos extremos.	(Muhammad <i>et al.</i> , 2019)

Tabla 4. Concentración media de metales pesados (mg/kg) en hortalizas según estudios.

Hortalizas	Pb	Zn	Cd	Cr	Mn	Cu	Referencia
Espinaca	4,52 ± 2,26	31,89 ± 10,02	0,86 ± 0,58	–	37,67 ± 9,17	8,19 ± 2,62	(Gupta <i>et al.</i> , 2021)
Berenjena	0,15 ± 0,14	17,60 ± 4,07	0,09 ± 0,05	–	17,99 ± 4,27	7,59 ± 2,76	
Chili	0,08 ± 0,09	14,36 ± 4,58	0,08 ± 0,03	–	16,47 ± 7,43	5,88 ± 1,34	
Tomate	–	22,8 ± 6,64	–	2,72 ± 1,70	144 ± 34,4	19,0 ± 6,38	(ur Rehman <i>et al.</i> , 2018)
Berenjena	–	21,6 ± 12,6	–	1,93 ± 0,93	98,3 ± 21,8	16,4 ± 4,55	
Coliflor	–	12,5 ± 8,91	–	1,72 ± 0,97	80,9 ± 30,8	2,94 ± 1,15	
Alverja	–	9,07 ± 3,56	–	0,65 ± 0,26	33,7 ± 22,2	5,42 ± 1,68	
Lechuga	–	15,8 ± 10,9	–	1,68 ± 1,06	86,1 ± 34,4	9,23 ± 2,68	
Betarraga	–	35,7 ± 27,1	–	1,74 ± 0,99	141 ± 69,6	9,15 ± 2,47	
Espinaca	0,636 ± 0,93	11,80 ± 16,70	0,0197 ± 0,04	1,002 ± 2,19	–	14,5 ± 11,55	(Tomno <i>et al.</i> , 2020)
Col rizada	0,458 ± 0,52	18,8 ± 32,60	0,243 ± 0,33	1,62 ± 2,80	–	3,60 ± 3,74	
Espinaca	–	–	2,94	–	50,16	–	(Moyo <i>et al.</i> , 2020)
Cebolla	–	–	0,91	–	22,65	–	
Col china	–	–	0,77	–	31,78	–	
Remolacha	–	–	1,08	–	29,95	–	
Tomate	–	–	0,60	–	15,75	–	
Lechuga	2,0	120	15	–	–	15	(Eissa y Negim, 2018)
Espinaca	5,0	75	20	–	–	17	
Lechuga	0,18 ± 0,04	3,80 ± 1,80	0,19 ± 0,08	0,22 ± 0,17	4,10 ± 1,30	1,10 ± 0,30	(Kharazi <i>et al.</i> , 2021)
Tomate	0,05 ± 0,02	1,40 ± 0,40	0,005 ± 0,004	0,04 ± 0,01	2 ± 1,80	0,45 ± 0,20	
Zanahoria	1,49 ± 0,32	0,6 ± 0,2	0,05 ± 0,01	–	26 ± 6	0,62 ± 0,07	(ur Rehman <i>et al.</i> , 2019)
Nabo	1,28 ± 0,09	0,4 ± 0,06	0,05 ± 0,02	–	28 ± 4	0,18 ± 0,13	
Col	1,81 ± 0,15	0,4 ± 0,3	0,03 ± 0,02	–	22 ± 4	0,45 ± 0,04	
Espinaca	2,68 ± 0,39	1,8 ± 0,2	0,08 ± 0,009	–	74 ± 14	0,87 ± 0,09	
Coliflor	1,38 ± 0,11	0,6 ± 0,2	0,03 ± 0,01	–	35 ± 6	0,50 ± 0,09	
Lechuga	0,17 ± 0,01	6,14 ± 1,80	0,0004 ± 0,0003	1,82 ± 1,49	–	–	
Tomate	0,23 ± 0,05	13,9 ± 1,72	10,3 ± 1,12	91,6 ± 8,97	–	–	(Edogbo <i>et al.</i> ; 2020)
Cebolla	0,14 ± 0,03	11,7 ± 2,94	2,81 ± 0,80	0,33 ± 0,15	–	–	
Espinaca	0,24 ± 0,46	8,92 ± 2,09	2,41 ± 0,89	0,60 ± 0,18	–	–	

Se debe destacar que las hortalizas más frecuentemente analizadas son espinaca, tomate y lechuga. El análisis de la concentración del MP se realizó en la parte comestible de la hortaliza, hoja, tallo, raíz o fruto. La concentración media más alta de Pb se registró en espinaca (5,0 mg kg⁻¹), col (1,81 mg kg⁻¹) y zanahoria (1,49 mg kg⁻¹); la concentración media más alta de Zn se observó en betarraga (35,7 mg kg⁻¹), pepinillo (34,2 mg kg⁻¹), espinaca (31,89 mg kg⁻¹) y tomate (22,8 mg kg⁻¹); la concentración media más alta de Cd se presentó en tomate (10,3 mg kg⁻¹), cebolla (2,81 mg kg⁻¹) y espinaca (2,94 mg kg⁻¹); la concentración media más alta de Cr se encontró en tomate (91,6 mg kg⁻¹), berenjena (1,93 mg kg⁻¹), lechuga (1,82 mg kg⁻¹) y betarraga (1,74 mg kg⁻¹); la concentración media más alta de Mn se halló en tomate (144 mg kg⁻¹), berenjena (98,3 mg kg⁻¹) y betarraga (141 mg kg⁻¹),

y la concentración media más alta de Cu se observó en tomate (19,0 mg kg⁻¹), berenjena (16,4 mg kg⁻¹) y espinaca (14,5 mg kg⁻¹). Las hortalizas mencionadas en los estudios son espinaca, berenjena, chili, tomate coliflor, alverja, lechuga, betarraga, col rizada, cebolla, col china, zanahoria, nabo, pimiento, vainita, rábano, apio y pepinillo. Los diferentes tipos de hortalizas y la diversidad en las condiciones del suelo incidieron en las concentraciones de metales. Así, concentraciones de Cd en hortalizas de hoja y solanáceas reportaron valores más altos en comparación con otras, especialmente en lechuga y berenjena. Se observaron concentraciones más altas de Cd, Pb y Cr en la lechuga (2018; Edogbo *et al.*, 2020; Moyo *et al.*, 2020; Atikpo *et al.*, 2021).

Los estudios indican que las concentraciones medias de MP en las hortalizas analizadas estaban por lo general dentro de los límites de seguridad de

referencia, y los cultivos que sí reportaron valores que excedieron estos límites se caracterizaron por ser irrigados con aguas superficiales contaminadas con aguas residuales sin tratar. Los factores de transferencia medios indicaron que las hortalizas irrigadas con aguas residuales acumularon más Cd y Zn, tanto del agua como del suelo, en contraste con el Cu, Pb y Cr (Eissa y Negim, 2018; ur Rehman *et al.*, 2019; Gupta *et al.*, 2021).

Conclusiones

A partir del estudio de revisión se puede señalar que las hortalizas acumulan MP, en concentraciones significativas, tanto en sus partes comestibles como no comestibles. Se evidencia, según lo reportado, que las diversas condiciones en el suelo dan lugar a grandes variaciones en los niveles de concentración de MP entre las hortalizas estudiadas. De este modo, las concentraciones de Cd en hortalizas de hoja como la espinaca, lechuga y solanáceas fueron más altas con relación a las de otras hortalizas. Las concentraciones más altas de Cd, Pb y Cr se registraron en la lechuga. Por lo general, las concentraciones de MP, especialmente Cd y Pb, excedieron el límite permisible en la mayoría de los casos estudiados.

Las hortalizas pueden absorber MP a través de las raíces o las hojas. Por lo tanto, la contaminación

de suelos de cultivo, las aguas de riego y el aire con MP puede dar lugar a la absorción de estos metales por parte de las hortalizas y su posterior ingreso en la cadena alimentaria. En el caso de hortalizas de hojas, como la espinaca y lechuga, suelen acumular altas concentraciones de MP a partir del suelo en el que son cultivadas, por lo que debe evitarse su consumo si están en suelos contaminados con estos metales. El ingreso y la salida de MP del suelo hacia las diferentes partes de las hortalizas se encuentran afectados por variados factores, como la especie o tipo de hortaliza, el pH del suelo, la concentración de materia orgánica, la temperatura, textura, presencia de otros metales coexistentes, la capacidad de intercambio catiónico y microorganismos presentes en el medio. Por lo tanto, los contenidos de MP en los cultivos están determinados en última instancia por el suelo y, en consecuencia, la contaminación de estos estará influenciada por la irrigación con aguas residuales, la excesiva aplicación de abonos y la contaminación atmosférica con material particulado de metales pesados.

La interrelación entre las hortalizas y el suelo de cultivo en la bioacumulación de MP es bastante compleja, por lo que se recomienda realizar más estudios de investigación en este campo considerando diferentes contextos con relación a factores naturales y ambientales.

Literatura citada

- Atikpo, E.; Okonofua, E.S.; Uwadia, N.O.; Michael, A. 2021. Health risks connected with ingestion of vegetables harvested from heavy metals contaminated farms in Western Nigeria. *Heliyon*, 7:e07716. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e07716
- Chaoua, S.; Boussaa, S.; Gharmali, A.; Boumezzough, A. 2019. Impact of irrigation with wastewater on accumulation of heavy metals in soil and crops in the region of Marrakech in Morocco. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18(4): 429-436.
- Edelstein, M.; Ben-Hur, M. 2018. Heavy metals and metalloids: Sources, risks and strategies to reduce their accumulation in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, 234: 431-444.
- Edogbo, B.; Okolocha, E.; Maikai, B.; Aluwong, T.; Uchendu, C. 2020. Risk analysis of heavy metal contamination in soil, vegetables and fish around Challawa area in Kano State, Nigeria. *Scientific African*, 7, e00281. DOI: 10.1016/j.sciaf.2020.e00281
- Eissa, M.A.; Negim, O.E. 2018. Heavy metals uptake and translocation by lettuce and spinach grown on a metal-contaminated soil. *Journal of soil science and plant nutrition*, 18(4): 1097-1107.
- Gharaibeh, Mamoun A.; Marschner, B.; Heinze, S.; Moos, N. 2019. *Spatial distribution of metals in soils under agriculture in the Jordan Valley*, 20:e00245. DOI: 10.1016/j.geodrs.2019.e00245
- Gupta, N.; Yadav, K.; Kumar, V.; Krishnan, S.; Kumar, S.; Nejad, Z.; Alam, J. 2021. Evaluating heavy metals contamination in soil and vegetables in the region of North India: Levels, transfer and potential human health risk analysis. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 82: 103563. DOI: 10.1016/j.etap.2020.103563
- Hussain, N.; Ahmed, K.; Asmatullah, Ahmed, M.; Hussain, S.; Javid, A. 2021. Potential health risks assessment cognate with selected heavy metals contents in some vegetables grown with four different irrigation sources near Lahore, Pakistan. *Saudi Journal of Biological Sciences*. DOI: 10.1016/j.sjbs.2021.10.043
- Ji, Y.; Wu, P.; Zhang, J.; Zhang, J.; Zhou, Y.; Peng, Y.; Gao, G. 2018. Heavy metal accumulation, risk assessment and integrated biomarker responses of local vegetables: A case study along the Le'an river. *Chemosphere*, 199: 361-371.

- Kharazi, A.; Mostafa Leili, 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. DOI: 10.1016/j.jfca.2021.103890
- Lian, M.; Wang, J.; Sun, L.; Xu, Z.; Tang, J.; Yan, J.; Zeng, X.
2019. Profiles and potential health risks of heavy metals in soil and crops from the watershed of Xi River in Northeast China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 169: 442-448.
- Liu, X.; Gu, S.; Yang, S.; Deng, J.; Xu, J.
2021. Heavy metals in soil-vegetable system around E-waste site and the health risk assessment. *Science of The Total Environment*, 779: 146438. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146438
- Moyo, B.; Matodzi, V.; Legodi, M.A.; Pakade, V.E.; Tavengwa, N.T.
2020. Determination of Cd, Mn and Ni accumulated in fruits, vegetables and soil in the Thohoyandou town area, South Africa. *Water SA*, 46(2): 285-290.
- Muhammad, S.; Ullah, R.; Jadoon, I.A.
2019. Heavy metals contamination in soil and food and their evaluation for risk assessment in the Zhob and Loralai valleys, Baluchistan province, Pakistan. *Microchemical Journal*, 149, 103971. DOI: 10.1016/j.microc.2019.103971
- Sihlahla, M.; Mouri, H.; Nomngongo, P.N.
2019. Uptake of trace elements by vegetable plants grown on agricultural soils: Evaluation of trace metal accumulation and potential health risk. *Journal of African Earth Sciences*, 160: 103635. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2019.103635
- Tibbett, M.; Green, I.R.; De Oliveira, V.; Whitaker, J.
2021. The transfer of trace metals in the soil-plant-arthropod system. *Science of The Total Environment*, 779, 146260. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146260
- Tomno, R.; Nzeve, J.; Mailu, S.; Shitanda, D.; Waswa, F.
2020. Heavy metal contamination of water, soil and vegetables in urban streams in Machakos municipality, Kenya. *Scientific African*, 9:e00539. DOI: 10.1016/j.sciaf.2020.e00539
- ur Rehman, K.; Bukhari, S.M.; Andleeb, S.; Mahmood, A.; Erinle, K.O.; Naeem, M.M.; Imran, Q.
2019. Ecological risk assessment of heavy metals in vegetables irrigated with groundwater and wastewater: The particular case of Sahiwal district in Pakistan. *Agricultural Water Management*, 226: 105816. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.105816
- ur Rehman, Z.; Khan, S.; Shah, M.; Brusseau, M.; Khan, S.; Mainhagu, J.
2018. Transfer of heavy metals from soils to vegetables and associated human health risks at selected sites in Pakistan. *Pedosphere*, 28(4): 666-679.
- Wan, M.; Hu, W.; Wang, H.; Tian, K.; Huang, B.
2021. Comprehensive assessment of heavy metal risk in soil-crop systems along the Yangtze River in Nanjing, Southeast China. *Science of The Total Environment*, 780: 146567. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146567
- Xiang, M.; Li, Y.; Yang, J.; Lei, K.; Li, Y.; Li, F.; Cao, Y.
2021. Heavy metal contamination risk assessment and correlation analysis of heavy metal contents in soil and crops. *Environmental Pollution*, 278: 116911. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116911
- Zhang, J.; Li, H.; Zhou, Y.; Dou, L.; Cai, L.; Mo, L.; You, J.
2018. Bioavailability and soil-to-crop transfer of heavy metals in farmland soils: A case study in the Pearl River Delta, South China. *Environmental Pollution*, 235: 710-719.
- Zheng, S.; Wang, Q.; Yuan, Y.; Sun, W.
2020. Human health risk assessment of heavy metals in soil and food crops in the Pearl River Delta urban agglomeration of China. *Food Chemistry*, 316. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.126213

