

# Concentración y transferencia de metales pesados en lechuga (*Lactuca sativa* L.) irrigadas con aguas tratadas

## Concentration and transfer of heavy metals in lettuce (*Lactuca sativa* L.) irrigated with treated water

Marcos Loredo-Tovías<sup>1</sup> , Jorge Alonso Alcalá-Jáuregui<sup>2</sup> , María Elena García-Arreola<sup>1</sup> ,  
Fernando de Jesús Carballo-Méndez<sup>3</sup> , Humberto Rodríguez-Fuentes<sup>3</sup> ,  
Alain Buendía-García<sup>4</sup>  y Juan Carlos Rodríguez-Ortiz<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería. Av. Manuel Nava no.8, Zona Universitaria. 78290 San Luis Potosí, S.L.P., México.

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Agronomía y Veterinaria. Carretera San Luis - Matchuala km 14.5, ejido Palma de la Cruz. 78321 Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P., México.

\* Autor para correspondencia (juancarlos.rodriguez@uaslp.mx)

<sup>3</sup> Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía. Av. Francisco Villa s/n, col. Ex Hacienda el Canadá. 66050 General Escobedo, Nuevo León, México.

<sup>4</sup> Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna. Periférico Raúl López Sánchez km 1.5 y Carretera a Santa Fe s/n. 27059 Torreón, Coahuila, México.

Editor de sección: Dr. Pablo Preciado Rangel.

### RESUMEN

Los metales pesados en los suelos agrícolas son absorbidos y pueden ser acumulados por los cultivos, representando un riesgo potencial a la salud humana. La presente investigación tuvo como objetivo estudiar la concentración y transferencia de Cd, Cr, Cu, Pb y Zn en lechugas irrigadas con aguas tratadas cultivadas bajo diferentes prácticas agrícolas. Cuatro tratamientos fueron evaluados: 1.- riego rodado sin acolchar sin composta, 2.- riego con cintilla sin acolchar con composta, 3.- riego con cintilla con acolchado sin composta, 4.- riego con cintilla con acolchado con composta. Las concentraciones detectadas de Cd, Cr, Pb y Zn en parte comestible de lechugas rebasaron los niveles máximos permisibles en vegetales que establece la referencia de la Unión Europea. En el caso de Cd, mostró una alta capacidad de transferirse del suelo a la planta, lo que representa un riesgo a la salud aún mayor. Las prácticas agronómicas de riego con cintilla, utilizando agua proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales, acolchado plástico y abonado orgánico reducen discretamente

la concentración e índice de transferencia de Cd, Cr, Cu, Pb y Zn en parte comestible de lechuga debido a que promueven un incremento en la producción de biomasa, lo que a su vez afecta la dilución de los metales pesados en los tejidos de las plantas.

**Palabras clave:** abono, acolchado, elementos traza, hortalizas, riego.

### SUMMARY

Heavy metals can be found in agricultural soils, absorbed and accumulated by crops, representing a public health risk. This research aimed to study the influence of agricultural practices on the concentration of heavy metals cadmium (Cd), chromium (Cr), copper (Cu), lead (Pb), and zinc (Zn) in lettuce irrigated with treated water and determined the level of risk to human health. Four treatments were evaluated: (1) Flood irrigation without mulch and compost; (2) Drip irrigation without mulching with compost; (3) Drip irrigation with mulch without compost; (4) Drip irrigation with mulch and compost. The detected concentrations of Cd,

#### Cita recomendada:

Loredo-Tovías, M., Alcalá-Jáuregui, J. A., García-Arreola, M. E., Carballo-Méndez, F. J., Rodríguez-Fuentes, H., Buendía-García, A., y Rodríguez-Ortiz, J. C. (2022). Concentración y transferencia de metales pesados en lechuga (*Lactuca sativa* L.) irrigadas con aguas tratadas. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-12. e1045. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1045>

Recibido: septiembre 07 de 2021. Aceptado 25 de mayo de 2022.  
Artículo. Volumen 40, julio de 2022.

Cr, Pb and Zn in the edible part of lettuce exceeded the maximum permissible levels in vegetables established by the European Union reference. In the case of Cd, it showed a high capacity to be transferred from the soil to the plant, which represents an even greater health risk. The agronomic practices of drip irrigation, using water from a wastewater treatment plant, plastic mulch and organic fertilizer slightly reduce the concentration and transfer rate of Cd, Cr, Cu, Pb and Zn in the edible part of lettuce, promoting an increase in biomass production, which in turn affects the dilution of heavy metals in plant tissues.

**Index words:** *manure, mulch, trace elements, vegetables, irrigation.*

## INTRODUCCIÓN

Los metales pesados (MP) son un grupo de elementos que se relacionan con efectos perjudiciales para el hombre y otras formas de vida. Cadmio, cromo, mercurio y plomo son considerados los más tóxicos (Sandeep, Vijayalatha y Anitha, 2019). Otros como Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni and Zn, son esenciales para las plantas y el hombre (Alloway, 2013); sin embargo, pueden ser tóxicos si rebasan los límites permisibles que se especifican en las normas de salud.

Los MP pueden circular por los ciclos biogeoquímicos, lo que los hace, con frecuencia, estar presentes y acumularse en los tejidos de los organismos vivos, aún a niveles bajos. Cuando estos metales pesados tóxicos y oligoelementos contaminan el suelo y el agua, ocurre una biomagnificación al ser absorbidos por los vegetales. Al ser consumidos por periodos prolongados, se pueden tener importantes daños a la salud (Danjuma y Abdulkadir, 2018). Existe una amplia evidencia a nivel mundial de la presencia de MP en los alimentos de consumo humano en contenidos considerados como tóxicos (Latif *et al.*, 2018; Manzoor, Griffiths y Lukac, 2018; Noh, Thi y Jeong, 2019; Filippini *et al.*, 2021; Ali, Hossain, Khan, Begum y Osman, 2021).

Una de las principales fuentes de ingreso de MP al suelo agrícola, y, por lo tanto, a las plantas cultivadas, es el agua de riego (García-Carrillo *et al.*, 2020). A nivel mundial, la demanda de agua se incrementa, debido al aumento de la población, el desarrollo económico y la urbanización, mientras que los suministros de agua dulce existentes disminuyen debido al uso excesivo y

al cambio climático (Savchenko, Kecinski, Li y Messer, 2019). Es por ello que en algunos países se ha creado la necesidad de reutilizar aguas residuales tratadas en el riego agrícola debido a su escasez en zonas áridas (Maestre-Valero, González, Martínez y Martin, 2019). Diversos procesos de separación se realizan en las plantas de tratamiento de aguas residuales con el objetivo principal de reducir los efectos nocivos para su reúso en actividades como riego agrícola. Los procesos comprenden, en lo general, la separación de los sólidos suspendidos, la oxidación de la materia orgánica y desinfección contra microorganismos patógenos (*Escherichia coli*, *Salmonella*, *Shigella*, *Vibrio cholera*, virus, hongos y quistes de parásitos). Sin embargo, por razones económicas, solo algunas plantas de tratamiento realizan tratamiento terciario avanzado que tiene como propósito separar sustancias a nivel de moléculas orgánicas e inorgánicas (N, P, metales pesados). Las tecnologías que pueden separar dichas sustancias son la ósmosis inversa, intercambio iónico, nanofiltración, carbón activado y electrodiálisis. Por lo tanto, al no contar con un tratamiento terciario, existe la probabilidad de que algunos metales pesados aún están presentes en las aguas tratadas en concentraciones altas y pueden entrar a la cadena de alimentos. Mahmood y Malik (2014) mencionan que el uso de aguas residuales en comunidades de las provincias de Wagha y Jallo, en India, cambiaron las propiedades fisicoquímicas del suelo, lo que permitió la absorción de metales pesados por cultivos de alimentos, en su mayoría de hortalizas.

La absorción de metales por las plantas puede verse afectada por varios factores del suelo como el pH, la concentración iónica de la solución, la concentración catiónica de metal, capacidad de intercambio catiónico, la presencia de cationes metálicos competitivos y ligandos orgánicos e inorgánicos (Young, 2012). La acumulación en tejido vegetal también depende de la especie vegetal, las variedades y órgano de la planta. Zhou *et al.* (2016) evaluaron 22 especies vegetales comestibles y encontraron que las hortalizas de hoja acumulan más metales pesados que las especies donde la parte comestible son el tallo, la raíz y frutos.

Las prácticas agrícolas que involucran la labranza, el abonado, el riego, etc., son realizadas con el fin de aumentar los rendimientos y calidad de los cultivos. Estas prácticas modifican algunas propiedades físicas y químicas del suelo que, a su vez, pueden propiciar condiciones para una mejor disponibilidad de los presentes en el sistema agua-suelo como la capacidad de

óxido-reducción, retención de humedad, disponibilidad de nutrientes, pH, etc. A pesar del incremento de suelos agrícolas irrigados con aguas que contienen MP provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales sin tratamiento terciario, y las evidencias de altos contenidos de MP en las partes comestibles de algunos cultivos hortícolas, pocos estudios se han realizado para saber la influencia que las prácticas agronómicas tienen en la acumulación. Derakhshan, Faramazian, Mahvi, Hosseini y Miri (2016) señalan que se debe de prestar atención al riesgo potencial para la salud por MP a través de las diversas formas de exposición. Por lo anterior, se propusieron como objetivos el estudiar la influencia de las prácticas agrícolas en la concentración y transferencia de metales pesados Cd, Cr, Cu, Pb y Zn en lechugas irrigadas con aguas tratadas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue realizado en una zona de cultivo que recibe agua para riego de una planta de tratamiento de aguas residuales que aplican un proceso avanzado de lodos activados. La ubicación corresponde a los paralelos 22° 00' y 22° 15' y latitud norte de los meridianos 100° 40' y 101° 00' de longitud oeste del meridiano de Greenwich.

Las prácticas agrícolas que se estudiaron fueron: riego, acolchado y abono orgánico. Estas prácticas se han implementado en la zona en los años recientes, debido a las ventajas que representan en la eficiencia del riego y nutrición. Cuatro tratamientos se establecieron con la combinación de las prácticas:

- 1.- Riego rodado sin acolchar sin composta.
- 2.- Riego con cintilla sin acolchar con composta.
- 3.- Riego con cintilla con acolchado sin composta.
- 4.- Riego con cintilla con acolchado con composta.

Los materiales usados fueron cintilla calibre 5000, acolchado plástico color negro-plata calibre 90 y composta de gallinaza procesada marca Meyfer con dosis de 6 Mg ha<sup>-1</sup> (humedad 20%, pH 7.4, conductividad eléctrica 15.6 dS m<sup>-1</sup>, materia orgánica 37.7%, carbono orgánico 21.9%, N 2.78%, P 3.33%, K 2.78%, Ca 12%, Fe 3885 mg kg<sup>-1</sup>, Cu 45 mg kg<sup>-1</sup>, Mn 658 y Zn 539 mg kg<sup>-1</sup>).

El experimento se realizó bajo un diseño experimental de bloques al azar con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones. Las unidades experimentales consistieron en cinco surcos de 25 m de largo y 0.80 m

de ancho. La parcela útil fue conformada por los tres surcos centrales. La composta se aplicó en el lomo del surco y se mezcló con el suelo, tres días después se trasplantaron plántulas de un mes de edad de la especie *Lactuca sativa* L. cv. Montemar (compañía semillera King Seeds) en una densidad de plantación de cuatro plántulas por metro lineal. La especie hortícola fue elegida como bioindicador en función de su capacidad de acumular metales pesados (Ali *et al.*, 2021).

La fertilización fue la misma en los cuatro tratamientos, la fórmula aplicada fue: 105-45-60, unidades por hectárea de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O, respectivamente. La dosis por elemento fue calculada en función de los requerimientos nutrimentales para producir una tonelada de producto cosechado, donde se estableció una meta de rendimiento de 30 Mg ha<sup>-1</sup> (Castellanos, Uvalle y Aguilar, 2000). La fertilización se dosificó en nueve aplicaciones semanales conforme se muestra en el Cuadro 1. Los fertilizantes que se usaron fueron nitrato de potasio, sulfato de potasio y ácido fosfórico. La humedad del suelo se mantuvo entre 10 y 25 centibares de tensión de humedad del suelo que se midió con tensiómetro de 30 cm de profundidad. La aplicación de los riegos se hizo cada tercer día y al final se aplicó una lámina de 300 mm para riego rodado y 210 mm en riego con cintilla.

Las muestras de agua, para el análisis de metales pesados (MP), se colectaron en botellas de polietileno de alta densidad (HPDE) de 125 mL. Para preservar

**Cuadro 1. Distribución temporal de las unidades fertilizantes.**  
**Table 1. Temporal distribution of fertilizer units.**

DDT	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
0-7	20	5	15
8-14	5	5	5
15-21	5	5	5
22-28	10	5	5
29-35	10	5	5
36-42	15	5	5
43-49	15	5	5
50-56	20	5	5
57-63	5	5	10
TOTAL	105	45	60

DDT= días después del trasplante.

DDT = days after transplant.

los metales en solución se agregó HNO<sub>3</sub> concentrado hasta llegar a un pH ≤ 2. Posteriormente se filtraron las muestras a través de una membrana de poro de 0.45 micras de diámetro, previamente lavada con una disolución de ácido nítrico (1%) y enjuagando con agua tipo I (Resistividad = 18.2 MΩ·cm a 25 °C). Las propiedades del agua de riego fueron: pH 8, conductividad eléctrica 0.958 dS m<sup>-1</sup>, N 15 mg mL<sup>-1</sup>, P 20 mg mL<sup>-1</sup>, Na 92 mg mL<sup>-1</sup>. En cuanto a MP: Cd < 0.0001 µg L<sup>-1</sup>, Cr 3.95 µg L<sup>-1</sup>, Cu 6 µg L<sup>-1</sup>, Pb 13 µg L<sup>-1</sup> y Zn 23.1 µg L<sup>-1</sup>, los valores de Cu, Cr, Pb y Zn no rebasan los niveles máximos permisibles establecidos en la norma oficial mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 (SEMARNAT, 1998), que son de 0.1, 6, 1, 10 y 20 mg L<sup>-1</sup> de Cd, Cr, Cu, Pb y Zn promedio diario, respectivamente.

Las determinaciones de suelo se hicieron y clasificaron conforme la norma mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Las propiedades del suelo fueron: textura franco arcillo arenoso, pH 7.8, conductividad eléctrica 0.81 dS m<sup>-1</sup>, materia orgánica 2%, N 20 mg kg<sup>-1</sup>, P 31 mg kg<sup>-1</sup> y K 78.5 mg kg<sup>-1</sup>. El Cuadro 2, muestra los contenidos de los MP en suelo tanto en forma extraíble como total, se observa que los niveles de metales pesados no rebasan los límites máximos permisibles según la norma mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Cd y Pb se clasifican como no peligrosos según la tolerancia de las plantas. En el caso de Cu y Zn son considerados adecuados para la nutrición de plantas.

## Variables de Respuesta

### Biomasa de Parte Comestible

Las plantas de lechuga llegaron a etapa de cosecha de manera diferente según los tratamientos.

A los 50 días después del trasplante se cosecharon las plantas de los tratamientos 3 y 4 (con acolchado), y a los 57 días se cosecharon las plantas de los tratamientos 1 y 2 (sin acolchado). Ocho plantas por tratamiento y repetición fueron tomadas para las evaluaciones. La parte comestible fue lavada con agua destilada y ácido clorhídrico diluido (HCl al 1%) y se secaron en la estufa a 65 °C durante 48 horas.

### Concentración de Metales Pesados en Lechuga

Las muestras secas del paso anterior se molieron y pasaron por una malla de 1 mm de diámetro y se colocaron en desecadores. La digestión se hizo por digestión húmeda en plato caliente, con una mezcla 3:1 de ácidos HNO<sub>3</sub> (Grado Suprapur, Merck, Darmstadt, Alemania) y HClO<sub>4</sub> ultrex.

Para cuantificar las concentraciones de los elementos en las muestras se utilizó un espectrómetro de masas con plasma inductivamente acoplado ICP-MS, marca Thermo Scientific X series 2 (EPA, 2014). Se utilizó tulio (Tm) e indio (In) como estándar interno, ambos a una concentración de 10 µg L<sup>-1</sup> en la disolución final. Para garantizar la confiabilidad de los datos obtenidos se utilizaron soluciones certificadas unielementales para preparar soluciones multielementales de los analitos Cd, Cr, Pb, Cu y Zn utilizadas en la curva de calibración, el estándar de control utilizado fue una solución multielemental de la marca High Purity Standards, la cual verifica el desempeño instrumental después de medir 10 muestras, con la misma frecuencia se introdujeron los estándares de calibración para verificar que no hubiera sesgo, utilizando como criterio de aceptación recuperaciones de 90-110% (EPA, 2002) y correlaciones lineales mayores a 0.999 (r<sup>2</sup> ≥ 0.999) y una precisión del 95 ± 4%. Todas las concentraciones se expresan en mg de elemento por kg de material vegetal.

**Cuadro 2. Contenido de metales pesados extraíbles y totales del suelo antes de aplicar los tratamientos (mg kg<sup>-1</sup>).**  
**Table 2. Extractable and total heavy metal content of soil before applying the treatments (mg kg<sup>-1</sup>).**

	Cd		Cu		Cr		Pb		Zn	
	Ext.	Total								
Contenidos	1.3	2.4	0.45	11.67	0.01	3.88	7.47	104.2	8.4	74.5
V.R.N.	-	-	>0.2	-	-	-	-	-	>1	-
V.R.T.	0.35	-	-	-	-	-	35	-	-	-

V.R.N. = valor de referencia nutricional; V.R.T. = valor de referencia tolerable; Ext. = extraíbles.  
V.R.N. = nutritional reference value; V.R.T. = tolerable reference value; Ext. = extractables.

La repetibilidad se obtuvo como resultado proporcional de las desviaciones estándar relativas de cinco repeticiones observadas para cada uno de los elementos Cd, Cr, Cu, Pb y Zn. Los límites de detección y cuantificación fueron determinados experimentalmente empleando patrones con concentraciones desde  $0.05 \mu\text{g L}^{-1}$ , utilizando para ello la guía Eurachem (Magnusson y Örnemark, 2014). El coeficiente de determinación ( $r^2$ ), se llevó a cabo mediante el análisis de regresión lineal, empleando los datos que se obtienen de la curva de calibración obteniendo un valor de  $r^2 \geq 0.999$ .

El control de calidad analítico se llevó a cabo preparando materiales de referencia certificados leídos como estándares de control cada 10 muestras, para evaluar el desempeño instrumental. También se usaron materiales de referencia certificados de tejido vegetal de hojas de tomate, Tomato leaves NIST<sup>®</sup> SRM<sup>®</sup> 1573a, para evaluar la eficiencia del tratamiento de digestión mediante la prueba de porcentaje de recuperación.

### Factor de Transferencia

El factor de transferencia (FT) considera la capacidad de las plantas de transferir un metal pesado (MP) del suelo a la planta. Fue calculado con la siguiente Ecuación 1:

$$\text{FT} = \frac{\text{concentración de MP en planta}}{\text{concentración de MP en suelo}} \quad (1)$$

**Cuadro 3. Coeficientes de los contrastes ortogonales e hipótesis.**  
**Table 3. Coefficients of orthogonal contrasts and hypotheses.**

Contraste	Descripción	T1	T2	T3	T4	Hipótesis
C1	Riego rodado (T1)					
	contra Riego por cintilla (T2, T3, T4)	3	-1	-1	-1	Ho: T1-T2+T3+T4=0 Ha: T1-T2+T3+T4≠0
C2	Sin acolchado plástico (T1, T2)					
	contra Con acolchado plástico (T3, T4)	1	1	-1	-1	Ho: T1+T2-T3+T4=0 Ha: T1+T2-T3+T4≠0
C3	Sin composta (T1, T3)					
	contra Con composta (T2, T4)	1	-1	1	-1	Ho: T1+T3-T2+T4=0 Ha: T1+T3-T2+T4≠0

### Contenido Total de Metales Pesados (MP) por Planta

El contenido total de MP por planta (CT), es la cantidad absoluta de MP presente en la parte comestible del producto. Fue calculado con la Ecuación 2:

$$\text{CT} = \text{concentración de MP en parte comestible (mg kg}^{-1}) \times \text{peso seco de parte comestible (g planta}^{-1}) \quad (2)$$

### Análisis Estadístico

Los datos fueron sometidos a un análisis de varianza y posteriormente se compararon mediante contrastes ortogonales. Tres contrastes ortogonales fueron llevados a cabo: contraste 1 (C1) comparó el riego rodado contra riego por cintilla; contraste 2 (C2) comparó suelo sin acolchado plástico contra suelo con acolchado plástico, y el contraste 3 (C3) comparó la aplicación de composta contra no aplicación de composta. El Cuadro 3 muestra los coeficientes de los contrastes ortogonales e hipótesis. El programa que se utilizó para los análisis estadísticos fue el Statistical Analysis Software (SAS) versión 22 (IBM, 2013).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las comparaciones ortogonales se muestran en el Cuadro 4, en donde se observan diferencias significativas en la mayoría de las variables estudiadas en los tres contrastes ortogonales.

**Cuadro 4. Diferencias significancias (*p*) de las comparaciones ortogonales.**  
**Table 4. Differences in significance (*p*) of orthogonal comparisons.**

Variable	C1	C2	C3
	Riego rodado contra Riego con cintilla	Surco sin acolchado contra Surco con acolchado	Sin composta contra Con composta
Peso seco	0.000	0.000	0.001
Concentración Cd	0.001	0.000	ns
Contenido total Cd planta <sup>-1</sup>	ns	ns	ns
Transferencia Cd	0.009	0.003	0.027
Concentración Cr	ns	ns	ns
Contenido total Cr planta <sup>-1</sup>	ns	0.006	0.008
Transferencia Cr	ns	ns	ns
Concentración Cu	0.009	0.000	ns
Contenido total Cu planta <sup>-1</sup>	0.001	ns	0.005
Transferencia Cu	ns	0.005	ns
Concentración Pb	0.001	0.005	0.000
Contenido total Pb planta <sup>-1</sup>	0.024	ns	0.001
Transferencia Pb	0.000	0.000	0.000
Concentración Zn	0.013	ns	0.029
Contenido total Zn planta <sup>-1</sup>	0.017	0.000	0.018
Transferencia Zn	0.012	ns	0.016

ns = no significativo.

ns = not significant.

### Biomasa Parte Comestible

El peso seco de la parte comestible de las lechugas fue favorecido por el riego por cintilla, el acolchado y la aplicación de composta (Figura 1). Tales prácticas agronómicas son ampliamente conocidas por sus beneficios que se reflejan en el rendimiento de los cultivos.

El uso de cintilla garantiza el mantenimiento adecuado de humedad en el suelo lo que contribuye a una mayor conductancia estomática la cual beneficia la fotosíntesis y, por lo tanto, incrementa el crecimiento de las plantas (Jin, Hou, Zhong y Qiu, 2018).

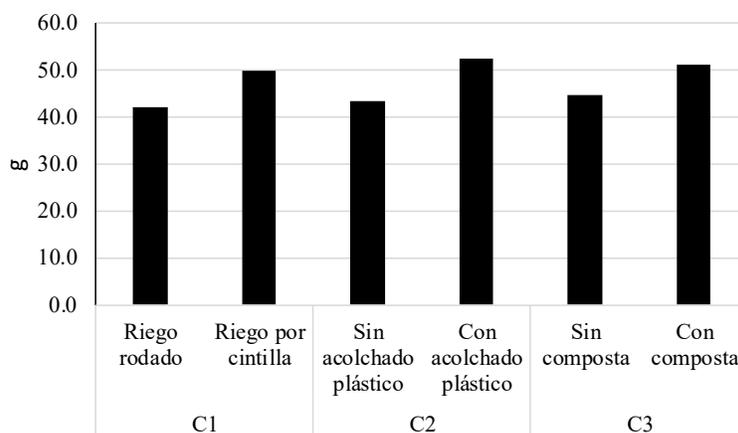
El acolchado plástico tiende a alterar el microambiente del suelo cambiando las condiciones hidrotérmicas del suelo, lo anterior obedece a la reducción de la evaporación del mismo y al aumento de la infiltración del agua. Los cambios que provoca el acolchado en la humedad y la temperatura del suelo inducen mayores efectos sobre la producción de enzimas extracelulares como la ureasa y la catalasa (Wang *et al.*,

2021). Estas enzimas en el suelo son esenciales para la transformación de energía y la absorción de nutrientes por las plantas.

La aplicación de abonos orgánicos tiene un impacto directo en el medio de crecimiento dado que incrementa y diversifica la presencia de microorganismos, aumenta el contenido de materia orgánica, la capacidad de campo y la porosidad total, mientras que disminuye la densidad aparente (Lin *et al.*, 2019). Como consecuencia de los diversos organismos en el suelo existe un control de organismos potencialmente dañinos para las plantas, además de una mayor disponibilidad de elementos esenciales en la solución del suelo, lo que en conjunto beneficia el crecimiento de las plantas (Liu *et al.*, 2018).

### Concentración de Metales Pesados (MP)

Los resultados mostrados en los Cuadros del 5 al 9, se observa que las prácticas agronómicas afectaron significativamente la concentración de MP en la parte comestible de las lechugas.



**Figura 1. Producción de la biomasa en peso seco de parte comestible de lechugas por contraste ortogonal.**

**Figure 1. Biomass production in dry weight of edible part of lettuce by orthogonal contrast.**

La lechuga es considerada una especie con una capacidad alta de acumulación de metales pesados (Ali *et al.*, 2021). Esta capacidad la podemos corroborar debido a que cuatro de los cinco MP en estudio rebasaron los límites máximos permisibles fijados por la Unión Europea (EU, 2006), solo en Cu fue la excepción (Cuadro 7). El caso más significativo fue el Cd donde encontramos valores de 5.02-5.94 siendo 0.2 el valor máximo permisible (Cuadro 5). En Cr se excedió el LMP en un 22-36%, los valores encontrados fueron de 1.22-1.36 cuando el LMP es de 1 (Cuadro 6). En cuanto a Pb, los valores encontrados en las plantas fueron de 4 a 6 veces más que el LMP (Cuadro 8). En Zn los valores rebasaron el LMP en >18% (Cuadro 9).

La concentración de MP sigue un patrón general de incrementarse al utilizar riego rodado, sin acolchado y sin composta, la excepción se da en Cr donde no hubo diferencias significativas en las tres comparaciones. Por lo tanto, el uso de cintilla de riego con acolchado y aplicación de abono pudieron reducir los niveles de MP. La cintilla pudo reducir un 12, 10, 4.6, 25 y 5% la concentración de Cd, Cr, Cu, Pb y Zn, respectivamente, en comparación con el riego rodado. El acolchado plástico pudo reducir en un 13, 5.5, 14 y 19% la concentración de Cd, Cr, Cu y Pb, respectivamente, en comparación al tratamiento sin acolchar; y la aplicación de abonado orgánico pudo reducir en un 9, 6, 29 y 4% la concentración de Cd, Cu, Pb y Zn, respectivamente, en comparación al tratamiento sin abonado.

**Cuadro 5. Resultados de los contrastes entre riego rodado contra riego por cintilla en las variables de cadmio (Cd).**  
**Table 5. Results of the contrasts between flood vs drip irrigation in cadmium (Cd) variables.**

Contraste	Descripción	Concentración Cd*	Transferencia Cd	Contenido total Cd
		mg kg <sup>-1</sup>		µg planta <sup>-1</sup>
C1	Riego rodado	5.94	2.476	249.93
	Riego por cintilla	5.22	2.177	258.59
C2	Sin acolchado plástico	5.78	2.410	250.63
	Con acolchado plástico	5.02	2.094	262.23
C3	Sin composta	5.65	2.355	252.09
	Con composta	5.15	2.149	260.77

\* Límite máximo permisible = 0.2 (UE, 2002).

\* Maximum permissible limit = 0.2 (UE, 2002).

**Cuadro 6. Resultados de los contrastes entre riego rodado contra riego por cintilla en las variables de cromo (Cr).**  
**Table 6. Results of the contrasts between flood vs drip irrigation in chrome (Cr) variables.**

Contraste	Descripción	Concentración Cr*	Transferencia Cr	Contenido total Cr
		mg kg <sup>-1</sup>		µg planta <sup>-1</sup>
C1	Riego rodado	1.36	0.350	57.25
	Riego por cintilla	1.22	0.316	61.35
C2	Sin acolchado plástico	1.29	0.332	55.77
	Con acolchado plástico	1.22	0.316	64.88
C3	Sin composta	1.25	0.324	56.00
	Con composta	1.25	0.325	64.65

\* Límite máximo permisible = 1 (UE, 2002).

\* Maximum permissible limit = 1 (UE, 2002).

Lo anterior es explicable debido a que el riego por cintilla, acolchado y abonado, provocan un incremento de peso seco, como se mencionó anteriormente (Figura 1), donde los MP se diluyen en la biomasa de la parte comestible de las plantas. Diversos autores respaldan lo anterior, en el sentido que a mayor rendimiento agronómico menor concentración de MP o viceversa. Al respecto, Shahid *et al.* (2015) señalan que los MP reducen la productividad de los cultivos al inducir efectos nocivos en varios procesos fisiológicos en la planta como el crecimiento y fotosíntesis, y a nivel celular se producen especies reactivas de oxígeno alterando el equilibrio redox y provocando estrés oxidativo. Por su parte, Xuan (2015) reporta un decremento del rendimiento en lechugas al incrementar

los MP en el suelo. Encontró que las plantas de lechuga redujeron el rendimiento en 0, 12, 21 y 43% al ser cultivadas en suelo con 0, 50, 100 y 200 mg kg<sup>-1</sup> de Cu, respectivamente. En Pb los rendimientos disminuyeron en 0, 23, 59 y 71% con dosis de 0, 50, 100 y 200 mg kg<sup>-1</sup> de Pb, respectivamente. En Zn los rendimientos se afectaron en 0, 20 y 31% con dosis de 0, 300 y 500 mg kg<sup>-1</sup> de Zn, respectivamente.

Los MP causan formación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y radicales libre que conducen a una incontrolada oxidación y reacciones en cadena de radicales, que en última instancia dañan las biomoléculas celulares como ácidos nucleicos, lípidos y proteínas (Phaniendra, Jestadi y Periyasamy, 2015). La lechuga posee tolerancia a elementos potencialmente

**Cuadro 7. Resultados de los contrastes entre riego rodado contra riego por cintilla en las variables de COBRE (Cu).**  
**Table 7. Results of the contrasts between flood vs drip irrigation in copper (Cu) variables.**

Contraste	Descripción	Concentración Cu*	Transferencia Cu	Contenido total Cu
		mg kg <sup>-1</sup>		µg planta <sup>-1</sup>
C1	Riego rodado	5.58	0.479	234.71
	Riego por cintilla	5.32	0.456	262.02
C2	Sin acolchado plástico	5.79	0.497	251.54
	Con acolchado plástico	4.97	0.427	258.83
C3	Sin composta	5.51	0.473	246.07
	Con composta	5.26	0.451	264.31

\* Límite máximo permisible = 20 (UE, 2002).

\* Maximum permissible limit = 20 (UE, 2002).

**Cuadro 8. Resultados de los contrastes entre riego rodado contra riego por cintilla en las variables de plomo (Pb).**  
**Table 8. Results of the contrasts between flood vs drip irrigation in lead (Pb) variables.**

Contraste	Descripción	Concentración Pb*	Transferencia Pb	Contenido total Pb
		mg kg <sup>-1</sup>		µg planta <sup>-1</sup>
C1	Riego rodado	2.53	0.024	106.62
	Riego por cintilla	1.90	0.018	93.12
C2	Sin acolchado plástico	2.28	0.022	98.38
	Con acolchado plástico	1.84	0.018	94.62
C3	Sin composta	2.41	0.023	107.33
	Con composta	1.71	0.016	85.66

\* Límite máximo permisible = 1 (UE, 2002).

\* Maximum permissible limit = 1 (UE, 2002).

tóxicos (metales esenciales y no esenciales), tiene la capacidad de crecer y desarrollarse en ambientes con concentraciones elevadas de elementos potencialmente tóxicos. Los cambios evolutivos que han dado origen a la tolerancia se deben al desarrollo de una serie de mecanismos eficientes y específicos (procesos adaptativos) que permiten mantener la toma de elementos esenciales dentro de intervalos fisiológicos permisibles, además de proporcionar la capacidad de inactivar metabólicamente los elementos esenciales y no esenciales cuando representan un riesgo para la integridad celular (González y Zapata, 2008).

El abono orgánico, aplicado en el tratamiento cuatro, tuvo un papel dual en la respuesta de las plantas. Por un lado, pudo aportar nutrientes elementales a las plantas

y promover su crecimiento, por otro lado, reducir la biodisponibilidad de MP debido al alto contenido de materia orgánica y altas concentraciones de P y Fe. En el caso del P la inmovilización de MP es debida, principalmente, a la formación de precipitados metal-fosfatos (Hashimoto, Takaoka, Oshita, Tanida, 2009). En el caso del Fe, Zhang *et al.* (2013), mencionan que la ferrihidrita provee sitios de retención (grupos hidroxilos) para la adsorción de cationes de metales pesados. Chen *et al.* (2019), reportan que la aplicación de un mejorador con 20% de materia orgánica redujo significativamente, en promedio, un 56% el contenido de Cd en granos de trece diferentes variedades de arroz. Otros factores también afectan la absorción de MP, es conocido que un pH >7 reduce la absorción de MP,

**Cuadro 9. Resultados de los contrastes entre riego rodado contra riego por cintilla en las variables de zinc (Zn).**  
**Table 9. Results of the contrasts between flood vs drip irrigation in zinc (Zn) variables.**

Contraste	Descripción	Concentración Zn*	Transferencia Zn	Contenido total Zn
		mg kg <sup>-1</sup>		µg planta <sup>-1</sup>
C1	Riego rodado	62.44	0.838	2625.85
	Riego por cintilla	59.30	0.796	2973.75
C2	Sin acolchado plástico	59.26	0.796	2565.23
	Con acolchado plástico	60.90	0.818	3208.32
C3	Sin composta	61.23	0.822	2738.34
	Con composta	58.94	0.791	3035.21

\* Límite máximo permisible = 0.43 (UE, 2002).

\* Maximum permissible limit = 0.43 (UE, 2002).

esto pudo suceder en este ensayo donde el pH del suelo fue de 7.8. La conductividad eléctrica es otro factor que afecta la absorción de MP, la tendencia es que las sales incrementan los MP en las plantas. Sin embargo, Usman (2015) encontró que este efecto se reduce significativamente cuando se aplica abono orgánico en un suelo con altos niveles de sales.

### **Factor de Transferencia (FT)**

El FT de los metales pesados (MP) en el suelo a las plantas indica el potencial de un MP presente en el suelo de pasar a la cadena alimentaria, o bien, la habilidad de una planta de absorber los MP del suelo. Es importante para la salud humana, ya que, a menor valor de FT, el riesgo se reduce. Valores mayores a 1 significan que la planta tiene una elevada capacidad de acumular MP (Romeh, 2021).

Las prácticas agronómicas afectaron esta variable en cuatro de los cinco MP estudiados. En general, el riego rodado sin acolchar y sin composta promueven un mayor FT. Por el contrario, el uso de cintilla de riego con acolchado y aplicación de composta pueden reducir el FT. La cintilla pudo reducir un 12, 11, 5, 25 y 5.7% la concentración de Cd, Cr, Cu, Pb y Zn, respectivamente, en comparación con el riego rodado. El acolchado plástico puede reducir en un 17, 5, 14 y 18% la concentración de Cd, Cr, Cu y Pb, respectivamente, en comparación con el tratamiento sin acolchar. La aplicación de abonado orgánico puede reducir en un 9, 0, 4.6, 30 y 4% la concentración de Cd, Cu, Pb y Zn, respectivamente, en comparación al tratamiento sin abono (Cuadros 5 al 9).

Los valores de FT en los MP se redujeron en el siguiente orden: Cd>Zn>Cu>Cr>Pb. En el caso de Cr, Cu, Pb y Zn fueron menor a 1, sin embargo, en Cd se tuvo valores de FT >2.

Xuan (2015), encontró los siguientes valores de FT en lechuga: 0.16, 0.19, 0.12 y 0.08 cuando se cultivó en suelo con dosis de 0, 50, 100 y 200 mg kg<sup>-1</sup> Cu, respectivamente. En Pb los FT fueron de 0.06, 0.04, 0.02 y 0.02 cuando se cultivó en suelo con dosis de 0, 50, 100 y 200 mg kg<sup>-1</sup> Pb, respectivamente. En Zn los FT fueron de 0.7, 0.4, 0.09 y 0.08 cuando se cultivó en suelo con dosis de 0, 100, 300 y 500 mg kg<sup>-1</sup> Zn, respectivamente. Tales resultados son mayores en Cu y Zn, y similares en Pb en comparación a nuestros resultados.

Las variaciones en el FT de los MP están relacionadas con la capacidad de absorción de cada vegetal, las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos (Mahmud, Salam, Khan y Rahman, 2021). Sin embargo, consideramos que la lechuga, como especie vegetal, fue el factor más relevante en los resultados que obtuvimos. La capacidad de esta especie para absorber MP del suelo ha sido ampliamente documentada, encontrando diferencias aún entre genotipos (Alves, dos Reis y Gratão, 2016). Fisiológicamente, la lechuga posee una elevada tasa de transpiración para mantener el crecimiento y el contenido de humedad de la planta, lo que puede explicar la alta absorción de MP (Lato, Radulov, Berbecea, Lato y Crista, 2012).

### **CONCLUSIONES**

Las concentraciones detectadas de Cd, Cr, Pb y Zn en parte comestible de lechugas rebasaron los niveles máximos permisibles en vegetales que establece la referencia de la Unión Europea. En el caso de Cd, mostró una alta capacidad de transferirse del suelo a la planta, lo que representa un riesgo a la salud aún mayor.

Las prácticas agronómicas de riego con cintilla, utilizando agua proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales, acolchado plástico y abonado orgánico reducen discretamente la concentración e índice de transferencia de Cd, Cr, Cu, Pb y Zn en parte comestible de lechuga debido a que promueven un incremento en la producción de biomasa, lo que a su vez afecta la dilución de los metales pesados en los tejidos de las plantas.

### **DECLARACIÓN DE ÉTICA**

No aplicable.

### **CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN**

No aplicable.

### **DISPONIBILIDAD DE DATOS**

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, metodología, análisis de laboratorio, escritura y revisión: M.L.T. Conceptualización, metodología, análisis estadístico, escritura y revisión: J.C.R.O. Metodología, análisis estadístico, software, escritura y revisión: J.A.A.J. Análisis de laboratorio: M.E.G.A. Análisis estadístico, software, escritura y revisión: F.J.C.M. Escritura, preparación del borrador original, revisión y edición: H.R.F.

## AGRADECIMIENTOS

Laboratorios de Análisis de Suelos de las Facultades de Agronomía- Veterinaria y Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México.

## LITERATURA CITADA

- Ali, M. M., Hossain, D., Khan, M. S., Begum, M., & Osman, M. H. (2021). Environmental pollution with heavy metals: A public health concern. In M. K. Nazal, & H. Zhao (Eds.). *Heavy metals. Their environmental impacts and mitigation*. Intech Open. <https://doi.org/10.5772/intechopen.96805>
- Alloway, B. J. (2013). Heavy metals and metalloids as micronutrients for plants and animals. In B. J. Alloway (Ed.). *Heavy metals in soils* (pp. 195-209). Dordrecht: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7\\_7](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7_7)
- Alves, L. R., dos Reis, A. R., & Gratão, P. L. (2016). Heavy metals in agricultural soils: From plants to our daily life. *Científica*, 44(3), 346-361. <http://dx.doi.org/10.15361/1984-5529.2016v44n3p346-361>
- Castellanos, J. Z., Uvalle B., J. X., & Aguilar S., A. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas agrícolas, plantas y ECP*. México: INCAPA.
- Chen, L., Wu, W., Han, F., Li, J., Ye, W., Fu, H., ... Wang, Q. (2019). Agronomic management and rice varieties controlling Cd bioaccumulation in rice. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(13), 2376. <https://doi.org/10.3390/ijerph16132376>
- Danjuma, M. S., & Abdulkadir, B. (2018). Bioaccumulation of heavy metals by leafy vegetables grown with industrial effluents: A review. *Bayero Journal of Pure and Applied Sciences*, 11(2), 180-185. <https://doi.org/10.4314/BAJOPAS.V11I2.23>
- Derakhshan, Z., Faramarziyan, M., Mahvi, A. H., Hosseini, M. S., & Miri, M. (2016). Assessment of heavy metals residue in edible vegetables distributed in Shiraz, Iran. *Journal of food quality and Hazards Control*, 3(1), 25-29.
- EPA (United States, Environmental Protection Agency). (2002). *Contract Laboratory Program National Functional Guidelines for Inorganic Data Review*, EPA 540/R-01/008. Washington, DC, USA: EPA.
- EPA (United States, Environmental Protection Agency). (2014). *Method 6020B (SW-846): Inductively coupled plasma-mass spectrometry*. Revision 2. Washington, DC, USA: EPA.
- European Union. (2006). Commission Regulation (EC) No. 1881/2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. *Official Journal of the European Union L*, 364, 5-24.
- Filippini, M., Baldisserotto, A., Menotta, S., Fedrizzi, G., Rubini, S., Gigliotti, D., ... Vertuani, S. (2021). Heavy metals and potential risks in edible seaweed on the market in Italy. *Chemosphere*, 263, 127983. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127983>
- García-Carrillo, M., Luna-Ortega, J. G., Gallegos-Robles, M. Á., Preciado-Rangel, P., Cervantes-Vázquez, M. G., & González-Salas, U. (2020). Impacto de aguas residuales sobre algunas propiedades y acumulación de metales pesados en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 38(4), 907-916. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.556>
- González-Mendoza, D., & Zapata-Perez, O. (2008). Mechanisms of tolerance to potentially toxic elements in plants. *Botanical Sciences*, (82), 53-61. <https://doi.org/10.17129/botsci.1781>
- Hashimoto, Y., Takaoka, M., Oshita, K., & Tanida, H. (2009). Incomplete transformations of Pb to pyromorphite by phosphate-induced immobilization investigated by X-ray absorption fine structure (XAFS) spectroscopy. *Chemosphere*, 76(55), 616-622. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.04.049>
- IBM. (2013). IBM SPSS for Windows, version 22.0. Armonk, NY, USA: IBM Corp.
- Jin, Q., Hou, M., Zhong, F., & Qiu, D. (2018). Effects of drip irrigation and bioorganic fertilizer application on plant growth and soil improvement. *Fresenius Environmental Bulletin*, 27(10), 6993-7002.
- Latif, A., Bilal, M., Asghar, W., Azeem, M., Ahmad, M. I., Abbas, A., Ahmad, M. Z., & Shahzad, T. (2018). Heavy metal accumulation in vegetables and assessment of their potential health risk. *Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 5(234), 2380-2391. <https://doi.org/10.4172/2380-2391.1000234>
- Lato, A., Radulov, I., Berbeca, A., Lato, K., & Crista, F. (2012). The transfer factor of metals in soil-plant system. *Research Journal of Agricultural Science*, 44, 67-72.
- Lin, W., Lin, M., Zhou, H., Wu, H., Li, Z., & Lin, W. (2019). The effects of chemical and organic fertilizer usage on rhizosphere soil in tea orchards. *PLoS One*, 14(5), e0217018. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217018>
- Liu, H., Xiong, W., Zhang, R., Hang, X., Wang, D., Li, R., & Shen, Q. (2018). Continuous application of different organic additives can suppress tomato disease by inducing the healthy rhizospheric microbiota through alterations to the bulk soil microflora. *Plant and soil*, 423, 229-240. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3504-6>
- Maestre-Valero, J. F., González-Ortega, M. J., Martínez-Álvarez, V., & Martín-Gorriz, B. (2019). The role of reclaimed water for crop irrigation in southeast Spain. *Water Supply*, 19(5), 1555-1562. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.024>

- Magnusson, B., & Örnemark, U. (Eds). (2014). *Eurachem guide: The fitness for purpose of analytical methods – A laboratory guide to method validation and related topics*. (2<sup>nd</sup> ed.). ISBN: 978-91-87461-59-0. Available from <http://www.eurachem.org>.
- Mahmood, A., & Malik, R. N. (2014). Human health risk assessment of heavy metals via consumption of contaminated vegetables collected from different irrigation sources in Lahore, Pakistan. *Arabian Journal of Chemistry*, 7(1), 91-99. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.07.002>
- Mahmud, U., Salam, M. T. B., Khan, A. S., & Rahman, M. M. (2021). Ecological risk of heavy metal in agricultural soil and transfer to rice grains. *Discover Materials*, 1, 10. <https://doi.org/10.1007/s43939-021-00010-2>
- Manzoor, S. A., Griffiths, G., & Lukac, M. (2018). Species distribution model transferability and model grain size–finer may not always be better. *Scientific Reports*, 8, 7168. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25437-1>
- Noh, K., Thi, L. T., & Jeong, B. R. (2019). Particulate matter in the cultivation area may contaminate leafy vegetables with heavy metals above safe levels in Korea. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(25), 25762-25774. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05825-4>
- Phaniendra, A., Jestadi, D. B., & Periyasamy, L. (2015). Free radicals: properties, sources, targets, and their implication in various diseases. *Indian Journal of Clinical Biochemistry*, 30(1), 11-26. <https://doi.org/10.1007/s12291-014-0446-0>
- Romeh, A. A. (2021). Potential risks from the accumulation of heavy metals in canola plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(1), 52529-52546. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14330-6>
- Sandeep, G., Vijayalatha, K. R., & Anitha, T. (2019). Heavy metals and its impact in vegetable crops. *International Journal of Chemical Studies*, 7(1), 1612-1621.
- Savchenko, O. M., Kecinski, M., Li, T., & Messer, K. D. (2019). Reclaimed water and food production: Cautionary tales from consumer research. *Environmental Research*, 170, 320-331. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.12.051>
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (1998). Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. *Diario Oficial de la Federación*. D. F.: SEGOB.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 antes NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*. D. F.: SEGOB.
- Shahid, M., Khalid, S., Abbas, G., Shahid, N., Nadeem, M., Sabir, M., Aslam, M., & Dumat, C. (2015). Heavy metal stress and crop productivity. In K. R. Hakeem (Ed.). *Crop production and global environmental issues* (pp.1-25). Switzerland: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-23162-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-23162-4_1)
- SIAP-SADER (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera-Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). (2020). *Panorama Agroalimentario 2020* (pp. 8). Ciudad de México, México: SIAP-SADER.
- Usman, A. R. A. (2015). Influence of NaCl-Induced salinity and Cd toxicity on respiration activity and Cd availability to barley plants in farmyard manure-amended soil. *Applied and Environmental Soil Science*, ID 483836. <https://doi.org/10.1155/2015/483836>
- Wang, X., Wang, G., Guo, T., Xing, Y., Mo, F., Wang, H., Fan, J., & Zhang, F. (2021). Effects of plastic mulch and nitrogen fertilizer on the soil microbial community, enzymatic activity and yield performance in a dryland maize cropping system. *European Journal of Soil Science*, 72(1), 400-412. <https://doi.org/10.1111/ejss.12954>
- WHO-FAO (World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations & Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives). (2011). *Evaluation of certain contaminants in food: seventy-second [72nd] report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives*. Meeting (72nd) Rome, Italy: World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/44514>
- Xuan-Cu, N. (2015). The effects of heavy metals, phosphate, lime and sawdust on plant growth and heavy metal accumulation by lettuce. *Journal of Agricultural and Biological Science*, 10(6), 241-246.
- Young, S. D. (2012). Chemistry of heavy metals and metalloids in soils. In B. J. Alloway (Ed.). *Heavy metals in soils* (pp. 51-96). Dordrecht: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7_3)
- Zhang, X., Wang, H., He, L., Lu, K., Sarmah, A., Li, J., ... Huang, H. (2013). Using biochar for remediation of soils contaminated with heavy metals and organic pollutants. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(12), 8472-8483. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1659-0>
- Zhou, H., Yang, W. T., Zhou, X., Liu, L., Gu, J. F., Wang, W. L., ... Liao, B. H. (2016). Accumulation of heavy metals in vegetable species planted in contaminated soils and the health risk assessment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(3), 289. <https://doi.org/10.3390/ijerph13030289>