

Impacto de aguas residuales sobre algunas propiedades y acumulación de metales pesados en el suelo

Impact of wastewater on soil properties and accumulation of heavy metals

Mario García-Carrillo¹ , J. Guadalupe Luna-Ortega^{2*} , Miguel Ángel Gallegos-Robles³ , Pablo Preciado-Rangel¹ , María Gabriela Cervantes-Vázquez³  y Uriel González-Salas³ 

¹ Departamento de Suelos, Coordinación de Agronomía, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna. Periférico Raúl López Sánchez. 27059 Torreón, Coahuila, México.

² Universidad Politécnica de la Región Laguna. Carretera a antiguo internado en Santa Teresa. 27942 San Pedro de las Colonias, Coahuila, México.

* Autor para correspondencia (lupe_lunao@yahoo.com.mx)

³ Facultad de Agricultura y Zootecnia. Universidad Juárez del Estado de Durango. Carretera Gómez Palacio-Tlahualilo km 32, ejido Venecia. 35000 Gómez Palacio, Durango, México.

RESUMEN

El uso de aguas residuales para el riego de cultivos agrícolas es una práctica que se ha incrementado en los últimos años; sin embargo, su uso prolongado puede causar degradación y contaminación del suelo. El objetivo del presente estudio fue determinar el efecto del uso de aguas residuales cruda, tratada y mezclada (relación 1:1), sobre la densidad aparente (Da), potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico (CIC), materia orgánica (MO), porcentaje de sodio intercambiable (PSI), concentración de cobre (Cu), plomo (Pb) y cadmio (Cd) a tres profundidades del suelo. La investigación fue realizada en terrenos irrigados durante un periodo de 10 años con estas clases de agua. Los resultados indican diferencias significativas entre las fuentes de agua evaluadas para el caso de la Da con valores de 1.21, 1.25, y 1.50 g cm⁻³, para los suelos irrigados con agua residual cruda, tratada y mezclada, respectivamente. Altamente significativas para el pH con resultados de 8.04 y 8.60 para los terrenos regados con agua residual cruda y tratada y el PSI del suelo con porcentajes de 1.64, 4.64 y 6.44 para el agua residual cruda, tratada y mezclada, respectivamente. Las más altas concentraciones de Cu, Pb y Cd, fueron 1.48, 2.91 y 0.16 mg kg⁻¹ para el suelo regado con agua residual cruda, sin superar los límites máximos permisibles

establecidos en la Norma Oficial Mexicana. Los valores más altos de Da se observaron en la profundidad 60-90 cm para el agua residual cruda y tratada con valores de 1.32 y 1.42 g cm⁻³ respectivamente. En la concentración de Pb y Cu, los valores más altos se observaron en la profundidad de 0-30 cm con valores de 2.26 y 1.44 mg kg⁻¹, respectivamente. La utilización de agua residual cruda modifica negativamente las propiedades físico-químicas e incrementa metales pesados en los primeros estratos del suelo.

Palabras clave: *agua tratada, contaminación, degradación.*

SUMMARY

Nationally, the use of sewage water for irrigation of agricultural crops has increased over the last twenty years. However, its prolonged use can cause soil degradation and pollution. The objective of this study was to determine the effect of untreated, treated and mixed (1:1 ratio) sewage water on bulk density (Da), hydrogen potential (pH), electric conductivity (CE), cationic exchange capacity (CIC), organic matter (MO), exchangeable sodium percent (PSI) and concentrations of copper (Cu), lead (Pb), and cadmium (Cd) at three soil depths. The investigation was conducted in soils irrigated with sewage water for ten years. The results

Cita recomendada:

García-Carrillo, M., J. G. Luna-Ortega, M. Á. Gallegos-Robles, P. Preciado-Rangel, M. G. Cervantes-Vázquez. 2020. Impacto de aguas residuales sobre algunas propiedades y acumulación de metales pesados en el suelo. *Terra Latinoamericana* 38: 907-916.

DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.556>

Recibido: 17 de mayo de 2019.

Aceptado: 10 de marzo de 2020.

Publicado como Nota de Investigación en *Terra Latinoamericana* 38: 907-916.

indicate significant differences among types of water in Da with values of 1.21, 1.25 and 1.50 g cm⁻³, for the soils irrigated with untreated, treated and mixed sewage water, respectively. Highly significant differences in pH were found: 8.04, 8.60 for the soils irrigated with untreated and treated sewage water. Soil PSI had percentages of 1.64, 4.64 and 6.44 for untreated, treated, and mixed sewage water, respectively. The highest concentrations of copper, lead and cadmium were 1.48, 2.91 y 0.16 mg kg⁻¹ in soil irrigated with untreated sewage water without exceeding the maximum permissible limits established in the Official Mexican Standard. The highest values of Da were observed at depth 60-90 cm for untreated and treated sewage water with values of 1.32 and 1.42 g cm⁻³, respectively. The highest concentrations of Pb and Cu were observed at the depth of 0-30 cm with values of 2.26 and 1.44 mg kg⁻¹, respectively. The use of untreated sewage water negatively modifies soil physical-chemical properties and increases heavy metal content in the topsoil.

Index words: *treated water, contamination, degradation.*

INTRODUCCIÓN

A nivel nacional el uso de aguas residuales municipales para el riego de cultivos agrícolas se ha incrementado en los últimos años, principalmente en municipios como Tula (Hidalgo), Valle de Juárez (Chihuahua), Valsequillo (Puebla), Pabellón (Aguascalientes) y Durango (Durango) entre otros, debido al abatimiento de los mantos acuíferos y a la escasez de fuentes alternas de abastecimiento (Cisneros y Saucedo, 2016).

En México existen 2287 plantas de tratamiento de agua residual municipal en operación, tratando 105.9 m³ seg⁻¹, lo que representa el 50.2% de cobertura nacional (CONAGUA, 2014). El uso del agua residual tratada puede ser una estrategia para el riego de cultivos agrícolas (Agrafioti y Diamadopoulou, 2012), disminuir el impacto del efecto climático (Trinh *et al.*, 2013) y mitigar la desertificación (Barbosa *et al.*, 2015), principalmente en las zonas áridas y semiáridas (Mizyed, 2013); sin embargo, es necesaria información sobre la generación, tratamiento y uso del agua residual (Sato *et al.*, 2013) así como considerar las políticas institucionales para reducir los riesgos de su uso en la agricultura (Qadir *et al.*, 2010).

Numerosos estudios han demostrado que el uso del agua residual con fines de riego de cultivos agrícolas ha contribuido a mejorar el rendimiento de los cultivos (Chávez *et al.*, 2012; Mojid *et al.*, 2012; Jung *et al.*, 2014). Además, aumentan la concentración de algunos nutrimentos en el suelo como nitrógeno, fósforo y carbón orgánico (Singh *et al.*, 2012; García-Orenes *et al.*, 2015). Por otro lado, el uso del agua residual cruda o tratada genera varios problemas sobre las propiedades físicas del suelo (Bhardwaj *et al.*, 2007; Zema *et al.*, 2012); asimismo, se ven afectadas las propiedades químicas del suelo como el potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico (CIC). (Herpin *et al.*, 2007; Lado y Ben-Hur, 2009; Pinto *et al.*, 2010) y causan modificaciones en la población microbiana del suelo (Al-Nakshabandi *et al.*, 1997; Becerra-Castro *et al.*, 2015).

Generalmente, el agua residual contiene metales pesados (Stark *et al.*, 2015), lo cual, provoca acumulación y la contaminación del suelo por estos elementos (Cary *et al.*, 2015; Al-Lahham *et al.*, 2007; Rodda *et al.*, 2011). Finalmente, son absorbidos e incorporados a las cadenas alimenticias (Al-Lahham *et al.*, 2007; Rodda *et al.*, 2011; Gatta *et al.*, 2015), todo lo anterior, conlleva a un riesgo real a la salud humana (Becerra-Castro *et al.*, 2015; Lu *et al.*, 2015).

En la Ciudad de Torreón Coahuila, México, sitio del presente estudio, existe una planta tratadora de agua residual municipal, la cual, utiliza un proceso de lagunas de estabilización, con una capacidad instalada de 1900 L s⁻¹, misma que se utiliza para el riego de cultivos agrícolas, principalmente forrajes desde el año 2003 (CONAGUA, 2011). En base a lo anterior el objetivo del presente estudio fue: determinar el efecto del agua residual cruda, tratada y mezclada (relación 1:1) sobre las propiedades físicas, químicas del suelo y en la acumulación de cadmio, plomo y cobre a tres profundidades del suelo (0-30; 30-60 y 60-90 cm).

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de Estudio

El presente estudio se realizó en terrenos agrícolas sembrados con alfalfa (*Medicago sativa* L.) del ejido Rancho Alegre, municipio de Torreón, Coahuila, México, a 50 m al norte de la planta tratadora, con la siguiente localización geográfica: 25° 30' 50.3" N;

103° 19' 16.8" O y 1125 m de altitud. El suelo del sitio experimental corresponde a un Xerosol Calcico, de acuerdo con la clasificación de la FAO/UNESCO. El clima es árido Bw (h)s, según Köppen, modificada por García (1998).

Muestreo del Agua

Se tomó una muestra en la entrada y salida de la planta tratadora (agua cruda y tratada); y a la entrada de la parcela regada con agua mezclada relación 1:1 (agua tratada: agua de pozo). Las muestras fueron tomadas en recipientes de plástico de un litro de capacidad y almacenadas a 4 °C hasta su análisis, de acuerdo con las indicaciones de la Norma NMX-AA-051-SCFI-2001 (Norma Mexicana, 2001) (Cuadro 1).

En las muestras de agua residual cruda, tratada y mezclada, se determinó la concentración de: calcio, magnesio, sodio, carbonatos, bicarbonatos, nitratos, sulfatos, cloruros, pH, CE, RAS y la concentración de los metales pesados (Cd, Pb y Cu). Para determinar la concentración de aniones y cationes en el agua se utilizó el método volumétrico (USDA, 1954), para los metales pesados en el agua, se usó un equipo de espectrofotometría de absorción atómica de flama VGP Modelo 210 (EUA) (Norma Mexicana, 2001). En el caso de la CE (Norma Mexicana, 2000) y pH (Norma Mexicana, 2016), se utilizó un conductímetro Orión Modelo 162 (EUA) y un potenciómetro Orión Modelo 420-A (EUA), respectivamente.

Muestreo de Suelos

En cada sitio se tomaron cuatro muestras representativas, en forma de zig-zag con una distancia de 50 m entre ellas, en una superficie de aproximadamente una hectárea en cada una de

las parcelas regadas con agua residual cruda, tratada y mezclada, tomando una muestra de aproximadamente dos kg en cada vértice a tres profundidades (0-30, 30-60, y 60-90 cm). Las 36 muestras fueron depositadas individualmente en bolsas de plástico, identificadas y transportadas al Laboratorio de Suelos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, donde fueron secadas al ambiente y cribadas en una malla de 2 mm hasta su posterior análisis, considerando la NOM-021-RECNAT-2000 (Norma Oficial Mexicana, 2002).

En las muestras de suelo se determinaron las siguientes características físicas y químicas: Da, pH, CE, CIC, MO, PSI y la concentración de metales pesados (Cu, Pb, y Cd).

El contenido de MO, se determinó con el método de Walkley y Black (SSS, 1995), la Da, por el método de la parafina (Klute, 1986), la CIC, por el método del acetato de amonio (Page, 1983); la CE y el pH usando un conductímetro Orión modelo 162 (EUA) y potenciómetro Orión 420-A (EUA) en pasta de saturación (Page, 1983). Los metales pesados por absorción atómica (Norma Mexicana, 2001).

Tratamientos y Diseño Experimental

Para evaluar el efecto de los tratamientos se utilizó un diseño bloques al azar con arreglo factorial: tres tipos de agua de riego (agua residual cruda, agua residual tratada y agua residual mezclada) y tres profundidades de muestreo (0-30, 30-60 y 60-90 cm), con cuatro repeticiones ($3 \times 3 \times 4$). Los resultados obtenidos fueron analizados mediante un análisis de varianza y para la comparación de medias se utilizó la prueba DMS al 5% de probabilidad de error mediante el paquete Statistical Analysis Systems V 9.1.3 (SAS, 2008).

Cuadro 1. Tipos de agua analizadas y localización geográfica de los sitios de muestreo.

Table 1. Types of water analyzed and geographical location of the sampling sites.

| Tratamiento | Latitud | Longitud | Altitud |
|------------------------------|-------------|--------------|---------|
| | Norte | Oriente | m |
| Agua residual cruda | 25°31'16.7" | 103°20'27.5" | 1119 |
| Agua residual tratada | 25°30'41.3" | 103°19'20.2" | 1122 |
| Agua residual mezclada (1:1) | 25°30'31.9" | 103°19'49.3" | 1123 |

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de Agua Residual

El resultado de los análisis reveló que la CE, del agua residual cruda, tratada y mezclada es alta (Cuadro 2) y de acuerdo a USDA (1954), corresponde a la clase 3 (C_3) y en relación de adsorción de sodio (RAS), a la clase 2 (S_2). En relación a la concentración de metales pesados Cd, Pb y Cu, estos se encuentran dentro de los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-001-ECOL-1996 (Norma Oficial Mexicana, 1997), los cuales son 0.05, 5 y 4 mg L⁻¹, respectivamente. El agua residual cruda y tratada presentan una alta concentración de sales solubles y sodio; sin embargo, el agua residual tratada al mezclarse con el agua de pozo (relación 1:1), la concentración de sales disminuye 15%, debido a las menores concentraciones de estos compuestos en el agua subterránea, los resultados de la CE y el RAS son superiores de los reportados por Singh *et al.* (2012), quienes encontraron en el agua residual cruda valores de 0.78 y 0.79 dS m⁻¹, respectivamente. Por el contrario, reportaron concentraciones mayores

de Cu, Pb y Cd (2.4, 7.5 y 2.1, respectivamente). Por otra parte, en relación con el agua residual tratada, Rusan *et al.* (2007), encontró niveles menores de Cu, Cd (0.01 y 0.02 mg L⁻¹) y mayores de Pb (0.77 mg L⁻¹).

Propiedades Físicas y Químicas del Suelo

El mayor contenido de MO está presente en el tratamiento que utilizó agua residual cruda para riego (2.40%), seguido por el agua residual mezclada (1.93%) y por último el tratamiento de agua residual tratada (1.52%) en la profundidad 0-30 cm del suelo; disminuyendo en términos generales a medida que se profundiza en el suelo (Cuadro 3). Estos contenidos de MO afectaron el valor de la Da del suelo, el cual presentó los valores más bajos en los tratamientos de agua residual cruda (1.21 g cm⁻³), seguido por el agua residual tratada (1.26 g cm⁻³) y finalmente el tratamiento de agua residual mezclada el valor más alto (1.50 g cm⁻³); es decir la Da es afectada por el contenido de MO, siendo mayor a medida que aumenta la profundidad del suelo, esto se debe a la disminución del contenido de MO. Estos resultados coinciden

Cuadro 2. Resultados de los análisis químicos de los diferentes tipos de agua usados para el riego.
Table 2. Results of chemical analyzes of the different types of water used for irrigation.

| Parámetro | Agua residual | | | Agua de pozo |
|------------------------------------------------------|---------------|---------|----------|--------------|
| | Cruda | Tratada | Mezclada | |
| Ca ²⁺ (meq L ⁻¹) | 2.32 | 2.96 | 3.00 | 2.00 |
| Mg ²⁺ (meq L ⁻¹) | 3.48 | 2.80 | 1.76 | 0.56 |
| Na ⁺ (meq L ⁻¹) | 17.624 | 18.324 | 15.695 | 6.698 |
| CO ₃ ⁻ (meq L ⁻¹) | N.D. | 0.96 | 0.46 | 0.20 |
| HCO ₃ ⁻ (meq L ⁻¹) | 8.86 | 8.00 | 6.12 | 2.08 |
| SO ₄ ⁻ (meq L ⁻¹) | 100 | 100 | 10.55 | 34.5 |
| CL ⁻ (meq L ⁻¹) | 2.14 | 3.96 | 2.84 | 1.70 |
| RAS | 10.35 | 10.798 | 10.174 | 6.698 |
| pH | 7.48 | 8.07 | 7.49 | 7.29 |
| CE (μs cm ⁻¹) | 1763 | 1833 | 1570 | 670 |
| Cd ⁺ (mg L ⁻¹) | < 0.1 | < 0.1 | 0.015 | N.D. |
| Cu ²⁺ (mg L ⁻¹) | < 0.5 | < 0.5 | 0.10 | 0.10 |
| Pb ⁺ (mg L ⁻¹) | < 0.2 | < 0.2 | 0.06 | N.D. |
| NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹) | N.D. | N.D. | 34.63 | 31.15 |

N.D. = no detectado.

N.D. = not detected.

con lo reportado por Rusan *et al.* (2007), quienes encontraron un incremento en el contenido de MO del suelo al usar agua residual para riego durante un periodo de diez años (1.3%) y una disminución en función de la profundidad del suelo, 1.3, 0.7 y 0.5% a profundidades de 0-20, 20-40 y 40-60 cm, respectivamente.

Concentración de Metales Pesados en el Suelo

Las mayores concentraciones de Cd, Cu y Pb se presentaron en el tratamiento que utilizó el agua residual cruda con fines de riego y las menores concentraciones en el tratamiento de agua mezclada, disminuyendo en porcentajes de 37.5, 6.09 y 30.93, respectivamente (Cuadro 4). Únicamente se observaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) para el Pb. Asimismo, se observó en términos generales una tendencia a disminuir la concentración de los metales pesados evaluados a medida que aumenta la profundidad del suelo, esto es debido a los menores contenidos de materia orgánica presentes en los estratos inferiores. Lo anterior se explica por el hecho de que la materia orgánica posee una gran capacidad de retención de metales pesados lo cual es fundamental en la disminución de la biodisponibilidad de los mismos (González-Flores *et al.*, 2011).

pH y PSI del Suelo

En la comparación de medias para pH y PSI (Cuadro 5), se observó diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre los tratamientos para el pH, con el valor más alto en el tratamiento que utilizó el agua residual tratada para riego, sin embargo, estadísticamente fue similar al valor observado en el agua residual mezclada; esto concuerda con lo reportado por Pinto *et al.* (2010), quienes mencionan que la aplicación de agua gris por largos periodos de tiempo puede aumentar la alcalinidad del suelo.

Por otra parte, se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre los diferentes tipos de agua residual estudiadas para el PSI, lo anterior coincide con lo reportado por Herpin *et al.* (2007) y Lado y Ben-Hur (2009), quienes reportan un alto riesgo de sodicidad en el suelo al utilizar agua residual tratada para el riego de cultivos agrícolas. Las diferencias entre el PSI de los suelos irrigados con agua residual cruda y mezclada, se explica debido a que la sumatoria del contenido de calcio y magnesio, es mayor que en el agua mezclada; por lo tanto, se reduce el PSI del suelo USDA (1954).

Cuadro 3. Resultados promedio del efecto del tipo de agua sobre las propiedades físicas y químicas a tres profundidades del suelo.
Table 3. Average results of the effect of the type of water on soil physical and chemical properties at three depths.

| Tipo de agua | Profundidad | Da | MO | pH | CE | PSI | CIC |
|--------------|-------------|--------------------|------|------|--------------------|------|-------------------------|
| | cm | g cm ⁻³ | % | | dS m ⁻¹ | % | meq 100 g ⁻¹ |
| ARC | 0-30 | 1.21 | 2.40 | 7.92 | 3.12 | 2.12 | 17.25 |
| | 30-60 | 1.30 | 1.82 | 8.03 | 2.31 | 1.46 | 13.00 |
| | 60-90 | 1.33 | 0.82 | 8.19 | 1.56 | 1.35 | 14.00 |
| ART | 0-30 | 1.26 | 1.52 | 8.66 | 1.74 | 4.47 | 13.50 |
| | 30-60 | 1.35 | 1.56 | 8.58 | 2.00 | 4.20 | 17.50 |
| | 60-90 | 1.42 | 1.19 | 8.58 | 2.01 | 3.60 | 14.75 |
| ARM | 0-30 | 1.50 | 1.93 | 8.63 | 2.45 | 6.04 | 18.75 |
| | 30-60 | 1.32 | 1.77 | 8.60 | 2.10 | 6.67 | 11.00 |
| | 60-90 | 1.34 | 1.60 | 8.45 | 2.18 | 6.62 | 16.00 |

ARC = agua residual cruda; ART = agua residual tratada; ARM = agua residual mezclada. Da = densidad aparente; MO = materia orgánica; pH = potencial de hidrógeno; CE = conductividad eléctrica; PSI = porcentaje de sodio intercambiable; CIC = capacidad de intercambio catiónico.

ARC = untreated sewage water; ART = treated sewage water; ARM = mixed sewage water. Da = bulk density; MO = organic matter; pH = hydrogen potential; CE = electric conductivity; PSI = exchangeable sodium percent; CIC = cation exchange capacity.

Cuadro 4. Concentración media de metales pesados a tres profundidades del suelo (mg kg⁻¹).
Table 4. Average concentration of heavy metals at three soil depths (mg kg⁻¹).

| Profundidad del suelo | Agua residual | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------|-------|-------|---------|-------|--------|----------|-------|-------|
| | Cruda | | | Tratada | | | Mezclada | | |
| cm | Cd | Cu | Pb | Cd | Cu | Pb | Cd | Cu | Pb |
| 0-30 | 0.16a | 1.48a | 2.91a | 0.10a | 1.39a | 1.70a | 0.10a | 1.39a | 2.17a |
| 30-60 | 0.10a | 0.75a | 1.38b | 0.10a | 1.41a | 1.63bc | 0.10a | 1.33a | 1.93b |
| 60-90 | 0.10a | 0.89a | 1.04c | 0.10a | 0.76a | 1.43c | 0.10a | 1.29a | 1.37c |

Densidad Aparente

Al realizar la prueba de medias (Cuadro 6) se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) para la Da de los suelos irrigados con agua residual cruda y mezclada. Las diferencias significativas encontradas para la Da por efecto del riego con agua cruda, tratada y mezclada coinciden con los resultados encontrados por Travis *et al.* (2010) quienes, al utilizar aguas grises con fines de riego, reportan una disminución de la porosidad del suelo al usar agua residual tratada, repercutiendo en un aumento de la Da del suelo; esto se explica por un mayor contenido de MO en los suelos regados con agua residual cruda. Asimismo, se presentan diferencias significativas para los valores de la Da en función de la profundidad del suelo; observándose un aumento de la Da a mayor profundidad, en los suelos regados con agua residual cruda y tratada, debido principalmente a que, a mayor profundidad, menor contenido de MO y por lo tanto, mayor compactación debido a una menor acumulación de residuos orgánicos.

Cuadro 5. Comparación de medias para pH y PSI del suelo regado con tres tipos de agua.

Table 5. Comparison of means for pH and PSI of irrigated soil with three water types.

| | Agua residual | | |
|-----|---------------------|---------|----------|
| | Cruda | Tratada | Mezclada |
| pH | 8.04 b [†] | 8.60 a | 8.55 a |
| PSI | 1.64 b | 4.64 ab | 6.44 a |

[†] Medias con la misma letra dentro de filas son iguales estadísticamente ($P \leq 0.05$). PSI = porcentaje de sodio intercambiable.

[†] Means with the same letter within rows are statistically equal ($P \leq 0.05$). PSI = exchangeable sodium percent.

Concentración de Metales Pesados

En la comparación de medias para la concentración de plomo (Cuadro 7) entre las profundidades de suelo se observan las mayores concentraciones en el suelo irrigado con agua cruda (profundidad 0-30 cm), en seguida el suelo regado con agua mezclada y finalmente los suelos irrigados con agua tratada presentaron las menores concentraciones de plomo, 2.91, 2.17 y 1.70 mg kg⁻¹, respectivamente. Lo anterior, se contrapone con la encontrado por Rusan *et al.* (2007), quienes no encontraron diferencias significativas al usar agua tratada con fines de riego a profundidades de 0-20, 20-40 y 40-60 cm, con concentraciones de hasta 45 mg L⁻¹.

El suelo sub-superficial (60-90 cm) irrigado con agua tratada presentó la más alta concentración de Pb (1.42 mg kg⁻¹), seguida por el suelo regado con agua

Cuadro 6. Comparación de medias para densidad aparente del suelo (g cm⁻³) en suelos regados con tres tipos de agua a tres profundidades.

Table 6. Comparison of means for soil bulk density (g cm⁻³) in soils irrigated with three water types at three depths.

| Profundidad del suelo | Densidad aparente del agua residual | | |
|-----------------------|-------------------------------------|---------|----------|
| | Cruda | Tratada | Mezclada |
| cm | | | |
| 0-30 | 1.21 b [†] | 1.25 bc | 1.50 a |
| 30-60 | 1.30 a | 1.34 b | 1.32 b |
| 60-90 | 1.32 a | 1.42 ab | 1.33 b |

[†] Medias con la misma letra dentro de columnas son iguales estadísticamente ($P \leq 0.05$).

[†] Means with the same letter within columns are statistically equal ($P \leq 0.05$).

Cuadro 7. Comparación de medias para la concentración de plomo (Pb) (mg kg^{-1}) en suelos regados con tres tipos de agua a tres profundidades.

Table 7. Comparison of means for lead (Pb) concentration (mg kg^{-1}) in soils irrigated with three water types at three depths.

| Profundidad cm | Agua residual | | |
|-------------------|---------------------|---------|----------|
| | Cruda | Tratada | Mezclada |
| 0-30 | 2.91 a [†] | 1.70 a | 2.17 a |
| 30-60 | 1.38 b | 1.63 bc | 1.93 b |
| 60-90 | 1.04 c | 1.42 c | 1.37 c |

[†] Medias con la misma letra dentro de columnas son iguales estadísticamente ($P \leq 0.05$).

[†] Means with the same letter within columns are statistically equal ($P \leq 0.05$).

mezclada (1.37 mg kg^{-1}), la menor concentración de Pb en el suelo sub-superficial se encontró en el suelo irrigado con agua residual cruda (1.04 mg kg^{-1}). No hubo diferencias significativas en las concentraciones de Cu y Cd entre tipos de agua y la interacción con las profundidades.

En la prueba de medias para la concentración de Cu y Pb en las profundidades de suelo estudiadas (Cuadro 8) se observó que existen diferencias significativas, presentando las concentraciones más altas en la capa superficial del suelo (0-30 cm) y las menores concentraciones en la profundidad (60-90 cm); esto, se explica debido a la mayor cantidad de materia orgánica (Cuadro 3) presente en la parte superficial de suelo regado con agua residual cruda, lo cual provoca un

Cuadro 8. Comparación de medias para la concentración de Pb y Cu (mg kg^{-1}) a tres profundidades de suelo.

Table 8. Comparison of means for Pb and Cu concentration (mg kg^{-1}) at three soil depths.

| | Profundidades de suelo | | |
|------------|------------------------|---------|--------|
| | 0-30 | 30-60 | 60-90 |
| | ----- cm ----- | | |
| Plomo (Pb) | 2.26 a [†] | 1.64 b | 1.28 c |
| Cobre (Cu) | 1.44 a | 1.16 ab | 0.98 b |

[†] Medias con la misma letra dentro de columnas son iguales estadísticamente ($P \leq 0.05$).

[†] Means with the same letter within columns are statistically equal ($P \leq 0.05$).

incremento en la capacidad de adsorción de cationes. Lo anterior coincide con lo reportado por Rodda *et al.* (2011), quienes reportan que utilizar agua residual gris para riego genera un aumento en la concentración de metales pesados en el suelo y lo reportado por Al-Lahham *et al.* (2007), quienes reportan un incremento en las concentraciones de metales pesados en el suelo (Cu, Mn y Fe), correlacionado con las altas concentraciones encontradas en el agua residual. No obstante, en este estudio, las concentraciones son menores a los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (Norma Oficial Mexicana, 2007), debido a que las concentraciones de los metales pesados en las fuentes de agua evaluadas son bajas. Respecto al cadmio no se observaron diferencias significativas entre las profundidades en promedio de los tres tipos de agua.

Correlaciones entre Variables

En el análisis de correlación (Cuadro 9), los resultados indicaron que, en los suelos irrigados con agua residual cruda, existió una correlación positiva significativa ($P \leq 0.05$) entre los metales pesados Pb y Cd y la capacidad de intercambio catiónico del Suelo (CIC) con valores de 0.61 y 0.64 respectivamente; esto se explica, debido a que al aumentar la CIC, aumenta la capacidad de adsorber los cationes, es decir aumenta la adsorción de metales pesados como el Pb y el Cd. Cortes *et al.* (2016) mencionan que al aumentar la CIC del suelo disminuye la movilidad de metales pesados como el Pb y Zn.

Asimismo, se observó una correlación positiva entre el Cu y el Pb con el Cd, con valores de 0.64 y 0.72, respectivamente. Por otra parte, existió una relación positiva altamente significativa ($P \leq 0.01$) entre el Cu y la CE con un valor de 0.79.

En el suelo irrigado con agua residual tratada se presentó una correlación positiva significativa ($P \leq 0.05$) entre la CIC y el PSI con un valor de 0.64; asimismo, una correlación positiva altamente significativa entre el Pb y PSI con un valor de 0.85. En cuanto al suelo irrigado con agua residual mezclada también se presentó una correlación positiva altamente significativa entre el PSI y la CE con un valor de 0.75; lo cual indica que existen sales en el suelo que contienen sodio (Na) en su composición, mismas que están interactuando con el complejo de intercambio del suelo.

Cuadro 9. Correlaciones y nivel de significancia entre las propiedades del suelo y metales pesados.

Table 9. Correlations and level of significance between soil properties and heavy metals.

| Fuente | Correlación | <i>r</i> | Significancia |
|---------------|-------------|----------|---------------|
| Agua cruda | CE – Cu | 0.79 | ** |
| | CIC – Cd | 0.64 | * |
| | CIC – Pb | 0.61 | * |
| | Cu – Cu | 0.64 | * |
| | Cd – Pb | 0.72 | ** |
| | Cu – Pb | 0.60 | * |
| Agua tratada | PSI - CIC | 0.64 | * |
| | PSI - Pb | 0.85 | ** |
| | Pb - CIC | 0.54 | * |
| Agua mezclada | PSI – CE | 0.75 | ** |

Nota: solo se incluyeron correlaciones que mostraron significancia. * ($P \leq 0.05$); ** ($P \leq 0.01$). CE = conductividad eléctrica; CIC = capacidad de intercambio catiónico; PSI = porcentaje de sodio intercambiable; Cu = cobre; Pb = plomo; Cd = cadmio.

Note: only correlations that showed significance were included. * ($P \leq 0.05$); ** ($P \leq 0.01$). CE = electric conductivity; CIC = cation exchange capacity; PSI = exchangeable sodium percent; Cu = copper; Pb = lead; Cd = cadmium.

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio permiten concluir que el tipo de agua afectó las propiedades del suelo e incrementa la acumulación de metales pesados. Asimismo, el uso de aguas residuales crudas incrementó los valores de la materia orgánica, conductividad eléctrica y pH en el estrato superior del suelo. Por otro lado, los suelos irrigados con agua residual cruda presentaron las más altas concentraciones de plomo en la capa superficial del suelo, seguidos por el cobre y cadmio. Las concentraciones de metales pesados no rebasan los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-147 SEMARNAT/SSA1-2004 (Norma Oficial Mexicana, 2007).

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.

FONDOS

La fuente de financiamiento para el desarrollo de la presente investigación fue la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: Dr. Mario García Carrillo, Dr. J. Guadalupe Luna Ortega, Dr. Miguel Ángel Gallegos Robles. Metodología: Dr. Mario García Carrillo. Software: Dr. Mario García Carrillo, Dra. María Gabriela Cervantes Vázquez, Dr. Uriel González Salas. Validación: Dr. Mario García Carrillo, Dr. J. Guadalupe Luna Ortega, Dr. Miguel Ángel Gallegos Robles. Análisis formal: Dr. Mario García Carrillo, Dr. J. Guadalupe Luna Ortega, Dr. Miguel Ángel Gallegos Robles. Investigación: Dr. Mario García Carrillo, Dr. Pablo Preciado Rangel, Dr. Uriel González Salas. Recursos: Dr. Mario García Carrillo, Dr. Pablo Preciado Rangel. Curación de datos: Dr. Mario García Carrillo, Dr. Pablo Preciado Rangel, Dra. María Gabriela Cervantes Vázquez. Escritura: Dr. Mario García Carrillo, Dr. J. Guadalupe Luna Ortega, Dr. Miguel Ángel Gallegos Robles. Preparación del borrador original: Dr. Mario García Carrillo, Dr. J. Guadalupe Luna Ortega, Dr. Miguel Ángel Gallegos Robles. Escritura: revisión y edición, Dr. J. Guadalupe Luna Ortega, Dr. Miguel Ángel Gallegos Robles, Dr. Pablo Preciado Rangel. Visualización: Dr. Mario García Carrillo, Dr. Pablo Preciado Rangel, Dra. María Gabriela Cervantes Vázquez. Supervisión: Dr. Mario

García Carrillo, Dr. J. Guadalupe Luna Ortega, Dr. Miguel Ángel Gallegos Robles. Administración del proyecto: Dr. Mario García Carrillo. Adquisición de fondos: Dr. Mario García Carrillo.

AGRADECIMIENTOS

Al departamento de suelos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna, por las facilidades otorgadas para la realización de la presente investigación.

LITERATURA CITADA

- Agrafioti, E. and E. Diamadopoulos. 2012. A strategic plan for reuse of treated municipal wastewater for crop irrigation on the island of Crete. *Agric. Water Manage.* 105: 57-64. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.01.002>.
- Al-Lahham, O., N. M. El Assi, and M. Fayyad. 2007. Translocation of heavy metals to tomato (*Solanum Lycopersicom* L.) fruit irrigated with treated wastewater. *Sci. Hortic.* 113: 250-254. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.03.017>.
- Al-Nakshabandi, G. A., M. M. Saqqar, M. R. Shatanawi, M. Fayyad, and H. Al-Horani. 1997. Some environmental problems associated with the use of treated wastewater for irrigation in Jordan. *Agric. Water Manage.* 34: 81-94. doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(96\)01287-5](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(96)01287-5).
- Barbosa, B., J. Costa, A. L. Fernando, and E. G. Papazoglou. 2015. Wastewater reuse for fiber crops cultivation as a strategy to mitigate desertification. *Ind. Crops Prod.* 68: 17-23. doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.07.007>.
- Bhardwaj, A. K., D. Goldstein, A. Azenkot, and G. J. Levy. 2007. Irrigation with treated wastewater under two different irrigation methods: Effects on hydraulic conductivity of a clay soil. *Geoderma* 140: 199-206. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.04.003>.
- Becerra Castro, C., A. R. Lopes, I. Vaz-Moreira, E. F. Silva, C. M. Manaia, and O. C. Nunes. 2015. Wastewater reuse in irrigation: A microbiological perspective on implications in soil fertility and human and environmental health. *Environ. Int.* 75: 117-135. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.001>.
- Cary, L., N. Surdyk, G. Psarras, I. Kasapakis, K. Chartzoulakis, L. Sandei, C. Guerrot, M. Pettenati, and W. Kloppmann. 2015. Short-term assessment of the dynamics of elements in wastewater irrigated Mediterranean soil and tomato fruits through sequential dissolution and lead isotopic signatures. *Agric. Water Manage.* 155: 87-99. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.016>.
- Cisneros E., O. X. y H. Saucedo Rojas. 2016. Reúso de aguas residuales en la agricultura. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Mor., México. ISBN: 978-607-9368-76-0.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2011. Plantas de tratamiento de aguas residuales, Coahuila de Zaragoza. pp. 138-139. In: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (ed.). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. Tlalpan, México, D.F.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2014. Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. pp. 104-105. In: CONAGUA (ed.). Estadísticas del agua en México. México, D. F.
- Cortes P., L. E., I. S. Bravo Realpe, F. J. Martin Peinado y J. C. Menjivar Flores. 2016. Extracción secuencial de metales pesados en dos suelos contaminados (Andisol y Vertisol) enmendados con ácidos húmicos. *Acta Agron.* 65: 232-238. doi: <https://doi.org/10.15446/acag.v65n3.44485>.
- Chávez, A., K. Rodas, B. Prado, R. Thompson, and B. Jiménez. 2012. An evaluation of the effects of changing wastewater irrigation regime for the production of alfalfa (*Medicago sativa*). *Agric. Water Manage.* 113: 76-84. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.06.021>.
- García, E. 1998. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, UNAM. México, D. F.
- García-Orenes, F., F. Caravaca, A. Morugán-Coronado, and A. Roldán. 2015. Prolonged irrigation with municipal wastewater promotes a persistent and active soil microbial community in a semiarid agroecosystem. *Agric. Water Manage.* 149: 115-122. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.030>.
- Gatta, G., A. Libutti, A. Gagliardi, L. Beneduce, L. Brusetti, L. Borruso, G. Disciglio, and E. Tarantino. 2015. Treated agro-industrial wastewater irrigation of tomato crop: Effects on qualitative/quantitative characteristics of production and microbiological properties of the soil. *Agric. Water Manage.* 149: 33-43. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.016>.
- González-Flores, E., M. A. Tornero-Campante, E. Sandoval-Castro, A. Pérez-Magaña y A. J. Gordillo-Martínez. 2011. Biodisponibilidad y fraccionamiento de metales pesados en suelos agrícolas enmendados con biosólidos de origen municipal. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 27: 291-301.
- Herpin, U., T. V. Gloaguen, A. Ferreira da Fonseca, C. R. Montes, F. Campos Mendonca, R. Passos Piveli, G. Breulmann, M. C. Forti, and A. J. Melfi. 2007. Chemical effects on the soil-plant system in a secondary treated wastewater irrigated coffee plantation-A pilot field study in Brazil. *Agric. Water Manage.* 89: 105-115. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.01.001>.
- Jung, K., T. Jang, H. Jeong, and S. Park. 2014. Assessment of growth and yield components of rice irrigated with reclaimed wastewater. *Agric. Water Manage.* 138: 17-25. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.02.017>.
- Klute, A. 1986. Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical methods. American Society of Agronomy, SSSA. Madison, WI, USA. ISBN13: 9780891188117.
- Lado, M. and M. Ben-Hur. 2009. Treated domestic sewage irrigation effects on soil hydraulic properties in arid and semiarid zones: A review. *Soil Tillage Res.* 106: 152-163. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.04.011>.
- Lu, Y., S. Song, R. Wang, Z. Liu, J. Meng, A. J. Sweetman, A. Jenkins, R. C. Ferrier, H. Li, W. Luo, and T. Wang. 2015. Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China. *Environ. Int.* 77: 5-15. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.12.010>.
- Mojid, M. A., S. K. Biswas, and G. C. L. Wyseure. 2012. Interaction effects of irrigation by municipal wastewater and inorganic fertilizers on wheat cultivation in Bangladesh. *Field Crops Res.* 134: 200-207. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.06.010>.

- Norma Mexicana. 2016. NMX-AA-008-SCFI-2016. Análisis de agua.- Medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.- Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-008-SCFI-2011). Secretaría de Economía. México, D. F.
- Norma Mexicana. 2000. NMX-AA-093-SCFI-2000. Análisis de agua - determinación de la conductividad electrolítica - método de prueba. (Cancela a la NMX-AA-093-1984). Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. México, D. F.
- Norma Mexicana. 2001. NMX-AA-051-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de metales pesados por absorción atómica en aguas naturales, potables y residuales tratadas - método de prueba. (Cancela a la NMX-AA-051-1981). Secretaria de Economía. México, D. F.
- Norma Oficial Mexicana. 1997. NOM-001-ECOL-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. SEMARNAT. México, D. F.
- Norma Oficial Mexicana. 2002. NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. SEMARNAT. México, D. F.
- Norma Oficial Mexicana. 2007. NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. SEMARNAT. México, D. F.
- Mizyed, N. R. 2013. Challenges to treated wastewater reuse in arid and semi-arid areas. *Environ. Sci. Pol.* 25: 186-195. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.10.016>.
- Page, A. L. 1983. Methods of soil analysis. Part. 2. Chemical and microbiological properties. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA. ISBN: 0891180729, 9780891180722.
- Pinto, U., B. L. Maheshwari, and H. S. Grewal. 2010. Effects of greywater irrigation on plant growth, water use and soil properties. *Resour. Conserv. Recycl.* 54: 429-435. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.09.007>.
- Qadir, M., D. Wichelns, L. Raschid-Sally, P. G. McCormick, P. Drechsel, A. Bahri, and P. S. Minhas. 2010. The challenges of wastewater irrigation in developing countries. *Agric. Water Manage.* 97: 561-568. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.11.004>.
- Rodda, N., L. Salukazna, S. A. F. Jackson, and M. T. Smith. 2011. Use of domestic greywater for small-scale irrigation of food crops: effects on plants and soil. *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C* 36: 1051-1062. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.08.002>.
- Rusan, M. J. M., S. Hinnawi, and L. Rousan. 2007. Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. *Desalination* 215: 143-152. doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.10.032>.
- SAS Institute. 2008. For windows NT V 9.1.3. Statistical Analysis Systems. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA.
- Sato, T., M. Qadir, S. Yamamoto, T. Endo, and A. Zahoor. 2013. Global, regional and country level need for data on wastewater generation, treatment, and use. *Agric. Water Manage.* 130: 1-13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.08.007>.
- Singh, P. K., P. B. Deshbhratar, and D. S. Ramteke. 2012. Effects of sewage wastewater irrigation on soil properties, crop yield and environment. *Agric. Water Manage.* 103: 100-104. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.10.022>.
- SSS (Soil Survey Staff). 1995. Soil Survey Laboratory Information Manual. SSIR No. 45, Version 1.0. R. Burt (ed.). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Washington, DC, USA.
- Stark, J. S., J. Smith, C. K. King, M. Lindsay, S. Stark, A. S. Palmer, L. Snape, P. Bridgen, and M. Riddle. 2015. Physical, chemical, biological and ecotoxicological properties of wastewater discharged from Davis Station, Antarctica. *Cold Reg. Sci. Technol.* 113: 52-62. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.02.006>.
- Travis M. J., A. Wiel-Shafran, N. Weisbrod, E. Adar, and A. Gross. 2010. Greywater reuse for irrigation: Effect on soil properties. *Sci. Total Environ.* 408: 2501-2508. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.03.005>.
- Trinh, L. T., C. C. Duong, P. van Der Steen, and P. N. L. Lens. 2013. Exploring the potential for wastewater reuse in agriculture as a climate change adaptation measure for can the city, Vietnam. *Agric. Water Manage.* 128: 43-54. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.06.003>.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agriculture Handbook No. 60. United States Salinity Laboratory Staff. L. A. Richards (ed.). Washington, DC, USA.
- Zema, D. A., G. Bombino, S. Andiloro, and S. M. Zimbone. 2012. Irrigation of energy crops with urban wastewater: Effects on biomass yields, soils and heating values. *Agric. Water Manage.* 115: 55-65. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.08.009>.