

Metales pesados y calidad agronómica del agua residual tratada

Meavy metals and agricultural quality of treated wastewater

José Pedro Pérez Díaz^{1*}, Edmundo Peña Cervantes², Rubén López Cervantes²,
Idalia María Hernández Torres²

RESUMEN

En este estudio se recolectaron muestras de agua en el efluente de una planta de tratamiento de agua residual durante los meses de enero a julio de 2012. El objetivo fue determinar la concentración de metales pesados, así como evaluar la calidad agrícola del agua residual tratada. Los resultados del análisis de los elementos: cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn), muestran que la concentración de estos metales fue baja, por lo que, de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996 el agua residual tratada cumple con la concentración permitida para su descarga en cuerpos receptores. Mediante las variables Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , pH, conductividad eléctrica (CE) y relación de adsorción de sodio (RAS) se determinó su calidad agrícola. Los indicadores de salinidad muestran que el agua no es adecuada para la irrigación. Los valores de RAS fueron menores de $5,5 \text{ meq L}^{-1}$, y los valores conjuntos CE-RAS sugieren la clasificación del agua como C4-S1, lo que indica que el agua tiene restricciones de uso por el riesgo de salinidad al aplicarla al riego agrícola.

Palabras clave: salinidad, sodicidad, irrigación.

ABSTRACT

In this study, water samples were collected from the effluent of a treatment plant wastewater during the months of January to July 2012. The objective was to determine the concentration of heavy metals, as well as evaluating the agricultural quality of the treated wastewater. The results of analysis of elements: cadmium (Cd), copper (Cu), chromium (Cr), nickel (Ni), lead (Pb) and zinc (Zn), show that the concentration of these metals was low, so which, according to NOM-001-SEMARNAT-1996 the treated wastewater complies with the permitted concentration for download on receiving bodies. Using variables: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , pH, electrical conductivity (EC) and sodium adsorption ratio (SAR) was determined agricultural quality. The salinity indicators show that water is not suitable for irrigation. The SAR values were lower than 5.5 meq L^{-1} , the joint EC-SAR values show that water use is restricted by salinity risk when applied to irrigation.

Key words: salinity, sodicity, irrigation.

Introducción

En México y otros países la demanda de agua tiene como objetivo principal satisfacer las necesidades de la industria, la producción de alimentos y, en general, de la población y sus patrones de consumo (Rodríguez *et al.*, 2009), en consecuencia se genera agua de origen residual y representa focos de infección y toxicidad a la salud humana y al ambiente (Jiménez, 2001), esto está condicionado por su composición, concentración, tiempo y tipo de contacto. Atendiendo lo anterior, en México se han construido plantas para el tratamiento de agua residual, de estas en algunas se determina

su calidad agrícola (Rodríguez *et al.*, 2009), como en este trabajo.

Debido a que el agua es uno de los factores limitantes para la producción en algunas áreas de cultivo, en México se utiliza el agua residual para el riego agrícola (Velázquez *et al.*, 2002), por esta razón es importante evaluar su calidad agronómica, en este sentido, Eaton (1950) consideró necesario evaluar el riesgo de salinización del suelo por la aplicación del agua al riego agrícola, por su parte, Doneen (1975) indicó que la calidad del agua se determina por la concentración y tipo de constituyentes disueltos que contenga, al respecto, Ayers y Westcot (1987) coincidieron en que dependerá de su composición iónica y de algunos índices de salinidad.

¹ Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México. C.P. 56230.

² Departamento: Ciencias del Suelo, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, Coahuila. C.P. 25315.

* Autor para correspondencia: josepedro.perez@colpos.mx

En relación con la calidad del agua para riego agrícola Richards *et al.* (1954) propusieron evaluarla de acuerdo con la CE y la RAS, como indicadores de riesgo de salinidad y sodicidad. Por su parte, Ayers y Westcot (1987) indicaron el grado de restricción de uso por la reducción relativa de la infiltración del agua en el suelo. Se recomienda estimar el riesgo de

sodicidad, ya que cuando la relación:
$$\frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}}$$

es alta, el Na^+ en solución se acumula en el suelo (Richards *et al.*, 1954), en este estudio, los valores de RAS son bajos.

En este mismo sentido, Doneen (1975) propuso estimar los índices de salinidad efectiva (SE) y potencial (SP) en las aguas de riego, ya que la alta concentración de sales afecta la disponibilidad de agua para los cultivos, por su parte, Eaton (1950) propuso el índice de carbonato de sodio residual (CSR) para estimar la precipitación de carbonato y bicarbonato de Ca^{2+} y Mg^{2+} . En esta investigación, de acuerdo con los resultados de SE, SP y CSR, no se recomienda la aplicación del agua al riego agrícola.

En relación con la salinidad del agua, Ayers y Westcot (1987) mencionaron que la alta concentración de sales solubles causa efectos perjudiciales a los cultivos, dichos efectos dependen del cultivo y tipo de sal (Can *et al.*, 2014), al respecto, Sánchez *et al.* (2013) coincidieron en que dependerá de la tolerancia de un determinado cultivo a niveles extremos de concentración iónica. Otra consideración que debe tenerse en cuenta para el uso del agua residual es el contenido de metales pesados, ya que estos, adicionados al suelo mediante el riego, se acumulan en la capa arable de los suelos agrícolas (Siebe, 1994; Zamora *et al.*, 2008). Además, la persistencia y el carácter tóxico y acumulativo de algunos metales, dañan a los cultivos.

Las aguas residuales, en muchos casos, contienen elementos necesarios para el desarrollo de los cultivos (Zamora *et al.*, 2008), por ello el uso de este recurso para riego agrícola puede llevarse a cabo una vez que cumpla con los estándares de calidad establecidos respecto de los metales pesados, así como criterios agronómicos. Como no se cuenta con un estudio sistemático en la planta de tratamiento acerca de la concentración de metales pesados en el agua residual, y su aptitud de uso para riego agrícola, el objetivo de esta investigación fue medir la concentración de Cr, Cd, Cu, Pb, Ni y Zn en el agua residual tratada, así como la determinación

de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , pH y CE, para clasificar el agua de acuerdo con criterios agronómicos.

Materiales y Métodos

Zona de estudio, muestreo de agua y análisis químico

La investigación se llevó a cabo en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicada en Saltillo, Coahuila, México. Para ello se recolectaron muestras de agua del efluente de una planta de tratamiento de agua residual de origen doméstico, que se encuentra en esta misma institución. El muestreo de agua se realizó durante los meses de enero a julio de 2012 de acuerdo con la metodología propuesta por APHA (1998).

La determinación del pH se realizó con un potenciómetro. La CE, expresada en dS m^{-1} a 25°C , se determinó con un puente de conductividad eléctrica (Richards *et al.*, 1954). La concentración de Cd, Cu, Cr, Ni, Pb y Zn, por su importancia toxicológica, así como la cuantificación de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ se determinó con un espectrómetro de absorción atómica de flama (Atomic Absorption Spectrometer SpectrAA-5). Y con el método de titulación se analizaron: HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-} (Richards *et al.*, 1954; APHA, 1998).

Calidad agronómica del agua residual tratada

La calidad del agua para riego agrícola se determinó a partir de su composición iónica, con estas variables se estimaron los índices de CE, SE, SP, RAS y CSR, así como la clasificación del agua (Velázquez *et al.*, 2002; Nishanthiny *et al.*, 2010; Sarabia *et al.*, 2011; Bing *et al.*, 2012).

Se observó que la concentración de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ fue menor que la de HCO_3^- , por lo que la SE se determinó con la siguiente ecuación (Doneen, 1975):

$$\text{SE} = \sum_{i=1}^n \text{cationes} - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) \quad (1)$$

La SP se calculó mediante la siguiente expresión matemática (Doneen, 1975):

$$\text{SP} = \text{Cl}^- + 0.5(\text{SO}_4^{2-}) \quad (2)$$

Los valores de RAS se estimaron a partir de la siguiente ecuación (Richards *et al.*, 1954):

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})}{2}}} \quad (3)$$

Con la siguiente expresión se estimó el índice de CSR (Eaton, 1950):

$$\text{CSR} = (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) \quad (4)$$

Para la estimación de los índices de salinidad y sodicidad, las unidades de los aniones y cationes se expresaron en meq L⁻¹ en todos los casos.

Resultados y Discusión

Metales pesados en el agua residual tratada

No se detectó Cd, Cu y Ni. Siebe (1994) encontró 0,21 mg L⁻¹ de Cu. En este estudio los valores de Pb son de 0,1 mg L⁻¹ en los primeros tres muestreos, el Zn no se detectó en los cuatro muestreos iniciales, sin embargo, hubo concentraciones de 0,1 mg L⁻¹ en los muestreos cinco, seis y siete (Tabla 1). La problemática de los metales pesados, como Pb, Ni y Cd presentes en el agua residual utilizada para riego, radica principalmente en que estos se acumulan en los suelos agrícolas (Zamora *et al.*, 2008), y son peligrosos por la toxicidad que tienen en los diferentes cultivos (Corinne *et al.*, 2006).

El Cr es de uso común en la determinación de materia orgánica de los suelos y en la demanda química de oxígeno de las aguas residuales, y los

residuos generados se vierten al drenaje doméstico conducido a la planta de tratamiento, no obstante, la cantidad que se encontró de este metal es baja, en los primeros tres muestreos la concentración fue menor de 0,05 mg L⁻¹, y no se detectó en el muestreo cuatro, seis y siete; el valor máximo se encontró durante el muestreo cinco (0,1 mg L⁻¹). Mancilla *et al.* (2012) reportaron valores de Cr menores de 0,05 mg L⁻¹, igual que en este estudio, e indicaron que la alta concentración de metales pesados en el agua utilizada para riego representa un problema importante para la agricultura y la salud humana, así como para la biodiversidad. Por su parte, Soto *et al.* (2004) encontraron cantidades de Cr, Zn, Ni y Fe en concentraciones que rebasan los límites establecidos en la norma mexicana, en este estudio no se determinó Fe, y la concentración de Cr, Ni y Zn se encontró dentro de los límites máximos permisibles (SEMARNAT, 1996).

Respecto de los metales pesados en el agua residual, Siebe (1994) reportó cantidades de Cr de 0,1 mg L⁻¹, al igual que en este estudio, al respecto, encontró que se acumulan en la capa arable de los suelos agrícolas regados con esta agua, en este sentido, la aplicación del agua residual al riego agrícola incrementó los niveles de Cd y Pb en el suelo (Zamora *et al.*, 2008). Mancilla *et al.* (2012) mostraron valores bajos en la concentración de metales pesados en agua para riego agrícola. Por el contrario, Gómez *et al.* (2009) encontraron valores de Pb de 0,30 mg L⁻¹, en comparación con los resultados obtenidos en este trabajo, el valor máximo de concentración para el mismo metal fue de 0,1 mg L⁻¹. Esta diferencia de concentración se debe a la zona de estudio, Gómez *et al.* (2009) investigaron la concentración de metales pesados en el agua de una zona minera, ahí el agua se contamina con

Tablas 1. Promedio mensual de la concentración de metales pesados en el agua residual tratada.

Periodo de muestreo	Cd	Cu	Cr	Ni	Pb	Zn
Año 2012	mg L ⁻¹					
1. Enero	ND ^Z	ND	0,05	ND	0,1	ND
2. Febrero	ND	ND	0,05	ND	0,1	ND
3. Marzo	ND	ND	0,04	ND	0,1	ND
4. Abril	ND	ND	ND	ND	ND	ND
5. Mayo	ND	ND	0,10	ND	ND	0,10
6. Junio	ND	ND	ND	ND	ND	0,10
7. Julio	ND	ND	ND	ND	ND	0,10
LMP ^{&}	0,1	4,0	0,5	2,0	0,2	10

Z: no se detectó el elemento; &: Límites máximos permisibles establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996.

mayor cantidad de metales y, como consecuencia, al verterse en los canales de desagüe contamina las corrientes de agua superficial.

La concentración de metales pesados que se determinó en este trabajo está influenciada por las condiciones de pH, debido a que dichos valores se encuentran entre 7,2 y 7,8 estos metales están menos disponibles. De acuerdo con lo que encontraron Silveira *et al.* (2003), en condiciones de alcalinidad en el agua, algunos metales se precipitan como hidróxidos insolubles y carbonatos. El pH es uno de los factores que afecta la acumulación y disponibilidad de los metales pesados, la mayoría está más disponible cuando el agua tiene pH ácido, mientras que, si este es alcalino, se precipitan. Por esta razón, la concentración de metales pesados en el agua fueron bajos, no obstante, la aplicación prolongada de esta agua al riego de cultivos agrícolas ocasiona la acumulación de metales en los suelos (Zamora *et al.*, 2008).

Composición iónica del agua residual tratada

En el Tabla 2 se reporta la concentración de Ca^{2+} entre 3,44 y 6,14 meq L^{-1} ; la del Mg^{2+} entre 4,80 y 8,23 meq L^{-1} ; el Na^+ entre 11,30 y 13,48 meq L^{-1} ; los valores menores de concentración corresponden al K^+ (entre 0,30 y 0,53 meq L^{-1}). En relación con los aniones no se encontró CO_3^{2-} debido a las condiciones de pH, ya que cuando este es menor de 8,4 no hay CO_3^{2-} (Richards *et al.*, 1954). El HCO_3^- está entre 11,20 y 15,96 meq L^{-1} , el Cl^- entre 9,50 y 12,00 meq L^{-1} . En menor concentración el SO_4^{2-} (0,20 y 1,12 meq L^{-1}). Los valores de concentración de aniones muestran

dominancia de HCO_3^- y Cl^- . Y por parte de los cationes, el dominante es el Na^+ . En la Figura 1 se ilustra la distribución de estos iones, en la cual, se observa que las líneas son semejantes, esto indica que la familia química del agua es bicarbonatada-sódica y tiene el mismo origen, en este caso, el agua residual tratada corresponde a drenaje doméstico.

En relación con la hidroquímica, Arenal (1985) encontró la predominancia de un grupo de agua de tipo bicarbonatada-sódica y atribuyó la concentración de HCO_3^- a la presencia de materia orgánica que genera CO_2 en el agua, igualmente, Mancilla *et al.* (2014) reportaron agua de tipo bicarbonatada. En este trabajo no se determinó el contenido de materia orgánica. La presencia de agua bicarbonatada-sódica se atribuye a su origen, esta es de tipo residual doméstica. Al respecto, Velázquez *et al.* (2002) encontraron cantidades considerables de HCO_3^- , lo que coincide con este trabajo.

Calidad agronómica del agua residual tratada

Los valores de pH indican que el agua es ligeramente alcalina. Velázquez *et al.* (2002) encontraron pH entre 6,9 y 8,6; al respecto, mencionaron que en condiciones de pH mayores de 8,2, el Ca^{2+} y Mg^{2+} precipitan como carbonatos y la RAS aumenta. La CE se encontró entre 2,20 y 2,50 dS m^{-1} , a 25 °C (Tabla 3); de acuerdo con este indicador, la aplicación del agua al riego agrícola está condicionada por el alto riesgo de salinidad (C4). En este sentido, Richards *et al.* (1954) propusieron que el uso agrícola del agua cuya CE sea menor de 0,250 dS m^{-1} no representa peligro de salinidad (C1); el riesgo de salinidad medio (C2) se presenta

Tablas 2. Composición iónica del agua residual tratada.

Periodo de muestreo	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}
Año 2012	meq L^{-1}						
1. Enero	5,84	5,76	13,48	0,30	14,93	10,00	0,30
2. Febrero	5,99	4,94	11,74	0,30	12,72	9,60	0,54
3. Marzo	5,89	4,94	11,30	0,30	11,20	10,00	1,12
4. Abril	6,14	7,41	13,48	0,39	14,72	12,00	0,50
5. Mayo	5,24	8,23	13,04	0,53	15,96	10,56	0,30
6. Junio	3,44	4,80	12,61	0,53	11,64	9,50	0,20
7. Julio	3,59	5,30	13,00	0,38	11,32	10,60	0,25
Mínimo	3,44	4,80	11,30	0,30	11,20	9,50	0,20
Máximo	6,14	8,23	13,48	0,53	15,96	12,00	1,12
Media	5,16	5,91	12,66	0,39	13,21	10,32	0,45
Desviación estándar	1,16	1,36	0,84	0,10	1,96	0,85	0,31

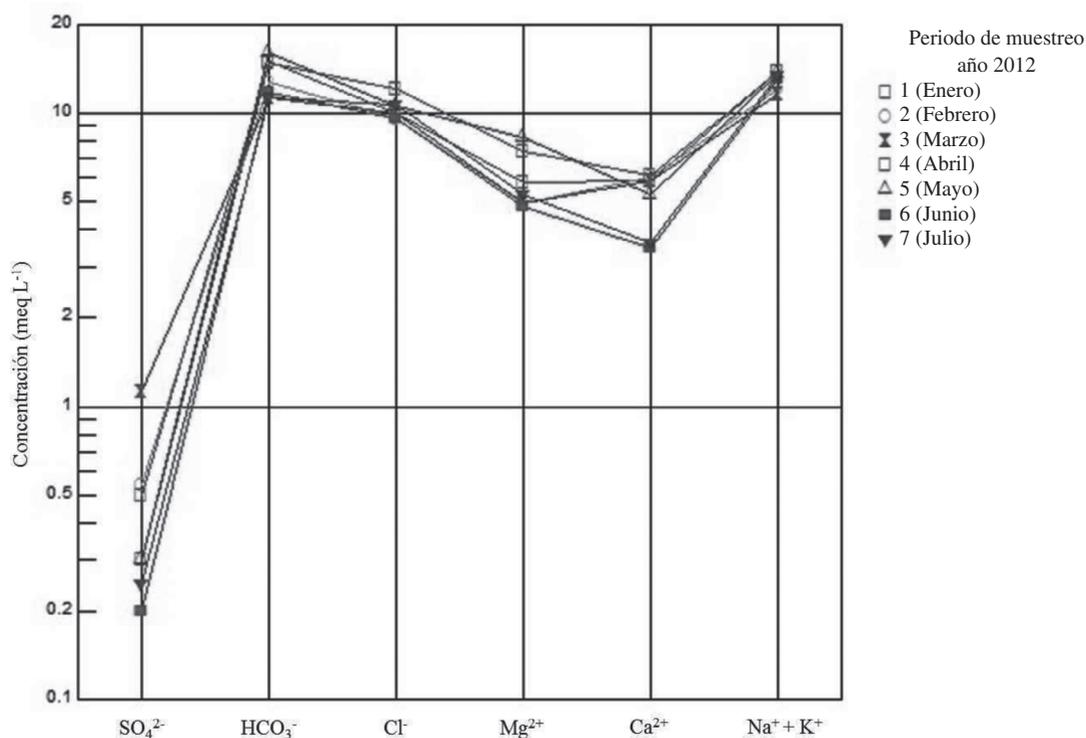


Figura 1. Diagrama hidroquímico de la dominancia iónica del agua residual tratada.

Tablas 3. Parámetros físicos de clasificación del agua residual tratada para riego agrícola.

Periodo de muestreo	pH	CE	RAS	SE	SP	CSR
Año 2012		dS m ⁻¹		meq L ⁻¹		
1. Enero	7,6	2,40	5,59	13,78	10,15	3,33
2. Febrero	7,2	2,48	4,87	12,04	9,87	1,79
3. Marzo	7,4	2,48	4,69	11,60	10,56	0,37
4. Abril	7,6	2,50	5,59	13,87	12,25	1,18
5. Mayo	7,6	2,40	5,41	13,57	10,71	2,49
6. Junio	7,6	2,20	5,23	13,14	9,60	3,40
7. Julio	7,8	2,26	5,39	13,38	10,72	2,42
Mínimo	7,2	2,20	4,69	11,60	9,60	0,37
Máximo	7,8	2,50	5,59	13,87	12,25	3,40
Media	7,5	2,38	5,25	13,05	10,55	2,14
Desviación Estándar	0,1	0,11	0,34	0,88	0,86	1,10

CE: conductividad eléctrica determinada a 25 °C; RAS: relación de adsorción de sodio; SE: índice de salinidad efectiva; SP: índice de salinidad potencial; CSR: índice de carbonato de sodio residual.

cuando el agua tiene entre 0,250 y 0,750 dS m⁻¹; se considera con peligro de salinidad alto (C3) con valores de 0,750 a 2,250 dS m⁻¹; y con riesgo de salinidad muy alto (C4) cuando los valores de CE en el agua sean mayores de 2,250 dS m⁻¹. Con este indicador Rodríguez *et al.* (2009) clasificaron el

agua residual tratada con riesgo de salinidad medio y muy alto, en este estudio, la irrigación con este tipo de agua representa alto riesgo de salinidad por los valores de CE encontrados.

Por su parte, Ayers y Westcot (1987) indicaron que cuando el agua de riego presente valores de

CE menores de $0,700 \text{ dS m}^{-1}$ no tiene restricción de uso, mientras que con la CE entre $0,700$ y $3,00 \text{ dS m}^{-1}$ la restricción de uso es ligera, y el uso del agua en la irrigación es muy restringido con valores de CE mayores de $3,00 \text{ dS m}^{-1}$, ya que afecta la disponibilidad del agua para algunos cultivos. En este estudio, de acuerdo con dicho criterio, el grado de restricción de uso es ligero. Velázquez *et al.* (2002) encontraron valores entre 1 y 3 dS m^{-1} en aguas residuales. Como indicadores de salinidad, la CE y los criterios de SE, SP y CSR presentan valores cuya clasificación indica que no se recomienda el uso del agua residual tratada para el riego agrícola.

Respecto de la salinidad, se debe tener en cuenta que el riego con agua de alta concentración iónica conduce a la salinización progresiva de los suelos, sin embargo, la acumulación de sales dependerá de las propiedades físicas y químicas del suelo. Castellanos *et al.* (2000) mencionaron que el problema de salinidad se restringe a regiones con baja precipitación pluvial ($< 350 \text{ mm}$), tal es el caso de las zonas áridas y semiáridas.

Por su parte, Argentel *et al.* (2006) indicaron que la salinidad de los suelos afecta el rendimiento de los cultivos, en este sentido, concluyeron que el incremento en la concentración salina disminuye el crecimiento de los cultivos; al respecto, Can *et al.* (2014) encontraron que el daño por salinidad depende de la concentración y tipo de sales, además de la variedad de cultivo. Mientras que Sánchez *et al.* (2013) indicaron que dependerá de la tolerancia de un determinado cultivo a niveles extremos de concentración iónica.

Rodríguez *et al.* (2009) reportaron valores de CE, SE, SP, RAS y CSR como indicadores de calidad agronómica del agua, dichos valores son similares a los que se encontraron en este trabajo, ya que en ambos casos se evalúa la calidad del agua residual tratada para irrigación, y se reporta riesgo de salinidad muy alto. La evaluación del índice de CSR tiene su importancia en los sistemas donde se aplican fertilizantes en el riego, debido a que la precipitación de CO_3^{2-} y HCO_3^- de Ca^{2+} y Mg^{2+} obstruye los emisores en sistemas de riego por goteo (Eaton, 1950; Richards *et al.*, 1954), en este

trabajo, dicho índice sugiere no aplicar el agua en sistemas de riego.

Además, cuando el agua de riego contiene cantidades altas de Na^+ en solución, se acumula paulatinamente en el suelo, y como consecuencia pierde su estructura, debido a esto la permeabilidad disminuye. En este estudio los valores de RAS indican que no se tiene peligro de sodificación del suelo por el uso de esta agua. Al respecto, estos valores de RAS son similares a los que encontraron Rodríguez *et al.* (2009), Sarabia *et al.* (2011), Cortés *et al.* (2009), al igual que en este trabajo, reportan agua con riesgo de sodicidad bajo y alto en salinidad (C4-S1).

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, bajo las condiciones en que se llevó a cabo la presente investigación, se concluye que la concentración de metales pesados es baja y cumple con los valores establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996, sin embargo, la aplicación de esta agua al riego agrícola puede ocasionar la acumulación de metales pesados en el suelo a largo plazo y no se recomienda por su riesgo de salinidad.

En cuanto a los valores de RAS que se encontraron, el agua no muestra riesgo de sodicidad. Mientras que los índices de CE, SE, SP y CSR indicaron que el agua no se recomienda para su uso agrícola, por el peligro de salinización del suelo y los cultivos. Finalmente, aunque el uso de esta agua en la agricultura es restringido, se recomienda evaluar su calidad microbiológica y realizar estudios en el punto de uso y producto final que tenga contacto con estas aguas, de esta manera, evaluar directamente el efecto en los cuerpos receptores.

Agradecimiento

El autor mediante este trabajo agradece a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por la asignación de los recursos económicos por medio de la dirección de investigación con el proyecto clave 2206 para realizar la investigación.

Literatura Citada

- APHA.
1998. Standard methods for examination of water and wastewater. 20th ed. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Pollution Control Federation (WPCF). Clessler, S. L., E. A. Greenberg and A. D. Eaton (editors). Washington, D. C. EUA. 1325 pp.
- Arenal R. del.
1985. Estudio hidrogeoquímico de la porción centro-oriental del valle del Mezquital, Hidalgo. *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. Revista* 6: 86-97.
- Argente L., González, L.M.; Plana, R.
2006. Efecto de altas concentraciones salinas sobre la germinación y el crecimiento del trigo (*Triticum aestivum*) variedad cuba-c 204. *Cultivos tropicales*, 27: 45-48.
- Ayers, R.S.; Westcot; D.W.
1987. La calidad del agua y su uso en la agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje. Roma, Italia. 174 pp.
- Bing, Z., Xianfang, S.; Yinghua, Z.; Dongmei, H.; Changyuan, T.; Yilei, Y.; Ying, M.
2012. Hydrochemical characteristics and water quality assessment of surface water and groundwater in Songnen plain, Northeast China. *Water Research*, 46: 2737-2748.
- Can Ch. A., Ramírez G.L.G.; Ortega E.H.M.; Cruz C.E.; Flores R.D.; Sánchez B.E.I.; Madueño M.A.
2014. Germinación y crecimiento de plántulas de *Phaseolus vulgaris* L. en condiciones de salinidad. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5: 753-763.
- Castellanos J.Z.; Uvalle B.J.X.; Aguilar S.A.
2000. La calidad del agua para uso agrícola. In: Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. Ed. INCAPA, 2da edición, pp. 158-166.
- Corinne, P.R.; Fang J.Z., McGrath P.S.
2006. Phytotoxicity of nickel in a range of European soils: Influence of soil properties, Ni solubility and speciation. *Environ. Pollut.*, 145: 596-605.
- Cortés J., J.M., Troyo D., E.; Murillo A., B.; García H., J.L.; Garatza P., J.; Suh-Lee, S.
2009. Índices de calidad del agua del acuífero del valle del Yaqui, Sonora. *Terra Latinoamericana*, 27: 133-141.
- Doneen, L.
1975. Water quality for irrigated agriculture. In: Plant in Saline Environments. Poljakoff-Mayber, A. and J. Gale (editors). Ecological Studies. Springer Verlag. NY. 15: 56-76.
- Eaton, F. M.
1950. Significance of carbonates in irrigation waters. *Soil Science*, 69: 123-133.
- Gómez Á., A.; Villalba A., A.; Acosta R., G.; Castañeda O., M.
2009. Metales pesados en el agua superficial del Río San Pedro durante 1997 y 1999. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 20: 1-8.
- Jiménez C., B. E.
2001. Contaminación del agua. In: La contaminación ambiental en México. Causas, efectos y tecnología aplicada. Limusa, México. pp. 33-316.
- Mancilla V., O. R.; Ortega E., H. M.; Ramírez A., C.; Uscanga M., E.; Ramos B., R.; Reyes O., A. L.
2012. Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de Puebla y Veracruz, México. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 28: 39-48.
- Mancilla V., O.R.; Bautista O., A.L.; Ortega E., H.M.; Sánchez B., E.I.; Can Ch., A.; Guevara G., R.D.; Ortega M., Y.M.
2014. Hidrogeoquímica de las salinas de Zapotitlán y los lagos-cráter Alchichica y Atexcac, Puebla. *Idesia*, 32: 55-69.
- Nishanthiny, S. C.; Thushyanthy, M.; Barathithasan, T.; Saravanan, S.
2010. Irrigation Water Quality Based on Hydro Chemical Analysis, Jaffna, Sri Lanka. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 7: 100-102.
- Richards, L.A., Allison, L.E.; Brown, J.W.; Hayward, H.E.; Bernstein, L.; Fireman, M.; Pearson, G.A.; Wilcox, L.V.; Bower, C.A.; Hatcher, J.T.; Reeve, R.C.
1954. Diagnosis and improvement saline and alkali soils. (L. A. Richards, editor). United States Salinity Laboratory Staff. United States Department of Agriculture. 172 pp.
- Rodríguez O., J.C.; García H., J.L.; Valdez C., R.D.; Lara M., J.L.; Rodríguez F., H.; Loredó O., C.
2009. Calidad agronómica de efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10: 355-367.
- Sarabia M., I.F.; Cisneros A., R.; Aceves de alba., J.; Durán G., H.M.; Castro L.J.
2011. Calidad del agua de riego en suelos agrícolas y cultivos del valle de San Luis Potosí, México. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 27: 103-113.
- Sánchez B., E.I.; Camacho E., M.A.; Rodríguez L., A.; Ortega E., H.M.
2013. Physiological behavior of potato cv. Tollocan at diverse types of salinity. *Journal of Plant Studies*, 2: 120-134.
- SEMARNAT.
1996. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. 11 de enero de 1995.
- Siebe, Ch.
1994. Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el distrito de riego 03, Tula, Hidalgo, México. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 10: 15-21.
- Silveira M., L.A.; Alleoni L., R.F.; Guilherme L., R.G.
2003. Biosolids and heavy metals in soils. *Scientia Agricola*, 60: 793-806.
- Soto R., E.; Lozano R., T.; Barbarín C., J. M.; Alcalá R., M.
2004. Remoción de metales pesados en aguas mediante agentes químicos. *Ingenierías*, 2: 46-51.
- Velázquez M., M.A.; Ortega E., H.M.; Martínez G., A.; Kohashi S., J.; García C., N.
2002. Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Terra latinoamericana*, 20: 459-464.
- Zamora F., Rodríguez, N., Torres, D.; Yendis, H.
2008. Efecto del riego con aguas residuales sobre propiedades químicas de suelos de la planicie de Coro, Estado Falcón. *Bioagro*, 20: 193-199.

