

EVALUACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE MÉXICO UTILIZADAS PARA RIEGO

• Ronald Ernesto Ontiveros-Capurata* •
Universidad de la Sierra Juárez, México

*Autor de correspondencia

• Lamine Diakite-Diakite • M. Edna Álvarez-Sánchez •
• Pablo Miguel Coras-Merino •
Universidad Autónoma Chapingo, México

Resumen

En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México se generan hasta 56.6 m³/s de aguas residuales (Conagua, 2009b). Por más de cien años, estas aguas residuales de origen predominantemente doméstico han sido utilizadas sin tratar para regar más de 85 000 hectáreas de cultivo en el valle del Mezquital. Diversos estudios han mostrado los efectos nocivos de la aplicación directa de tales aguas en la salud y el medio ambiente, pero existen muy pocas investigaciones sobre su evaluación con fines de riego, considerando parámetros como salinidad y sodicidad. En este estudio se evaluaron las aguas residuales de los tres principales canales de drenaje (Gran Canal de Desagüe, Túnel Emisor Central y Río El Salto), utilizando los criterios de calidad de agua riego. Los resultados indican que con excepción del pH, las aguas no cumplen con las normas mexicanas vigentes en los parámetros conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, turbidez, iones bicarbonato y sodio. En cuanto a salinidad y sodicidad, estas aguas pueden usarse en forma directa siempre y cuando se tomen en cuenta las características del suelo donde se van a aplicar y algunas prácticas de manejo, como lavado de sales y uso de especies tolerantes a la salinidad. El riego prolongado con dichas aguas, con el tiempo podría afectar los suelos, por lo que se recomienda tratarlas antes de su uso directo.

Palabras clave: agua residual, calidad del agua, salinidad, sodicidad, Valle del Mezquital.

Introducción

Las aguas residuales generadas en los centros urbanos se han convertido en una alternativa viable para cubrir las necesidades hídricas de otros sectores, como la agricultura. Sin embargo, representan un serio problema ambiental, sobre todo en países en desarrollo, donde es frecuente el uso de agua sin tratar. México ocupa el segundo lugar en el mundo en el riego con aguas tratadas (130 000 ha) y no tratadas (190 000 ha), sólo superado por Chile y China, respectivamente (Jiménez y Asano, 2008). El caso más representativo se encuentra en los distritos de riego 100, 003 y

012 del Valle del Mezquital en Hidalgo, donde se recibe un volumen promedio de 31 a 56.6 m³/s de aguas residuales sin tratar (Jiménez *et al.*, 2005a; Conagua, 2009b), provenientes de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), para regar más de 85 000 hectáreas de cultivos (Peasey *et al.*, 2000).

En varios estudios realizados en esta región, sobre todo enfocados a metales pesados y parámetros biológicos, se reporta que el uso de aguas residuales sin tratar ha traído graves consecuencias para la salud (Silva *et al.*, 2002; Melo *et al.*, 2003) y el medio ambiente (Flores *et al.*, 1992; Siebe, 1994; Gutiérrez *et al.*, 1995; Cajuste *et al.*, 2001; Prieto *et al.*, 2009). A pesar de esto,

en la actualidad se siguen utilizando, incluso se observa una tendencia de incremento en la superficie regada y la producción (Conagua 2009a).

Los aspectos de salinidad y sodicidad han sido considerados muchas veces como secundarios en la mayoría de los estudios realizados en aguas residuales que se aplican como riego, porque no representan un riesgo directo sobre las personas; sin embargo, son un peligro potencial a mediano y largo plazos, que podría disminuir la productividad del suelo (reducción de la permeabilidad e infiltración) y los cultivos (reducción del rendimiento) si no se le considera de forma oportuna. Varios autores han reportado los efectos nocivos del riego con altos niveles de sales y sodio (Beltran, 1999; Deniz *et al.*, 2010; Muyen *et al.*, 2011). En México, estudios realizados en esta misma región reportan algunas zonas con saturación de sodio y altos niveles de salinidad (Jiménez *et al.*, 2005b). En este trabajo se pretenden caracterizar y evaluar las aguas residuales sin tratar usadas como riego, en función de los principales parámetros de calidad que son de importancia en el riego.

Metodología

La zona de estudio comprende la red hidrográfica de drenaje, que abarca las salidas artificiales, canales y ríos que llegan al Valle del Mezquital en Hidalgo, provenientes de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). El Canal de la Compañía es el principal cuerpo receptor de las descargas de la región oriente de la ciudad de México; aguas abajo confluye con otros drenes, como el Río de los Remedios y Río Churubusco, formando El Gran Canal de Desagüe (figura 1). Sobre este mismo canal, a la altura de los túneles de Tequisquiatic, se incorporan las descargas de la zona centro y oriente de la ciudad de México, y de los municipios de Ecatepec y Ciudad Nezahualcóyotl, que se ubican en la zona norte de la ZMCM. El Túnel Emisor Central subterráneo concentra las descargas del centro

y sur de la ciudad de México hasta su salida en el estado de Hidalgo. En este punto de salida del Túnel Emisor Central converge el río El Salto, el cual inicialmente lleva el nombre de Emisor Poniente, y colecta las aguas de la zona poniente de la ciudad de México y de los municipios industriales de Tlalnepantla, Naucalpan y Cuautitlán en el estado de México. El río Cuautitlán y el Canal Santo Tomás son afluentes del río El Salto. El primero contiene aguas de lluvia provenientes de la Presa Guadalupe, mientras que el segundo colecta las descargas del Emisor Poniente y los municipios de la zona poniente de la ciudad de México.

Las aguas colectadas por el sistema de drenaje llegan al Valle del Mezquital, donde son utilizadas para regar cerca de 84 000 hectáreas de alfalfa y maíz forrajero en los tres distritos de riego (Tula, Alfajayucan y Ajacuba) de esta zona, empleando láminas de riego superiores a 1 m (Pérez *et al.*, 2000).

Ubicación de los sitios de muestreo

Las muestras se colectaron a lo largo del sistema de drenaje de la ciudad México antes de los distritos de riego, en el periodo de febrero a abril de 2011 (figura 1). Se consideraron siete sitios de muestreo, denominados sitios 1, 2 y 3 (Gran Canal de Desagüe), sitio 4 (Túnel Emisor Central), y sitios 5, 6 y 7 (río El Salto). En cada sitio se tomaron hasta diez muestras de un litro, y a dos profundidades (10 cm y 1.2 m), donde fue factible según lo recomendado por CCME (1993) para el muestreo de aguas residuales en canales o ríos.

La toma de muestras se realizó siguiendo los métodos estándares de muestreo de aguas residuales definidos en la norma mexicana NMX-AA-003-1980. Las muestras de agua en profundidad fueron recolectadas mediante una botella tipo Van Dorn horizontal de la marca WildCo y las superficiales con una botella de plástico con tapa de polipropileno de un litro de capacidad. En el momento de la toma de la muestra, en cada sitio se midió

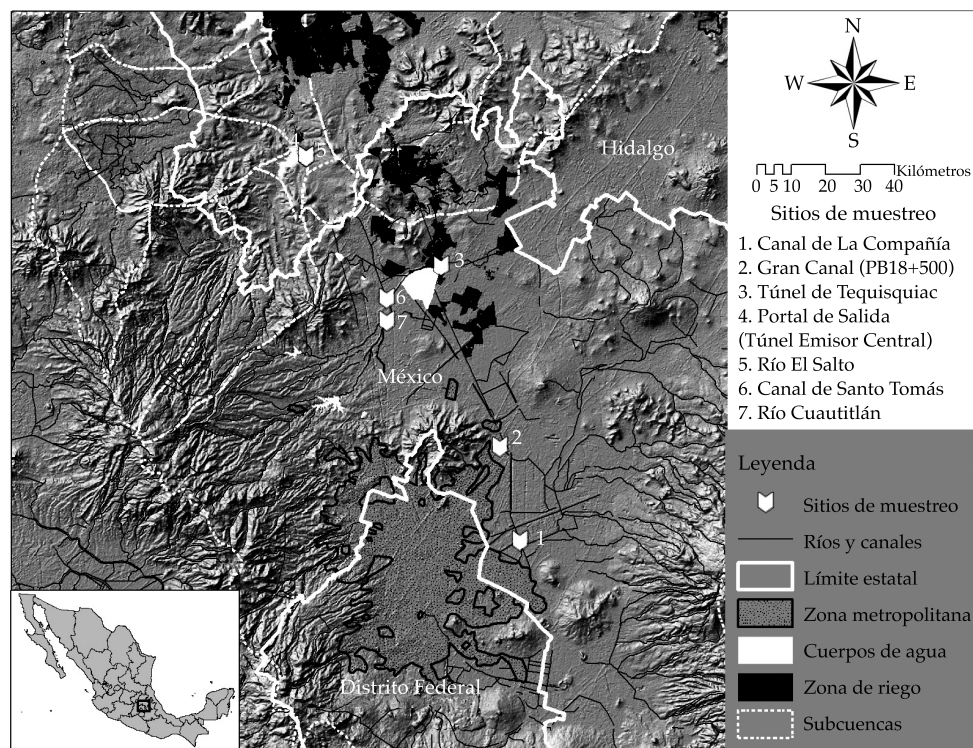


Figura 1. Ubicación de los sitios de muestreo.

el pH, conductividad eléctrica, temperatura y sólidos totales, mediante un censor medidor multiparámetros de la marca Hanna, modelo HI9811-5, y la turbidez con un turbidímetro portátil marca Hanna modelo HI93703-11.

Las muestras se trataron y preservaron según la norma oficial mexicana (NMX-AA-003-1980) y los estándares para el muestreo de aguas residuales ISO 5667:3 (ISO, 2003). Las muestras para determinar metales disueltos fueron filtradas con un filtro de 2.5 μm de diámetro, posteriormente se adicionó de 1 a 2 ml de ácido nítrico concentrado hasta alcanzar un pH menor a 2; a las muestras destinadas para el análisis de metales totales se les realizó una digestión ácida.

Métodos de análisis

La metodología para el análisis químico de las muestras se rige por las normas y los proyectos de norma vigentes en México: para metales

(NMX-AA-051-SCFI-2001), pH (NMX-AA-008-SCFI-2011), conductividad eléctrica (NMX-AA-093-SCFI-2000), sulfatos (NMX-AA-074-1981), cloruros (NMX-AA-073-SCFI-2001), turbidez (NMX-AA-038-SCFI-2001), sólidos y sales disueltas (NMX-AA-034-SCFI-2001), los mismos que son compatibles con los métodos aprobados por la USEPA y establecidos como métodos estándares de análisis por la APHA-AWWA-WEF (1999).

Para el cálculo de sólidos totales (ST), sólidos totales volátiles (STV) y sólidos totales fijos (STF) se utilizó el método descrito por la APHA-AWWA-WEF (1999); los metales totales y disueltos fueron determinados mediante absorción atómica (calcio y magnesio); el potasio y sodio por flamometría (USSL, 1954); el análisis de aniones totales, cloruros, carbonatos y bicarbonatos se realizó por volumetría, según lo recomendado por el USSL (1954); y sulfatos por precipitación del sulfato de bario, según lo recomendado por el USSL (1954).

Química del agua de riego

El grado de saturación respecto a un ión (i) en particular se puede determinar a partir de la actividad iónica del ión en cuestión, la misma que viene definida por la siguiente relación propuesta por Tanji (1990):

$$a_i = \gamma_i m_i \quad (1)$$

Donde a_i es la actividad iónica; γ_i el coeficiente de actividad iónica, y m_i es la concentración molar del ión i . A su vez, el coeficiente de actividad iónica γ_i está relacionado con la fuerza iónica I a través de la siguiente relación (Stumm y Morgan, 1981):

$$\log \gamma_i = -0.509 z_i^2 \left[\frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} - 0.31 \right] \quad (2)$$

Donde z_i es la carga del ión en cuestión. Esta relación es válida para valores de $I < 0.5$ mol/l y a 25 °C. Para el cálculo de I se puede utilizar la relación propuesta por Griffin y Jurinak (1973), que se detalla a continuación:

$$I = 0.5 \sum_i m_i z_i^2 \quad (3)$$

Donde m_i es la concentración molar y z_i es la carga del ión en cuestión (i). Por otro lado, Tanji (1990) indica que existe una relación directa entre la actividad iónica (I) y la conductividad eléctrica (CE) medida en dS/cm, expresada a través de la siguiente relación:

$$I = 0.0127 CE \quad (4)$$

Estimación de la salinidad y sodicidad del agua de riego

El efecto del sodio en las propiedades físicas del suelo se estima mediante la relación de absorción de sodio (RAS), según la expresión propuesta por el USSL (1954):

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{+2} + Mg^{+2}}{2}}} \quad (5)$$

Donde las concentraciones de los iones vienen expresadas en meq/l. Cuando los iones presentes en el agua, en especial bicarbonatos y calcio, están en cantidades apreciables, se calculó un valor de RAS ajustado, según la metodología desarrollada por Lesch y Suarez (2009).

La clasificación de aguas se realizó siguiendo el criterio propuesto por la FAO (Ayers y Westcot, 1985) y del Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos (USSL, 1954).

Resultados

Evaluación in situ (pH y turbidez)

El pH medido en el Gran Canal de Desagüe (sitios 1, 2 y 3) fue de 7.6 ± 0.23 ; mientras que para los otros canales, los valores de pH fueron de 7.3 ± 0.21 (río El Salto) y 7.5 ± 0.16 (Túnel Emisor Central) (figura 2). Los valores de la desviación estándar fueron muy bajos, lo cual indica una baja variabilidad a lo largo de cada canal. Los valores de turbidez medidos fueron altos, con gran variabilidad a lo largo de los canales, 123.7 ± 48.8 NTU (Gran Canal de Desagüe), 109.8 ± 10.7 (Túnel Emisor Central) y 68.5 ± 52.8 (río El Salto) (figura 3).

Conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos

El valor de conductividad eléctrica (CE) para el Gran Canal de Desagüe fue más alto ($1\ 876.7 \pm 217.2$ μ S/cm), comparado con el Túnel Emisor Central ($1\ 382 \pm 46.5$ μ S/cm) y el río El Salto (876.2 ± 441.1 μ S/cm). Esta alta variabilidad en el río El Salto se debe a que el tramo inicial (sitio 7) no contiene las descargas del Canal Emisor Poniente, por lo que presenta los valores más bajos (369.2 μ S/cm) (figura 4). La cantidad de sólidos totales disueltos (STD) sigue un comportamiento similar, el Gran Canal de Desagüe presenta un valor de 936.8 ± 107.8 mg/l, mientras que en el Túnel Emisor Central y en el río El Salto, los valores son de 688.7 ± 23.2 μ S/cm y 437.1 ± 219.4 μ S/cm, respectivamente (figura 5).

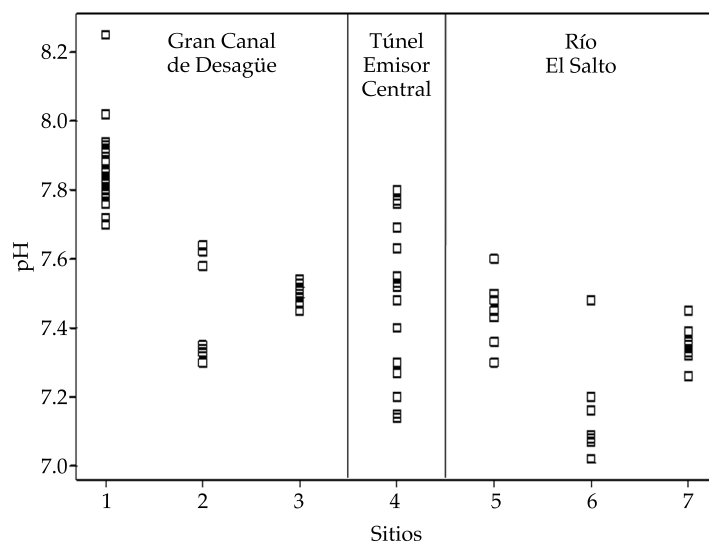


Figura 2. Valores de pH para las muestras analizadas, comparadas con los límites permisibles, según los criterios de calidad vigentes: CE-CCA-001/89(4.5-9.0); NTE-CCA-032/91(6.5-8.5).

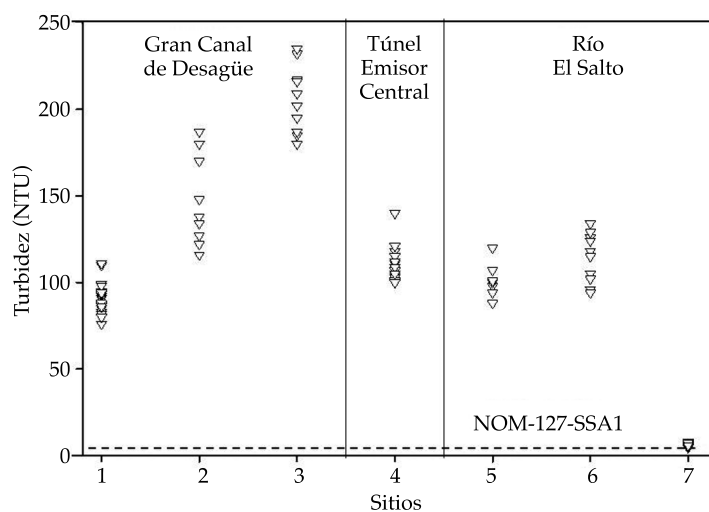


Figura 3. Valores de turbidez para las muestras analizadas, comparadas con los límites permisibles, según los criterios de calidad vigentes, NOM-127-SSA1-1994 (línea punteada).

Sólidos totales, sólidos totales volátiles y sólidos totales fijos

La cantidad de sólidos totales (ST), sólidos totales volátiles (STV) y sólidos totales fijos (STF) para las muestras analizadas y su variabilidad se muestran en la figura 6. El Gran Canal de Desagüe (sitios 1, 2, 3) presenta mayor cantidad de ST, STV y STF, en comparación con los demás canales. Los ST

en este canal alcanzan un valor de $1\,277\text{ mg/l} \pm 86.0\text{ mg/l}$, mientras que el Túnel Emisor Central y el río El Salto alcanzan valores de $987.7\text{ mg/l} \pm 79.8\text{ mg/l}$ y $649.1\text{ mg/l} \pm 326.5\text{ mg/l}$, respectivamente.

Cationes disueltos y suspendidos

La cantidad de metales disueltos determinados para cada canal se muestran en la figura 7. El

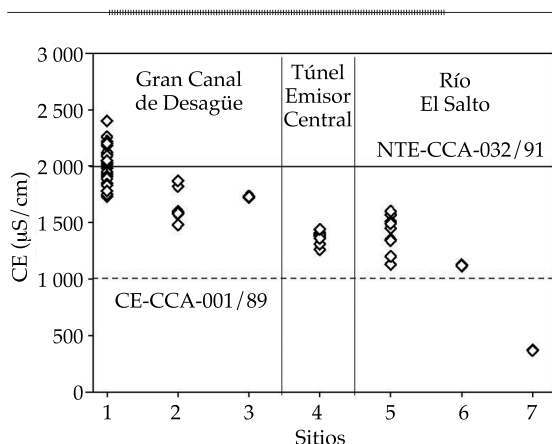


Figura 4. Valores de conductividad eléctrica (CE) para las muestras analizadas, comparadas con los límites permisibles de los criterios de calidad vigentes CE-CCA-001/89 (línea punteada) y NTE-CCA-032/91 (línea sólida).

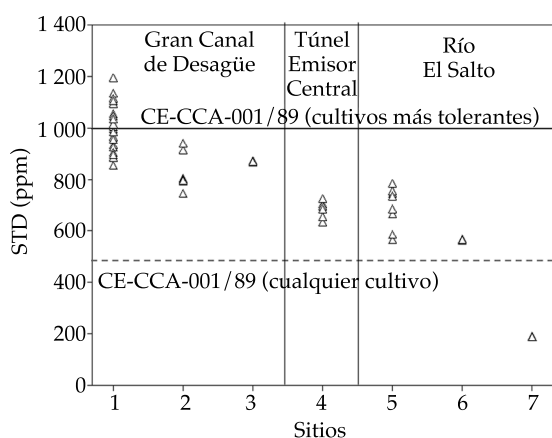


Figura 5. Valores de sólidos totales disueltos (STD) para las muestras analizadas, comparadas con los límites permisibles del criterio de calidad vigente CE-CCA-001/89 para cualquier cultivo (línea punteada) y cultivos más tolerantes (línea sólida).

Gran Canal de Desagüe presenta los valores más altos de cationes disueltos, la cantidad de sodio disuelto en este canal alcanzó valores de 113 ± 7.14 mg/l, mientras que en el Túnel Emisor Central y en el río El Salto, los valores fueron de 80.6 ± 7.1 mg/l y 55.5 ± 31 mg/l, respectivamente. La concentración de potasio en el Gran Canal de Desagüe fue de $53.7 \pm$

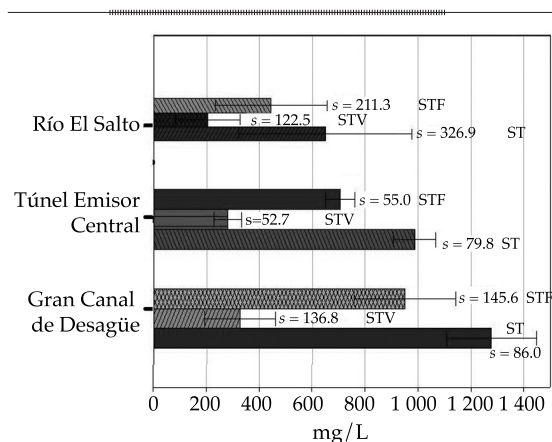


Figura 6. Cantidades de sólidos totales (ST), sólidos totales volátiles (STV) y sólidos totales fijos (STF) para los canales analizados: Gran Canal de Desagüe (sitios 1, 2 y 3), Túnel Emisor Central (sitio 4), río El Salto (sitios 5, 6 y 7).

18.4 mg/l, comparado con la del Túnel Emisor Central (32.6 ± 3 mg/l) y el río El Salto (32.8 ± 13.8 mg/l).

Cationes y aniones totales

Las cantidades de aniones y cationes encontrados en los canales se muestran en la figura 8; los iones dominantes en los tres canales son sodio y bicarbonato. Las cantidades varían en los tres canales, pero se observa una misma secuencia de concentración de cationes: $\text{Na} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{K}$ y de aniones $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{CO}_3^{2-}$, aunque con mayor variabilidad en el río El Salto.

El sodio alcanzó valores de 6.9 ± 0.9 meq/l en el Gran Canal de Desagüe; mientras que en el Túnel Emisor Central y en el río El Salto, estos valores se reducen a 4.9 ± 0.5 meq/l y 2.8 ± 1.5 meq/l, respectivamente. Las cantidades de bicarbonato fueron muy similares en los tres canales: 6.6 ± 1.3 meq/l para el Gran Canal de Desagüe; 5.9 ± 1 meq/l para el Túnel Emisor Central, y 4.9 ± 2.4 meq/l para el río El Salto.

Actividad iónica

La figura 9 muestra los valores de actividad iónica obtenidos para los tres canales

estudiados. En el Gran Canal de Desagüe se observa mayor actividad iónica de cloruros, con valores de 6.3 ± 0.6 mmol/l y sodio con 8.0 ± 1 mmol/l; en tanto que el Túnel Emisor

Central presenta mayor actividad para bicarbonatos, con 5.4 ± 0.3 mmol/l y sodio con 5.4 ± 0.3 mmol/l.

Por último, el río El Salto presenta valores más altos para bicarbonatos con 4.5 ± 2 mmol/l y sodio con 3.2 ± 1.7 mmol/l. La variabilidad en este último canal se debe a que el primer tramo (sitio 7) presenta cantidades pequeñas de iones, ya que no contiene las descargas del emisor poniente.

Relación de adsorción de sodio (RAS)

La relación de adsorción de sodio ajustado (RAS_{ajus}) de las aguas residuales estudiadas fueron mayores en el Gran Canal de Desagüe (4.6 ± 0.4), comparados con las del Túnel Emisor Central (3.9 ± 0.2) y el río El Salto (2.4 ± 1.2).

Caracterización de las aguas de riego

De acuerdo con la valoración con el criterio de clasificación FAO (Ayers y Westcot, 1985), todos los canales presentan grado de res-

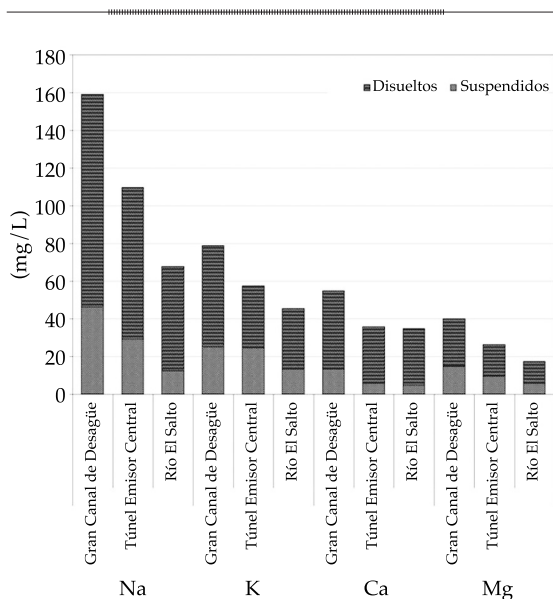


Figura 7. Concentración de cationes disueltos y suspendidos para los canales estudiados.

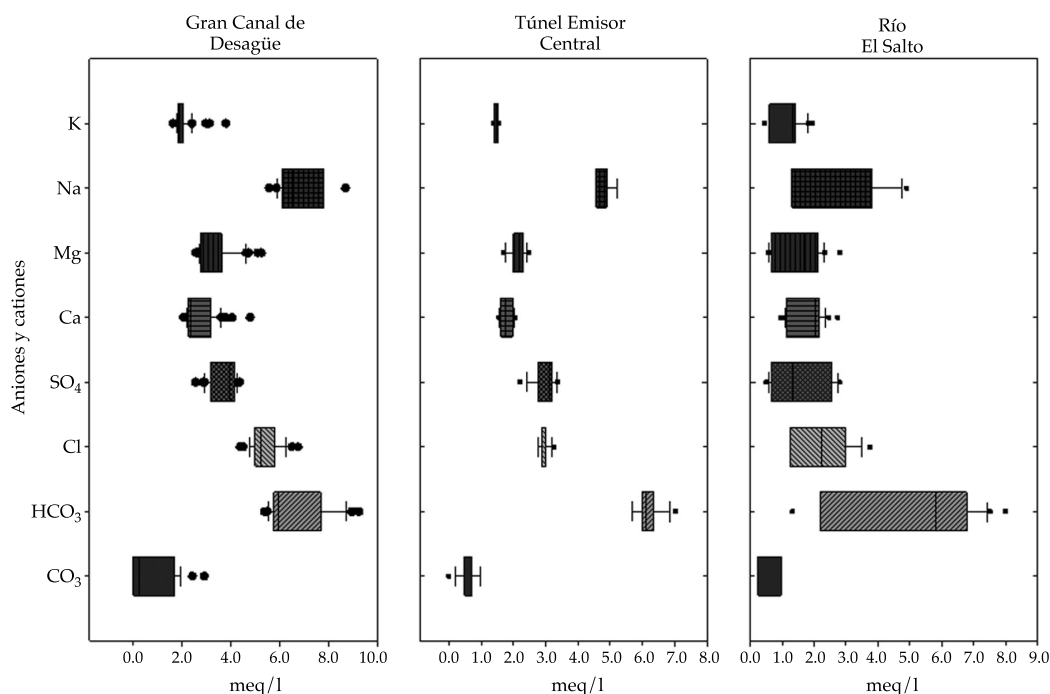


Figura 8. Cantidad de cationes y aniones totales en los canales estudiados y variabilidad de las muestras analizadas.

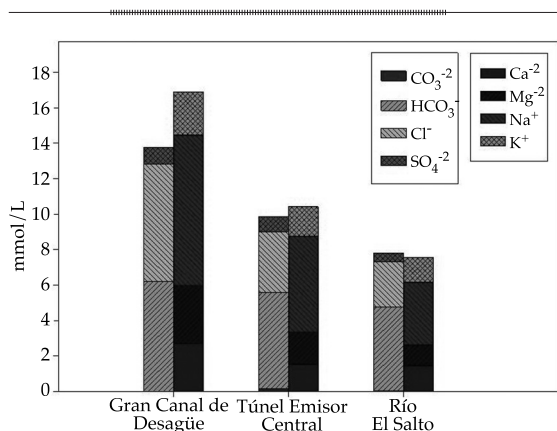


Figura 9. Actividad iónica "a_i" (mmol/l) de los iones analizados en los canales estudiados.

tricción que va de ninguna a ligera para todos los parámetros de decisión; la restricción severa fue hallada sólo en el sitio 3 debido a bicarbonatos (cuadro 1). El resultado de la valoración de las aguas residuales, según los riesgos de reducción de la infiltración, a partir de los valores de RAS_{ajus} y CE propuesto por la FAO (Ayers y Westcot, 1985) refleja resultados similares a los anteriores (figura 10).

Según el criterio de clasificación propuesto por el USSSL (1954), las aguas pertenecen a las clases C2, C3 y C4 de salinidad, y S2 y S1 de sodicidad; el Gran Canal de Desagüe pertenece a las clases C3-S3 y C4-S3; mientras que el Túnel Emisor Central se ubica en la clase C3-S2, y el río El Salto en las clases C2-S1 y C3-S2 (figura 11).

Discusión

Según los criterios ecológicos y normas mexicanas vigentes (CE-CCA-001/89; NTE-CCA-032/91; NOM-127-SSA1-1994), con la excepción del pH, las aguas de los tres canales no son recomendables para su uso directo en riego sin tratamiento (figura 2) debido a su alto nivel de turbidez (figura 3).

Las figuras 4 y 5 muestran los valores de conductividad eléctrica (CE) y sólidos totales disueltos (STD), respectivamente, comparados con los límites establecidos por los criterios de calidad de agua (CE-CCA-001/89). Los tres canales sobrepasan estos límites y no deben utilizarse para riego directo sin tratar, excepto

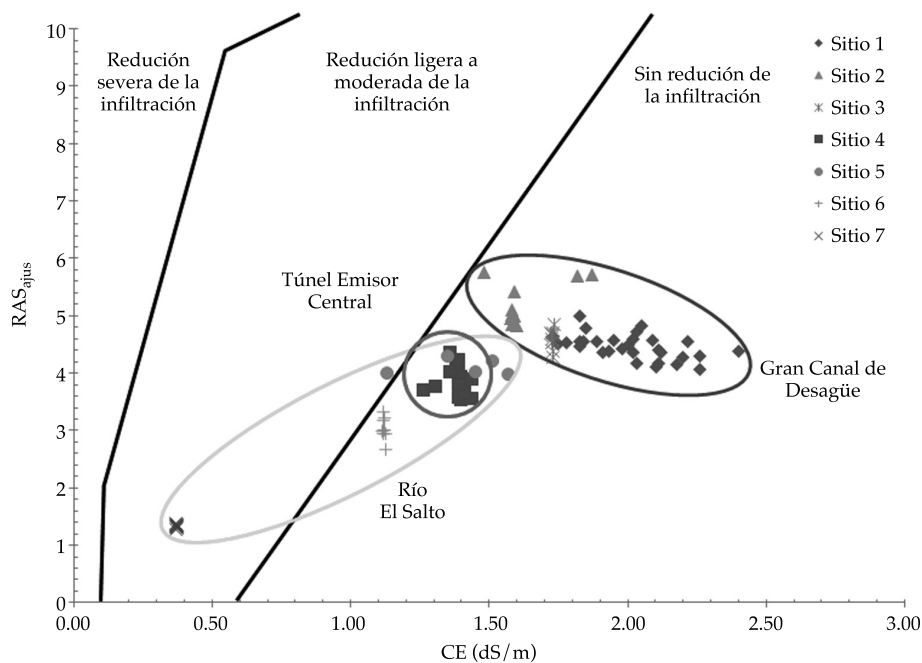


Figura 10. Clasificación de las muestras analizadas según la reducción de la infiltración debida a la RAS_{ajus} y CE.

Cuadro 1. Grado de restricción para el uso como riego, según el criterio de clasificación FAO (Ayers y Westcot, 1985).

Sitio	Parámetros de decisión				
	Salinidad	Infiltración	Sodio	Cloruro	Bicarbonatos
1	Ligero	Ninguna	Ligero	Ligero	Ligero
2	Ligero	Ninguna	Ligero	Ligero	Ligero
3	Ligero	Ninguna	Ligero	Ligero	Severo
4	Ligero	Ninguna	Ligero	Ninguna	Ligero
5	Ligero	Ninguna	Ligero	Ninguna	Ligero
6	Ligero	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ligero
7	Ninguna	Ligero	Ninguna	Ninguna	Ligero

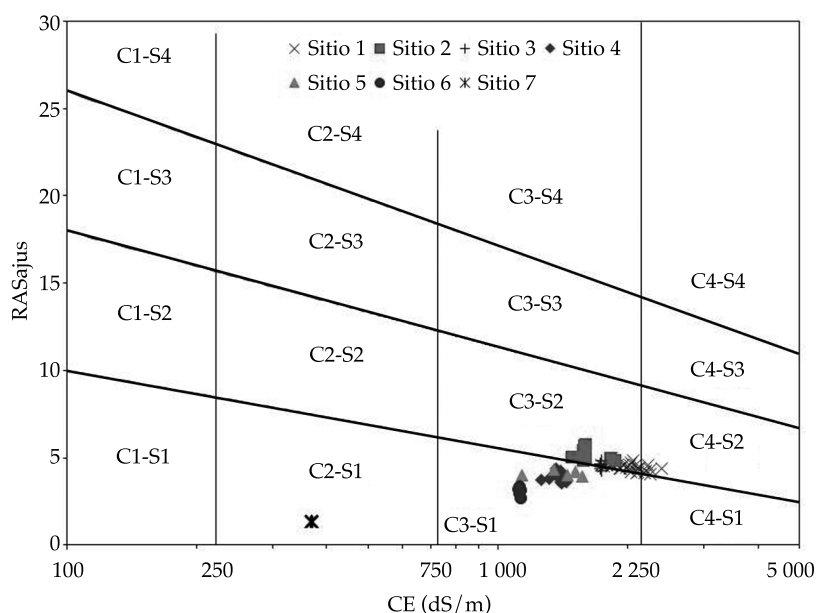


Figura 11. Clasificación de las muestras analizadas según el criterio del USSS (1954), C1 (salinidad baja), C2 (salinidad media), C3 (salinidad alta), C4 (salinidad muy alta), S1 (sodicidad baja), S2 (sodicidad media), S3 (sodicidad alta) y S4 (sodicidad muy alta).

el tramo inicial del río El Salto (sitio 7), antes de recibir las descargas del canal emisor poniente. De acuerdo con Weiner (2008), los altos valores de contaminación de las aguas están asociados con la presencia de aniones de carbonatos, cloruros, fosfatos y nitratos.

De acuerdo con la norma NTE-CCA-032/91, los altos valores de ST, STV y STF indican un elevado grado de contaminación de los tres canales, en particular El Gran Canal de Desagüe, seguido del Túnel Emisor Central y

el río El Salto. Según los resultados obtenidos, los canales presentan una predominancia de STF sobre STV, lo cual está asociado con un alto contenido de compuestos órgano-minerales en suspensión, como detergentes y surfactantes (APHA-AWWA-WEF, 1999).

La cantidad de metales disueltos en el agua es un parámetro determinante para elegir el método de tratamiento requerido antes del reúso (Tchobanoglous *et al.*, 2003). Afín con los resultados, la porción de metales disueltos (43.5

mg/l) es mayor que la de metales suspendidos (17.0 mg/l) para todos los cationes estudiados; de igual manera, las cantidades promedio de sodio disuelto (83 mg/l) y potasio disuelto (39.5 mg/l) en todos los sitios fueron mayores a la de otros cationes ($\text{Ca} = 34 \text{ mg/l}$ y $\text{Mg} = 17.9 \text{ mg/l}$). Lo anterior sugiere, de acuerdo con Davis (2010), que para tratar altas cantidades de sólidos disueltos, los métodos de tratamiento recomendables son los de membrana, como ósmosis inversa, electrodiálisis o nano filtración; en este caso en particular, y tal como lo sugieren Tchobanoglous *et al.* (2003), cuando se presentan altas cantidades de sólidos sedimentables y suspendidos, éstos deben tratarse primero mediante tratamiento del tipo primario (sedimentación) antes de cualquier otro tratamiento posterior. Al respecto, en la Conagua (2008) se contempla la construcción de una planta de tratamiento en Atotonilco de Tula para el agua residual que llega al Valle del Mezquital principalmente, destinada a disminuir la contaminación biológica y de sólidos suspendidos mediante procesos de sedimentación y tratamiento químico (cloración); sin embargo no se considera tratamiento de sólidos disueltos. El tratamiento de aguas residuales bajo estas condiciones no disminuye la cantidad disuelta de sales en el agua, siendo ésta la fracción soluble más importante en términos de calidad de agua de riego por sus efectos nocivos en los cultivos y propiedades del suelo.

Los tres canales estudiados reflejan valores de actividad iónica más altos para cationes (2.8 mmol/l) que para aniones (2.5 mmol/l). El anión predominante en todos los canales fue el bicarbonato, la importancia sobre otros iones se debe principalmente a los valores de pH (Rhoades, 1991; Manahan, 2000; Weiner, 2008). A medida que el pH aumenta, los iones bicarbonato se forman por la disociación del ácido carbónico, y si este incremento continúa, se convierten en carbonatos (Manahan, 2000); esta correspondencia ha sido descrita en los diagramas de disociación del ácido carbónico

y varios estudios (Langmuir, 1997; Sawyer *et al.*, 2003; Weiner, 2008). A valores de pH cercanos a 8.3, los bicarbonatos representan entre 90 y 100% de la fracción soluble (Manahan, 2000), lo cual es congruente con los resultados obtenidos en este trabajo.

Los cationes y aniones determinados permiten la formación de diversas sales en solución, cuya concentración depende del grado de solubilidad y del pH, entre otros factores. La capacidad de combinación entre iones de diferente carga puede medirse a partir de la actividad iónica (Tanji, 1990). Los resultados obtenidos indican que los posibles compuestos susceptibles de formarse en estas aguas residuales estudiadas, ordenados de mayor a menor solubilidad y actividad iónica, son: $\text{CaCl}_2 > \text{MgCl}_2 > \text{KHCO}_3 > \text{NaCl} > \text{KCl} > \text{MgSO}_4 > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{K}_2\text{SO}_4 > \text{KHCO}_3$, cuya solubilidad oscila entre 44.23% y 9.3% (Lide, 2010). De acuerdo con el análisis de las propiedades espectrales de estas aguas residuales, las sales de cloruro y bicarbonato son los compuestos dominantes (datos no presentados).

El incremento en los niveles de RAS en los tramos finales de cada canal se debe a la incorporación de descargas de diferente tipo, principalmente industriales. Según el criterio de Ayers y Westcot (1985), no se recomienda el uso de estas aguas para riego directo, por el riesgo de reducción de permeabilidad, sobre todo en suelos de textura arcillosa; sólo el tramo inicial del río El Salto con valor de RAS_{ajus} de 1.3 es recomendable para reúso.

A pesar de que las aguas de los tres canales presentan altos niveles de contaminación y restricciones ligeras en todos los parámetros, la reducción de infiltración refleja no ser afectada por la cantidad de sales; sin embargo, al evaluar las aguas considerando el RAS_{ajus} y CE, se observa que las concentraciones de sales están muy cercanas al límite de riesgo, además de que la reducción de la infiltración llega a ser de ligera a moderada.

Según el criterio del USSS (1954), las aguas del Gran Canal de Desagüe presentan una salinidad alta (C3) a muy alta (C4) y alta

sodicidad (S3), lo que indica que estas aguas no pueden utilizarse en condiciones de drenaje restringido y sólo se recomienda su uso si hay prácticas adicionales, como lavado de sales, enmiendas químicas y especies tolerantes a la salinidad. Por otra parte, las aguas del Túnel Emisor Central de salinidad alta (C3) y sodicidad media (S2) no deben utilizarse en suelos con drenaje restringido; aun así deben hacerse prácticas de manejo de sales y en texturas medias a gruesas. Por último, las aguas del río El Salto presentan salinidad media (C2) a alta (C3), y sodicidad baja (S1) a media (S2), que pueden utilizarse sin problemas si existen buenas condiciones de lavado de sales, texturas medias a gruesas y preferiblemente con especies tolerantes a salinidad.

Considerando que la norma mexicana actual no toma en cuenta aspectos relacionados con sodio, cloro y bicarbonato, se recomienda una revisión, análisis y actualización de las normas vigentes, para considerar los aspectos referidos al agua de riego.

Conclusiones

La evaluación química del agua residual sin tratar proveniente de la ZMCM y utilizada para riego en el Valle del Mezquital refleja que las aguas de los tres canales estudiados —Gran Canal de Desagüe, Túnel Emisor Central y río El Salto— no son recomendables para riego directo sin tratar, por su alta concentración de sales; si bien cumplen con algunos parámetros establecidos por las normas y criterios vigentes, tal como pH, están fuera de los límites recomendados por los criterios aceptados en el ámbito internacional en cuanto a turbidez, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos e iones.

En cuanto a salinidad y sodicidad, estas aguas pueden ser utilizadas en forma directa, siempre y cuando se tomen en cuenta las características del suelo donde se va a aplicar como riego, tales como algunas prácticas de manejo, como lavado de sales y uso de especies tolerantes a salinidad.

Los resultados obtenidos en cuanto a calidad del agua con fines de riego deberían ser ponderados en función de parámetros que no fueron analizados en este trabajo, como metales pesados, nitratos y fosfatos.

Por lo anterior, es indispensable realizar un tratamiento de las aguas residuales antes de su reúso como riego, con la finalidad de disminuir la alta concentración de sales, como bicarbonato, cloruros de sodio y metales pesados.

Recibido: 14/05/2012

Aceptado: 04/12/2012

Referencias

- APHA-AWWA-WEF. American Public Association-American Water Works Association-Water Environment Federation. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20ª edición. Washington, D.C.: APHA-AWWA-WEF, 1999, 1325 pp.
- AYERS, R. and WESTCOT, D. *Water quality for agriculture*. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper, 1985, 97 pp.
- BELTRAN, J. Irrigation with saline water: benefits and environmental impact. *Agricultural Water Management*. Vol. 44, 1999, pp. 183-194.
- CAJUSTE, L., VELÁSQUEZ, A., SIEBE, G., ALCANTAR, G. Cadmio, níquel, plomo en agua residual, suelo y cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Agrociencia*. Vol. 35, núm. 3, mayo-junio del 2001, pp. 267-274.
- CCME. Canadian Council of Ministers of the Environment. *Guidance manual on sampling analysis and data management for contaminated sites. Volume I: Main Report*. Manitoba, Canada: CCME, 1993.
- CE-CCA-001/89. Acuerdo por el que se establecen los criterios ecológicos de calidad del agua. En: *Gaceta Ecológica*. México, D.F.: Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, 1990, 2 v., pp. 38-45.
- CONAGUA. *Planta de tratamiento de aguas residuales Atotonilco de Tula, Estado de Hidalgo. Memoria del proyecto*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, 2008, 97 pp.
- CONAGUA. *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego. Año agrícola 2007-2008*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, 2009a, 389 pp.
- CONAGUA. *Estadísticas del Agua de la Región Hidrológico-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México*. México D.F.: Comisión Nacional del Agua, 2009b, 163 pp.
- DAVIS, M. Reverse Osmosis and Nanofiltration. En: *Water and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice*. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2010, pp. 1-4.

- DENIZ, F., SADHWANI, J., VEZA, J. New quality criteria in wastewater reuse. The case of Gran Canaria. *Desalination*. Vol. 205, No. 2010, pp. 716-722.
- FLORES, L., HERNÁNDEZ, G., ALCALÁ, R., MAPLES, M. Total contents of cadmium, copper, manganese and zinc in agricultural soils irrigated with wastewater from Hidalgo, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*. Vol. 8, núm. 1, 1992, pp. 37-46.
- GRIFFIN, A. and JURINAK, J. Estimation of activity coefficients from the electrical conductivity of natural aquatic systems and soil extracts. *Soil Science*. Vol. 116, No.1, July, 1973, pp. 26-30.
- GUTIERREZ-RUIZ, M.E., SIEBE, C.H., and SOMMER, I. Effects of land application of wastewater from Mexico City on soil fertility and heavy metal accumulation: A bibliographical review. *Environmental Reviews*. Vol. 3, 1995, pp. 318-330.
- ISO 5667:3. 2003. Water quality - Sampling - Part 3: Guidance on the preservation and handling of water samples. Ginebra, Suiza: International Organization for Standardization, 2003, 31 pp.
- JIMÉNEZ, B. and ASANO, T. *Water reuse: an international survey of current practice, issues and needs*. Scientific and technical report. London: IWA Publishing, 2008.
- JIMÉNEZ, B., MAZARI, M., DOMÍNGUEZ, R. y CIFUENTES, E. El agua en el Valle de México. En: *El agua en México visto desde la Academia*. México, D.F.: Academia Mexicana de Ciencias México, 2005a, pp. 15-32.
- JIMÉNEZ, B., SIEBE, G., CIFUENTES, E. El reúso intencional y no intencional del agua en el valle de Tula. En: *El agua en México visto desde la Academia*. México, D.F.: Academia Mexicana de Ciencias México, 2005b, pp. 33-57.
- LANGMUIR, D. *Aqueous environmental geochemistry*. New Jersey: Prentice Hall Inc., 1997, 600 pp.
- LESCH, S.M., SUAREZ, D.L. A short note on calculating the adjusted SAR index. *Transactions of the ASABE*, Vol. 52, No. 2, 2009, pp. 493-496.
- LIDE, D. (editor). Aqueous solubility of inorganic compounds at various temperatures. Capítulo 8. En: *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 90ª edición. Boca Raton, EU: CRC Press/Taylor and Francis, 2010, pp. 112-117.
- MANAHAN, S. *Environmental chemistry*. Séptima edición. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, 2000, 912 pp.
- MELO, F., MÁRQUEZ, C., JUÁREZ, M., MARTÍNEZ, F., MIRANDA, P., ESQUIVEL, L., JUÁREZ, M. *Análisis de metales pesados en las aguas residuales del río San Javier y repercusión en la salud e impacto ambiental*. México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Química, 2003, 4 pp.
- MUYEN, Z. MOORE, G., WRIGLEY, R. Soil salinity and sodicity effects of wastewater irrigation in South East Australia. *Agricultural Water Management*. Vol. 99, No. 2011, pp. 33-41.
- NMX-AA-003-1980. Aguas residuales - Muestreo. México, D.F.: Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, publicada en el *Diario Oficial de la Federación* el 25 de marzo de 1980.
- NMX-AA-008-SCFI-2011. Análisis de agua - Determinación del pH - Método de prueba. México, D.F.: Secretaría de Economía, publicada en el *Diario Oficial de la Federación* el 05 de octubre del 2011.
- NMX-AA-034-SCFI-2001. Análisis de agua - Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. México, D.F.: Secretaría de Economía, publicada en el *Diario Oficial de la Federación* el 01 de agosto de 2001.
- NMX-AA-038-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. México, D.F.: Secretaría de Economía, publicada en el *Diario Oficial de la Federación* el 01 de agosto de 2001.
- NMX-AA-051-SCFI-2001. Análisis de agua - Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. México, D.F.: Secretaría de Economía, publicada en el *Diario Oficial de la Federación* 13 de agosto del 2001.
- NMX-AA-073-SCFI-2001. Análisis de agua - Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. México, D.F.: Secretaría de Economía, publicada en el *Diario Oficial de la Federación* el 13 de agosto de 2001.
- NMX-AA-074-1981. Análisis de agua - Determinación del ion sulfato. México, D.F.: Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, publicada en el *Diario Oficial de la Federación* el 10 de diciembre de 1981.
- NMX-AA-093-SCFI-2000. Análisis de agua - Determinación de la conductividad electrolítica - Método de prueba. México, D.F.: Secretaría de Economía, publicada en el *Diario Oficial de la Federación* el 18 de diciembre del 2000.
- NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano - Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. México, D.F.: Secretaría de Salud, publicada en el *Diario Oficial de la Federación* el 18 de enero de 1996.
- NTE-CCA-032/91. Acuerdo por el que se expide la Norma Técnica Ecológica, que establece los límites máximos permisibles de los parámetros de los contaminantes en las aguas residuales de origen urbano o municipal para su disposición mediante riego agrícola. *Gaceta Ecológica*. 2 vol. México, D.F.: Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, 1991, pp. 30-33.
- PEASEY, A., BLUMENTHAL, U., MARA, D., and RUIZ-PALACIO, G. *Review of Policy and Standards for Wastewater Reuse in Agriculture: A Latin American Perspective. Task No: 68-part II*. London: Well, 2000, 74 pp.

- PÉREZ, R., JIMÉNEZ, R., JIMÉNEZ, B.E., CHÁVEZ, A. ¿El Agua del Valle del Mezquital, fuente de abastecimiento para el Valle de México? Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, 21-24 marzo de 2000, Morelia, Michoacán, México, pp. 1-9.
- PRIETO, J., GONZÁLEZ, C., ROMÁN, A. y PRIETO, F. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Ecosystems*. Vol. 10, núm. 1, 2009, pp. 29-44.
- RHOADES, J. *Management of saline and sodic soils*. California: USDA-ARS Salinity Laboratory, 1991, 137 pp.
- SAWYER, C., McCARTY, P., and PARKIN, G. *Chemistry for environmental engineering and science*. Quinta edición. Boston: McGraw Hill Education, 2003, 752 pp.
- SIEBE, C. Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el Distrito de Riego 03, Tula, Hidalgo, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*. Vol. 10, núm. 1, 1994, pp. 15-21.
- SILVA, S., MUÑOZ, A., DE LA ISLA, M. e INFANTE, S. Contaminación ambiental en la región de Atlixco: 1 Agua. *Terra Latinoamericana*. Vol. 20, núm. 3, julio-septiembre de 2002, pp. 243-251.
- STUMM, W., MORGAN, J. *Aquatic Chemistry: an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters*. Segunda edición. New York: John Wiley & Sons, 1981, 780 pp.
- TANJI, K. (editor). *Agricultural salinity assessment and management*. American Society of Civil Engineers. ASCE Manual, No. 71. Nueva York: American Society of Civil Engineers, 1990, 631 pp.
- TCHOBANOGLOUS, G., BURTON, F., and STENSEL, D. *Wastewater engineering: Treatment and reuse*. Cuarta edición. Boston: McGraw Hill companies Inc., 2003, 1819 pp.
- USSL. US Salinity Laboratory Staff. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Handbook No. 60. Washington, D.C: USDA, 1954, 159 pp.
- WEINER, E. *Applications of environmental aquatic chemistry. A practical guide*. Segunda edición. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis, 2008, 436 pp.

Abstract

ONTIVEROS-CAPURATA, R.E., DIAKITE-DIAKITE, L., ÁLVAREZ-SÁNCHEZ, M.E. & CORAS-MERINO, P.M. Assessment of the use of wastewater for irrigation in Mexico City. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. IV, No. 4, September-October, 2013, pp. 127-140.

The Mexico City Metropolitan Area generates as much as 56.6 m³/s of wastewater (Conagua, 2009b). For over a 100 years this untreated wastewater (predominantly from domestic sources) has been used to irrigate over 85 000 hectares of crops in the Mezquital Valley. Although several studies have shown the harmful effects on health and the environment from the direct application of untreated water, little research exists to evaluate its use in irrigation while taking into account salinity and sodicity. This study evaluated wastewater from the three main drainage channels (Grand Drainage channel, Central Outlet Tunnel and El Salto River) using quality criteria for irrigation water. The results indicate that the water does not comply with current Mexican guidelines for electric conductivity, total dissolved solids, turbidity and bicarbonate and sodium ions. Regarding salinity and sodicity, these waters can be directly used as long as the characteristics of the soil to which it is going to be applied are taken into account (such as the use of salt-tolerant crop species) and certain management practices are performed (such as leaching). Since prolonged irrigation with this water over time could affect the soil, treating the water before its direct use is recommended.

Keywords: wastewater, salinity, sodicity, Mezquital Valley.

Dirección institucional de los autores

Dr. Ronald Ernesto Ontiveros Capurata

División de Estudios de Posgrado
Universidad de la Sierra Juárez
Avenida Universidad s/n
Carretera Federal Guelatao-Ixtlán de Juárez
68725 Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México
Teléfono: +52 (951) 5536 370
rononti@gmail.com
ronald.ontiveros@juppa.unsij.edu.mx

Dr. Lamine Diakite Diakite (Departamento de Irrigación)
Dra. María Edna Álvarez Sánchez (Departamento de Suelos)
Dr. Pablo Miguel Coras Merino (Departamento de Irrigación)

Universidad Autónoma Chapingo
km 38.5 Carretera México-Texcoco s/n
56230 Chapingo, Estado de México, México
Teléfono: +52 (595) 9521 500, extensiones 1582, 6148
ldiakited@taurus.chapingo.mx
edna_alvarez30@yahoo.com.mx
mpcoras@correo.chapingo.mx