

Caracterización de aguas residuales tratadas de la comarca lagunera y su viabilidad en el riego agrícola

Flor Valeria Galindo Pardo¹
María del Rosario Jacobo-Salcedo²
José Antonio Cueto-Wong^{3§}
David Guadalupe Reta Sánchez⁴
José Luis García Hernández⁵
Cirilo Vázquez-Vázquez⁵

¹FAZ-UJED-INIFAP. Carretera Gómez Palacio-Tlahualilo km 32, Venecia, Gómez Palacio, Durango, México. (valery0510@hotmail.com). ²CENID-RASPA-INIFAP. Parque Industrial II, Gómez Palacio, Durango, México. CP. 34079. (jacobo.rosario@inifap.gob.mx) ³FAZ-UJED. Carretera Gómez Palacio-Tlahualilo km 32, Venecia, Gómez Palacio, Durango, México. ⁴FAZ-UJED-INIFAP. Boulevard José Santos Valdez 1200 Poniente, Centro, Matamoros, Coahuila. (reta.david@inifap.gob.mx). ⁵FAZ-UJED. Carretera Gómez Palacio-Tlahualilo km 32, Venecia, Gómez Palacio, Durango, México. (luis-garher@hotmail.com; cirvaz60@hotmail.com).

§Autor para correspondencia: Cueto_J_A@outlook.com.

Resumen

El uso de agua residual tratada de origen urbano para irrigar suelos agrícolas destinados a la producción de forrajes es una alternativa que favorece el aporte de nutrientes al cultivo y minimiza la contaminación en los sitios de descarga; sin embargo, se requiere conocimiento acerca de la calidad de esta agua. El objetivo del estudio fue determinar la calidad del efluente de cuatro plantas tratadoras de agua residual (PTAR) de la Comarca Lagunera. Los análisis de calidad se llevaron a cabo con las metodologías de diversas normas nacionales. Los muestreos a las plantas tratadoras se realizaron durante once meses (abril 2014 a febrero 2015). Los resultados muestran poca variación mensual a excepción de la planta LA1. Los afluentes de PTAR LO1 y LO2 tienen de 22 a 25 mg L⁻¹ de N, mientras PTAR LA1 tiene mayor concentración de P 4 mg L⁻¹ y K 22 mg L⁻¹, en cuanto la calidad agronómica es cuestionable por la alta salinidad y sodicidad. En cuanto a los parámetros microbiológicos todas las PTAR exceden los límites máximos permisibles (LMP) de la NOM-003-ECOL-1997 en cuanto al contenido de huevos de helminto, excediendo también los LMP metales pesados, de la NOM-001-SEMARNAT-1996 en Pb y Cd.

Palabras clave: lagunas de oxidación, lodos activados, metales pesados, sustentabilidad.

Recibido: enero de 2020

Aceptado: febrero de 2020

Introducción

El informe de las Naciones Unidas (ONU, 2015) acerca del desarrollo de los recursos hídricos en el mundo, señala que la capacidad del planeta para sostener la creciente demanda de agua dulce está siendo desafiada. Los escenarios del cambio climático prevén problemas futuros en el ciclo del agua, la intensidad y frecuencia de las sequías, se agudizaran generando cambios en las cuencas hidrográficas del mundo, lo que conlleva a problemas socioeconómicos y ambientales severos (Deryugina, 2017; Sadoff, 2017).

El sector agrícola actualmente es responsable del 70% del uso del agua del mundo (WWAP, 2017). El 62% del agua en México proviene de fuentes superficiales y el resto de las fuentes subterráneas. De éstas últimas, 75% es agua concesionada para uso agrícola. La creciente demanda de agua en los usos consuntivos generará que el agua residual también aumente, así como su nivel de contaminación; ya que el mayor receptor final de estas aguas residuales sin previo tratamiento es el ambiente: llámese ríos, mares, lagos, suelo o subsuelo (WWAP, 2017).

La aplicación del concepto de sustentabilidad en cuanto al uso del agua es un referente de las prioridades a nivel internacional (Seguí, 2004). Una alternativa planteada es el reúso del agua residual tratada en el riego agrícola (FAO, 2017) entre los beneficios que se podrían esperar está una disminución en la contaminación ambiental (Escalante *et al.*, 2003).

Investigaciones como las realizadas por Garzón-Zuñiga *et al.* (2014); Vera *et al.* (2016) indican que el tipo de tratamiento y los materiales utilizados son determinantes en la calidad del efluente. El rendimiento del cultivo es una condicionante importante, en el estudio realizado por Libutti, (2018) menciona que la productividad no se ven afectada negativamente por el uso de agua residual aunado a ello podría ahorrarse hasta 6 000 m³ ha⁻¹ de agua subterránea al año y colateralmente aminorar la presión por el recurso hídrico.

La aplicación del efluente en el sector agrícola genera no solo el aporte hídrico sino de nutrientes para las plantas, lo cual se refleja en una mejor nutrición y provisión de alimentos, aunado a un menor uso de fertilizantes químicos (Toze, 2006; Veliz *et al.*, 2009; Lasso *et al.*, 2011). Una aportación realizada por Escalante *et al.* (2003) sobre el potencial de reutilización del agua tratada en México encontró que más de 70% de esta es descargada a un cuerpo natural como receptor final, además menciona que el agua residual tratada es tres veces más económica que el agua potable.

México tiene registro de 2 337 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), de las cuales 30% son lodos activados. El total del efluente tratado es de 111.25 m³ s⁻¹, aproximadamente el 53% del agua residual generada. En la Comarca Lagunera (CL) se tienen identificadas 31 plantas de tratamiento, las cuales en conjunto tratan un caudal de 2.42 m³ s⁻¹ (CONAGUA, 2014) donde se destina para usos agrícolas de áreas aledañas a los sitios de descarga así como el riego de jardines.

La CL es una región lechera importante, por lo que la producción agrícola paso a ser forrajera con un total de 123 642.57 ha; es decir, 48% de la superficie total sembrada (SIAP, 2018), además la producción agrícola es el principal consumidor del agua en la región, 45% de esta agua es de fuentes subterráneas y 55% de superficiales, donde los acuíferos más importantes son el principal y oriente aguanaval, que abastecen la zona urbana (Cervantes y Franco, 2007).

El agua que se utiliza en el sector agrícola debe poseer características físicas, químicas y microbiológicas deseables, para definirla como de calidad agronómica se consideran parámetros como salinidad, sodicidad, alcalinidad y presencia de iones específicos que pudieran generar toxicidad. La sodicidad es un parámetro determinante en la calidad del agua para riego, se mide mediante la relación de absorción de sodio (RAS), los suelos sódicos tienden a dispersarse al humedecerse, mientras que al secarse su estructura es dura y masiva, los principales problemas que esto provoca son baja infiltración y permeabilidad (Tartabull y Betancourt, 2016).

Echeverri *et al.* (2012) comparó la calidad agronómica del efluente de una planta tratadora contra el agua subterránea para producción de caña de azúcar, concluyendo que el efluente de la planta tratadora era similar al agua subterránea de comparación. La ausencia de patógenos y huevos de helminto, también son un parámetro de calidad (NOM, 003) para evitar problemáticas futuras como baja infiltración de agua, baja productividad, contaminación del suelo y problemas de salud a los consumidores por la presencia de patógenos.

Cabe mencionar que el uso no controlado de este tipo de agua está relacionado con impactos negativos al ambiente, debido a la presencia de patógenos (Veliz-Lorenzo *et al.*, 2009) y metales pesados. Diversos compuestos químicos pueden alterar las condiciones naturales del suelo que en determinado momento llegan a comprometer la producción agrícola o bien afectar la salud pública (Toze, 2006; Olivas-Enriquez *et al.*, 2011).

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efluente de cuatro plantas tratadoras de aguas residuales con procesos de tratamiento diferentes de la Comarca Lagunera para definir su calidad en usos agronómicos y establecer el aporte nutrimental de la misma. Adicionalmente, determinar el posible riesgo de contaminación por elementos potencialmente tóxicos.

Materiales y métodos

Área de estudio

El presente trabajo se desarrolló en los municipios de Torreón, Gómez Palacio y Lerdo de los estados de Coahuila y Durango en la región conocida como Comarca Lagunera (CL). Su localización esta entre las coordenadas 101° 41' y 104° 61' longitud oeste, y 24° 59' y 26° 53' latitud norte, su clima es seco desértico, con una precipitación pluvial aproximada a los 258 mm y una evaporación de 2 000 mm, la temperatura promedio es de 21 °C con una máxima de 33.7 °C y una mínima de 7.5 °C (García, 1973).

La investigación consistió en realizar mediciones en cuatro plantas tratadoras de agua residual (PTAR) distribuidas en la CL, las cuales se muestran en el Cuadro 1 se seleccionaron por su localización y tipo de tratamiento (lodos activados y lagunas de oxidación).

Cuadro 1. Ubicación de puntos de muestreo de agua tratada.

Identificación	Localidad	Ubicación	Tipo de tratamiento	Caudal tratado (L s ⁻¹)	Receptor
LO1	Torreón	25° 30'23.02" N 103° 20'8.03" O	Laguna de oxidación	1400	RA
LO2	Gómez Palacio	25° 38'26.87" N 103° 28'18.95" O		500	RA

Identificación	Localidad	Ubicación	Tipo de tratamiento	Caudal tratado (L s ⁻¹)	Receptor
LA1	Gómez Palacio	25° 36'45.01" N 103° 26'7.73" O	Lodos activados	100	RA y RP
LA2	Lerdo	25° 32'25.85" N 103° 33'1.21" O		180	RA y UI

RA= riego agrícola; RP= riego de parques; UI= uso Industrial.

Muestreo

El muestreo se desarrolló de abril 2014 a febrero 2015. Con el objetivo de observar las fluctuaciones de la calidad del agua tratada durante el paso del tiempo (clima) y observando los tipos de tratamiento de las PTAR. Esto para poder comparar la calidad del efluente. Se realizó según las especificaciones de la NMX-AA-003-1980 'aguas residuales-muestreo'. Se realizaron muestreos a lo largo de 24 h con un intervalo de tiempo entre muestras de 4 h. Cada muestra se conservó para su transporte en baño de hielo y en refrigeración (4 °C) hasta su análisis respetando los tiempos máximos permisibles para su análisis.

En cada toma se colectaron aproximadamente 3 L de muestra para realizar una mezcla compuesta en la cual se efectuaron las determinaciones correspondientes, adicionalmente se colectó una muestra simple e independiente a las anteriores en frasco de vidrio para el análisis de grasas y aceites. En total se realizaron 24 determinaciones analíticas a 44 muestras compuestas de agua residual tratada, lo cual permitió dar un seguimiento a la calidad del agua generada.

El desarrollo metodológico se encuentra basado en normas nacionales: muestreo NMX- AA- 003-1980, sólidos totales (ST), sólidos totales volátiles (STV), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos totales (SDT) NMX-AA-034-SCFI-2015, grasas y aceites (GA) NMX-AA-005-SCFI-2000, pH NMX-AA-008-SCFI-2011, conductividad eléctrica (CE) NMX-AA-093-SCFI-2000, nitrógeno total (NT) NMX-AA-026-SCFI-2001, fósforo total (P) NMX-AA-029-SCFI-2001, carbonatos (CO₃) y bicarbonatos (HCO₃).

Por método interno, cloruros (Cl⁻) NMX-AA-073-SCFI-2001, sulfatos (SO₄) NMX-AA-074-SCFI-1981, calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), potasio (K), cobre (Cu), manganeso (Mn), hierro (Fe), zinc (Zn), plomo (Pb) y cadmio (Cd) NMX-AA-051-SCFI-2001. Todos los análisis fueron realizados en el laboratorio del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (CENID RASPA).

Análisis estadístico

Los datos recabados durante el muestreo y posterior al análisis en laboratorio se sometieron a un análisis de normalidad con la prueba de Shapiro Wilk's, al resultar tener datos no normales se decidió hacer un análisis de varianza mediante una prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis mediante el programa estadístico InfoStat (versión estudiantil), donde valores $p < 0.05$, se consideran significativos.

Aunado a lo anterior se realizó un análisis de componentes principales (ACP), para la discriminación de variables, considerando únicamente aquellas que expliquen al menos 70% de la varianza, el cual se considera un porcentaje aceptable (León *et al.*, 1996; Terrádez-Gurrea, 2006).

Resultados y discusión

Basado en las normas oficiales mexicanas NOM-001 y NOM-003 SEMARNAT, para la descarga y reutilización de agua residual tratada, los parámetros normados para la aplicación en riego agrícola son escasos. Dentro de las cuantificaciones reglamentadas, están los sólidos suspendidos totales (SST) con límites máximos permisibles (LMP) de 20 mg L^{-1} para contacto directo y 30 mg L^{-1} para contacto indirecto, en esta investigación se encontró un promedio de 106 mg L^{-1} el cual excede los LMP. Trabajos reportados por Garzón-Zúñiga *et al.* (2016) y Montero-Aguirre *et al.* (2016) reportan datos similares de 139.4 mg L^{-1} y 112 mg L^{-1} respectivamente. En la investigación realizada por Campos *et al.* (2018) evaluaron agua residual para riego agrícola y concluyeron que un alto contenido de SST tiene una fuerte correlación con la presencia de huevos de helminto (HH), generando problemas de salud al reutilizar el agua.

El LMP de las NOM-001 y NOM-003 para el contenido de grasas y aceites es de 15 mg L^{-1} , en el presente trabajo se encontraron contenidos de hasta 50 mg L^{-1} , esta cantidad de grasas y aceites sobrepasa el LMP, un alto contenido de ellas en el agua de riego provoca bajos niveles de oxigenación y como consecuencia la proliferación de bacterias anaeróbicas. En el estudio realizado por Bonilla (2013) se evaluaron dos sitios de descarga de agua residual proveniente de dos parques industriales en ellas se detectaron valores de 56 mg L^{-1} .

En esta investigación el grado de contaminación fecal se midió a través de la cuantificación de coliformes totales (CT) teniendo como resultado $1.6 \times 10^6 \text{ NMP/100 ml}$ los cuales demuestran la contaminación microbiológica en el agua. Adicionalmente, se observó la presencia de coliformes fecales (CF) a partir de las pruebas presuntivas realizadas. En referencia a los LMP de las normas oficiales mexicanas se carece de reglamentación para uso agronómico en particular. Sin embargo, otros autores reportan valores similares.

Carmona (2016) evaluó agua residual tratada y encontró valores de $1 \times 10^4 \text{ NMP/100 ml CT}$, mientras que Valencia (2012) reporta $1 \times 10^6 \text{ NMP/100 ml CT}$ la variación entre estas concentraciones puede deberse al tipo de tratamiento. USEPA, (2004) menciona que el conteo de coliformes no puede ser mayor a $4\,000/100 \text{ ml}$ en el estado de Arizona, cuando el agua se aplica a forrajes alimenticios de ganado lechero. Por lo tanto, la calidad biológica del agua es cuestionable al encontrarse fuera de normativas internacionales.

La concentración de huevos de helminto, tiene un promedio de 27 h L^{-1} ; mientras que la NOM-003 establece como LMP 5 h L^{-1} . Cabe remarcar, que todas las plantas de tratamiento evaluadas sobrepasan estos límites. Hernández-Acosta (2014) evaluó 16 sitios de descarga de agua residual para riego agrícola y encontró concentraciones de hasta 24 h L^{-1} , a su vez Valencia *et al.* (2012) reporta 21 h L^{-1} . La remoción de estos parásitos es de suma importancia, puesto que puede afectar la salud pública, por enfermedades que son de fácil propagación al no restringir el tipo de riego.

El LMP para Cu es $4 \text{ a } 6 \text{ mg L}^{-1}$, Zn de $10 \text{ a } 20 \text{ mg L}^{-1}$, dichos límites permiten establecer que ambos elementos se encuentran dentro de normativa con concentraciones de 0.08 mg L^{-1} y 0.1 mg L^{-1} respectivamente. En cuanto a los metales pesados los LMP para Cd es de $0.05 \text{ a } 0.1 \text{ mg L}^{-1}$ y Pb de $5 \text{ a } 10 \text{ mg L}^{-1}$, encontrándose concentraciones de 2.9 mg L^{-1} de Cd y 21.7 mg L^{-1} de Pb (Cuadro 2).

Cuadro 2. Variables evaluadas y LMP de normas oficiales.

Variables	Media	Mediana	Min	Max	p	NOM 001	NOM 003	
							CD	CI u O
SST (mg L ⁻¹)	106.02	70	3	394	<0.0001	nd	20	30
GA (mg L ⁻¹)	52.02	50.45	5.7	136.6	0.0728	15	15	15
Cu (mg L ⁻¹)	0.03	0.02	1*10 ⁻³	0.08	0.001	4		
Zn (mg L ⁻¹)	0.03	0.02	2.7*10 ⁻³	0.1	<0.0001	10		
Pb (mg L ⁻¹)	11.75	11.4	nd	21.7	0.7197	5		
Cd (mg L ⁻¹)	2.29	2.3	nd	2.9	<0.0001	0.05		
Coliformes totales			2400	16*10 ⁵	<0.0001			
Huevos de helminto	27	21	11	65	<0.0001		≤ 1	≤ 5

$p \leq 0.05$ = se consideran valores normales, prueba de Kruskal-Wallis; NOM 001= NOM-001-SEMARNAT-1996; NOM-003-SEMARNAT-1997; CD= contacto directo al público; CI u O= contacto indirecto u ocasional.

Estos últimos son considerados como metales traza y se encuentran fuera de los LMP. Vera *et al.* (2016) evaluaron plantas de tratamiento de lagunas aeradas y en promedio encontraron valores de Cd < 0.01 mg L⁻¹ y Pb < 0.05 mg L⁻¹, que difieren de los encontrados en esta investigación.

Según se puede observar los resultados del análisis de varianza del Cuadro 3 los sólidos analizados (ST, SST y SDT) en las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) existe una diferencia significativa para la PTAR de Lerdo con un proceso de lodos activados, esto posiblemente se debe al pretratamiento que sufre el influente, (sección de cribas finas para eliminación de sólidos y filtros de arena que se disponen al final del clarificador secundario).

Cuadro 3. Análisis de varianza con Kruskal Wallis.

Variable	LO1	LO2	LA1	LA2
ST (mg L ⁻¹)	932 ab	1105 b	1875 c	614 a
SST (mg L ⁻¹)	132 c	67 b	174 bc	12 a
SDT (mg L ⁻¹)	710 a	946 b	1578 c	707 a
PH	8.09 b	7.99 b	7.27 a	7.3 a
CE (μS cm ⁻¹)	1237 b	1267 b	2355 c	758 a
N (mg L ⁻¹)	25.3 c	22.3 c	8.8 b	2.2 a
P (mg L ⁻¹)	2.6 b	2 b	4.2 c	0.2 a
HCO ₃ (mg L ⁻¹)	10.6 b	10 b	9.3 b	4.6 a
CL (mg L ⁻¹)	2.88 b	2.81 b	13.62 c	1.5 a
SO ₄ (mg L ⁻¹)	3.66 a	5.74 b	4.33 ab	3.23 a
K (mg L ⁻¹)	10.13 a	6.16 a	22.57 b	6.33 a
Na (mg L ⁻¹)	31.54 a	28.56 a	60.1 a	28.45 a
Mg (mg L ⁻¹)	2.54 a	6.69 b	4.64 b	2.84 a
Ca (mg L ⁻¹)	10.38 bc	9.33 a	13.25 c	9.32 ab
Fe (mg L ⁻¹)	0.16 b	0.13 b	0.17 b	0.05 a
Mn (mg L ⁻¹)	0.12 b	0.04 a	0.06 a	0.04 a
RAS (mmol L ⁻¹) ^{1/2}	11.9 a	10.1 a	11.4 a	20.3 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas, según la prueba de Kruskal-Wallis ($p \leq 0.05$). LO1= lagunas de oxidación Torreón; LO2= lagunas de oxidación Gómez Palacio; LA1= lodos activados Gómez Palacio; LA2= lodos activados Lerdo.

El pH es importante para la disponibilidad de nutrientes y su valor presenta diferencia significativa entre tratamientos, variando de pH= 8 ligeramente alcalino las plantas con proceso de lagunas de oxidación, mientras que en el proceso de lodos activados los pH están cercanos a la neutralidad 7. El valor de CE también difiere entre tratamiento, en lagunas de estabilización se presentan valores de $1200 \mu\text{S cm}^{-1}$, mientras que en lodos activados los valores son $758 \mu\text{S cm}^{-1}$ en Lerdo y $2300 \mu\text{S cm}^{-1}$ en la PTAR GP, siendo este último el valor más alto registrado y con ligera restricción para el riego si se combina con un alto número de SDT (Ordóñez, 2018).

Bonilla *et al.* (2013), en su investigación encontró CE de $2300 \mu\text{S cm}^{-1}$, similar a lo reportado por Vera (2016) quien caracterizó efluente de una planta de tratamiento de agua residual con tratamiento de lagunas aireadas encontrando valores de pH y CE de 7.4 y $2300 \mu\text{S cm}^{-1}$ respectivamente, estos valores similares a los detectados en PTAR GP.

Analizando el cuadro de varianza se observa que los aniones y cationes presentan diferencia entre las PTAR, LA2 presenta los rangos más bajos en casi todos los iones, exceptuando el SO_4 cuyo valor oscila en los 3.23 mg L^{-1} similar al de PTAR LO1 con 3.66 mg L^{-1} . Mientras que la determinación de nitrógeno total (N), arroja diferencia significativa siendo mayor en las plantas de Lagunas de estabilización con valores de 22 a 25 mg L^{-1} , en la planta de LA2 se tiene el valor mínimo de 2.2 mg L^{-1} , mientras en la planta de LA1 de lodos activados un valor de 8.2 mg L^{-1} .

Umaña (2006) citado por Acosta *et al.* (2013) menciona que la concentración N en las hojas de maíz se incrementó al ser irrigado con ART. El P es un elemento de gran importancia en el tratamiento de aguas residuales y sobre todo al considerar el sitio de descarga puesto que favorece la eutrofización y es uno de los elementos para la nutrición de los cultivos, se ha demostrado que la ausencia de este elemento es más importante que la del nitrógeno para limitar el crecimiento de las algas planctónicas, especialmente en algunos tipos (algas azules-verdes).

capaces de fijar el nitrógeno atmosférico (Ronzano y Dapena, 2013), lo cual afectaría el tratamiento por lagunas de oxidación. El análisis de varianza muestra diferencia significativa en PTAR de LA2 con respecto al resto, esto se debe a que en una de las etapas de tratamiento de esta planta se cuenta con un agitador que permite la eliminación del fósforo y como resultado tenemos esta baja concentración 0.2 mg L^{-1} .

Calidad agronómica del efluente de las plantas tratadoras

Los parámetros evaluados para medir la calidad del agua para riego agrícola son la salinidad, sodicidad, alcalinidad y toxicidad por iones específicos (Tartabull, 2016; Intagri, 2018; Ordóñez, 2018). La salinidad está determinada por la combinación de dos parámetros la CE y los sólidos disueltos totales (SDT). Según Tartabull (2016), la CE indica la concentración de sales, las cuales representan un problema al no permitir que las plantas absorban el agua y nutrientes que necesitan.

En la Figura 1 y 2 se puede observar como la CE y los SDT, tienen variaciones importantes a través del tiempo, sin embargo todas las PTAR se encuentran dentro de los límites recomendados por Ayers y Westcot (1976); Tartabull y Betancourt (2016), PTAR LA2 tiene la menor concentración y fluctuación a lo largo del año en promedio CE $758 \mu\text{S m}^{-1}$ y SDT 707 mg L^{-1} , su grado de restricción es leve a moderado (Intagri, 2018).

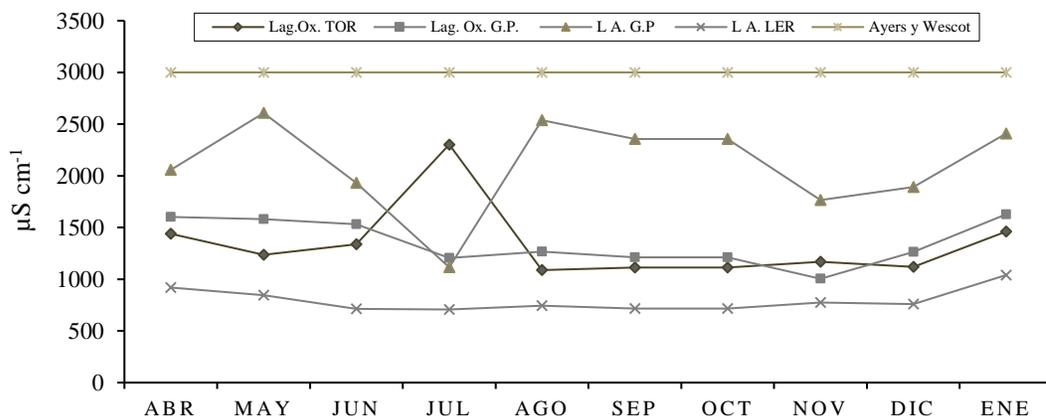


Figura 1. Conductividad eléctrica de cuatro plantas de tratamiento a través del tiempo (abril 2014-enero 2015).

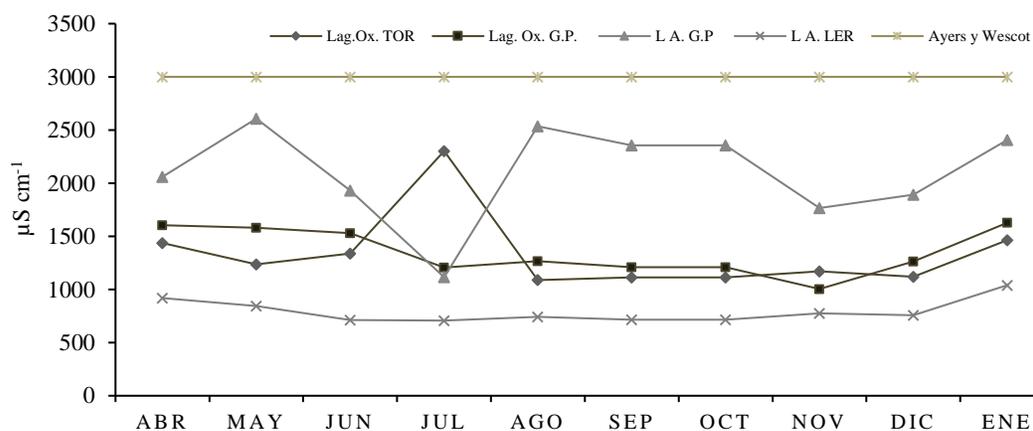


Figura 2. Sólidos disueltos totales de cuatro plantas de tratamiento a través del tiempo (abril 2014-enero 2015).

Siendo la misma clasificación para las cuatro PTAR analizadas en este estudio. Cabe señalar, que PTAR LO1 y LO2 ambas con proceso de lagunas de oxidación, tampoco presenta fluctuaciones importantes y entre ellas tienen un comportamiento similar, sin embargo, PTAR LA1 tiene los valores más altos CE 2 355 $\mu\text{S cm}^{-1}$ y SDT= 1 578 mg L^{-1} .

La clasificación del USLS para las aguas de riego, se observa que las PTAR con proceso de lagunas de oxidación tienen una clasificación C3-S2 riesgo de sodificación medio y salinidad alto, mientras que PTAR de LA1 se clasifica con C4-S2 riesgo muy alto para salinidad y medio por sodicidad, finalmente la planta LA2 se identifica como C3-S3 presenta riesgo alto por salinidad y sodicidad.

Toxicidad por iones específicos, tales como cloruros y sodio, este último al no ser un elemento esencial puede provocar toxicidad en los cultivos, aún más si se trata de un cultivo poco tolerante, como se observa en el Cuadro 3, no existe diferencia significativa entre plantas de tratamiento en cuanto Na; sin embargo, todas las plantas tienen una concentración elevada de 28 a 60 mg L^{-1} , mientras la concentración de cloruros se muestra en la Figura 3, las PTAR presentan un comportamiento similar a excepción de LA1.

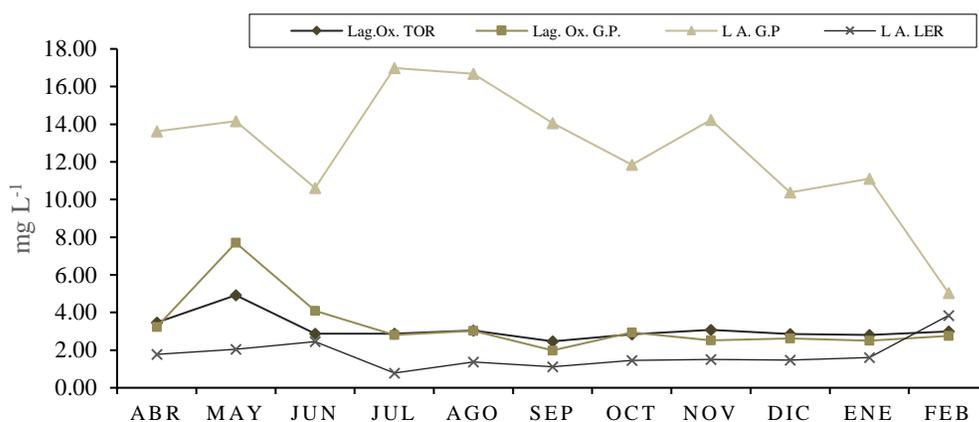


Figura 3. Comportamiento de cloruros en las cuatro plantas de tratamiento a través del tiempo abril 2014-enero 2015.

Componentes principales que caracterizan las plantas de tratamiento

La prueba de componentes principales arrojó 6 componentes principales (CP) que explicaron 73% de la varianza, el cual se considera un porcentaje satisfactorio (Terrádez-Gurrea, 2006). El Cuadro 4 presenta los CP, la varianza que cada uno explicó, así como su varianza acumulada y el valor de cada una de las variables que se correlacionaron con el CP.

Cuadro 4. Componentes principales seleccionados sobre la base del análisis del componente principal, los valores propios, proporción de la varianza, varianza acumulada y los indicadores de correlación múltiple con las diferentes CP.

	Valor propio	Proporción (%)	Proporción acumulada (%)	Indicador de correlación con los CP	
CP1	6.26	0.26	0.26	ST	0.8
				SST	0.74
				CE	0.84
				P	0.93
				HCO ₃	0.7
				Cl	0.83
				K	0.78
CP2	3.37	0.14	0.4	SO ₄	0.58
				Ca	-0.56
				Fe	0.66
				Mn	0.8
				Cu	0.82
CP3	2.88	0.12	0.52	SDT	0.44
				PH	0.76
				N	0.61
				CO ₃	0.59
CP4	2.05	0.09	0.61	GRASAS	0.64
				RAS	-0.23

	Valor propio	Proporción (%)	Proporción acumulada (%)	Indicador de correlación con los CP	
CP5	1.56	0.06	0.67	STV	0.53
				Zn	0.46
				Pb	-0.53
CP6	1.39	0.06	0.73	Na	-0.47
				Mg	0.65
				Cd	0.44

Componente principal 1. Se observa una correlación positiva entre 7 variables (ST, SST, CE, P, HCO₃, Cl y K). El fósforo en el efluente puede estar de manera orgánica, presente en la materia orgánica y relacionarse con los sólidos totales. La presencia del potasio y el cloro en forma de sales puede formar el compuesto cloruro de potasio que es una sal y también correlacionarse con la cantidad de sólidos totales y además las sales disueltas influirían de forma importante con la CE, al igual que el HCO₃.

Mientras tanto el componente 2, agrupa las variables SO₄, Ca, Fe, Mn y Cu. El SO₄, Fe y Ca, son elementos importantes que influyen en la dureza del agua, el cual es un parámetro de relevancia agronómica, tanto para la disolución de los fertilizantes, como para el sistema de riego. El componente principal 3 agrupa cuatro variables sólidas disueltas totales (SDT), pH, N y CO₃.

Este grupo explica el 12% de la varianza, el pH tiene una fuerte relación con el N, pues al haber fluctuaciones en el pH la actividad microbiana disminuye y por ende la disponibilidad del nitrógeno. Los carbonatos están relacionados con los sólidos disueltos totales. El componente 4. Está conformado por grasas/aceites y RAS (relación de adsorción de sodio), aunque este último influye de manera negativa. Sólidos totales volátiles (STV), Zinc y Pb, son las variables que conforman el componente número 5, donde el Pb se relaciona de manera negativa. Y finalmente el componente 6, que explica 6% de la varianza, las variables se agrupan son sodio de manera negativa.

Conclusiones

Las plantas de tratamiento de aguas residuales analizadas en esta investigación presentan diferencia significativa en la mayoría de los parámetros evaluados, no encontrando relación entre el tipo de tratamiento. Estas presentan variabilidad a través del tiempo, se atribuye la fluctuación al manejo propio de la planta y a las características del influente. El ACP mostró seis componentes principales que explican 73% de la varianza.

En general las PTAR presentan un gran potencial para ser utilizadas en el riego agrícola, por su aporte de elementos esenciales como N, P y K 15.35, 2.2 y 12 mg L⁻¹ respectivamente. Con lo cual se aplicaría una menor cantidad de fertilización química y se haría un uso sustentable del agua. Sin embargo, antes de su aplicación debe considerarse que las cuatro PTAR tienen restricción por alta salinidad y PTAR LA2 de igual forma por sodicidad, para lo cual debe evaluarse el tipo de riego que se emplee y utilizar un pretratamiento para evitar erosión del suelo y baja productividad.

Las concentraciones de metales pesados Pb 11.75 mg L⁻¹ y Cd 2.29 mg L⁻¹ sobrepasan los LMP establecidos por la NOM- 001-SEMARNAT-1996, esto puede restringir su uso y aplicación, por su alto potencial de acumulamiento en el suelo y posible migración al cultivo, se recomienda monitorear estos parámetros y establecer un pretratamiento al efluente antes de su aplicación.

Literatura citada

- Ayers, R. S. and Westcot, D. W. 1976. Water quality for agriculture. Irrigation and drainage. Roma. 1(29):08-10.
- Bonilla, M. N; Silva, S. E; Cabrera, M. C. y Sánchez, T. R. C. 2013. Calidad del agua residual no entubada vertida por dos parques industriales en la ciudad de Puebla, México. Rev. Iberoam. Investig. Des. Ed. 4(7):1-36.
- Campos, M. C; Beltrán, M; Fuentes, N. y Moreno, G. 2018. Huevos de helminto como indicadores parasitarios de contaminación de origen fecal en aguas de riego agrícola, biosólidos, suelos y pastos. Biomédica. 38(1):42-53. <http://dx.doi.org/10.7705/biomedica.v38i0.3352>.
- Carmona, E. 2016. Riego con efluentes residuales y calidad microbiológica del Rábano (*Raphanus sativus* L.) var. Champion en invernadero. Universidad Autonoma Agraria Antonio Narro. Satillo, Coahuila. México. Tesis. 33 p.
- Cervantes, R. M. C. y Franco, G. M. 2007. Diagnóstico ambiental de la Comarca Lagunera. In Á. López López y R. Carmona Mares (Presidencia), Foro Interdisciplinario sobre la Comarca Lagunera. Simposio llevado a cabo en la sede de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística, Ciudad de México.
- CONAGUA. 2014. Comisión nacional del agua (Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. Departamento de agua potable y saneamiento, 308. <https://doi.org/10.2116/analsci.20.1673>.
- Deryugina, T. and Konar, M. 2017. Impacts of crop insurance on water withdrawals for irrigation. Advances in Water Resources. 21(110):437-444. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.03.013>.
- DOF. 1980. Diario oficial de la federación. Norma mexicana NMX-AA-003-1980. Aguas residuales muestreo.
- DOF. 1996. Diario oficial de la federación. 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.
- DOF. 1997. Diario oficial de la federación. Norma oficial mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.
- Echeverri, S. A. F; Madera, P. C. A. y Urrutia, C. N. 2012. Comparación de la calidad agronómica del efluente de la PTAR-C y el agua subterránea con fines de uso en riego de caña de azúcar. Ingeniería de recursos naturales y del ambiente. 11:21-27.
- Escalante, V; Cardoso, L; Ramírez, E; Moeller, G; Mantilla, G; Montecillos, J. y Villavicencio, F. 2003. El reuso del agua residual tratada en Mexico. In: Seminario Internacional Sobre Métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales. 230-236 pp.
- FAO. 2017. Reutilización de aguas para agricultura en America Latina y el Caribe. Estado, principios y necesidades. Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (FAO). Editado por Mateo-Sagastra Javier. <http://www.fao.org/3/a-i7748s.pdf>.

- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la república mexicana. UNAM. México, DF. 246 p.
- Garzón, Z. M. A; González, Z. J. y García, B. R. 2016. Evaluación de un sistema de tratamiento doméstico para reúso de agua residual. *Revista internacional de contaminación ambiental*. 32(2):199-211. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.02.06>.
- Garzón-Zuñiga, M. A. y Buelna, G. 2014. Caracterización de aguas residuales porcinas y su tratamiento por diferentes procesos en México. *Revista internacional de contaminación ambiental*. 30(1):65-79.
- Hernández-Acosta, E; Quiñones-Aguilar, E; Cristobal-Acevedo, D. y Rubiños-Panta, J. 2014. Calidad biológica de aguas residuales utilizadas para riego de cultivos forrajeros en Tulancingo, Hidalgo, México. *Rev. Chapingo, Ser. Cienc. Forest. Amb.* 1(20):89-100.
- Intagri. 2018. Instituto para la innovación tecnológica en la agricultura. Clasificación de aguas para riego agrícola. Instituto para la innovación tecnológica en la agricultura. 5 p.
- Lasso, J. y Ramirez, J. L. 2011. Perspectivas generales del efecto del reúso de aguas residuales para riego en cultivos para la producción de biocombustibles en Colombia. *El hombre y la maquina*. 36:95-105.
- León, R; Polanco, D; Zárraga, P; Zambrano, M; Ramos, E; Central, T. y Seguel, I. 1996. Tema 3: Análisis de Componentes Principales. 39(2):572-579. <https://doi.org/10.1002/joc.3950>.
- Libutti, A; Gatta, G; Gagliardi, A; Vergine, P; Pollice, A; Beneduce, L; Disciglio, G. y Tarantino, E. 2018. Agro-industrial wastewater reuse for irrigation of a vegetable crop succession under Mediterranean conditions. *Agricultural Water Management*. 196:1-14. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.015>.
- Montero-Aguirre, S; Nikolskii-Gavrilov, I; Landeros-Sánchez, C; Palacios-Vélez, O. L; Traversoni-Domínguez, L., and Hernández-Pérez, J. M. 2016. Understanding the vegetable contamination process with parasites from wastewater irrigation and its impact on human health in Hidalgo, Mexico. *J. Agric. Sc.* 5 (8):42-49. <https://doi.org/10.5539/jas.v8n5p42>.
- Olivas-Enriquez, E.; Flores-Margez, J. P.; Serrano-Alamillo, M.; Soto-Mejía, E.; Iglesias-Olivas, J; Salazar-Sosa, E. y Fortis-Hernández, M. 2011. Indicadores fecales y patógenos en agua descargada al río Bravo. *Terra Lationoam*. 29(4):449-457.
- ONU. 2015. Organización de las Naciones Unidas. Informe de las naciones unidas sobre los recursos hídricos en el mundo: Agua para un mundo sostenible. Resumen ejecutivo. 06134 Colombella, Perugia, Italia. 1-8 pp.
- Ordóñez, Y. M. 2018. Efecto de la calidad del agua y sustratos en la producción de plántulas de estevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni). *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 21(especial):4284-4295.
- Ronzano, E. y Dapena, J. 2013. Eliminación de fósforo en las aguas residuales. *Director*. 15(2):109-116.
- Sadoff, C. W.; Borgomeo, E. y De Waal, D. 2017. Turbulent waters: pursuing water security in fragile contexts. World bank group. 7-14 pp.
- SECOFI. 1981. Secretaría de comercio y fomento industrial. NMX-AA-074-SCFI. Análisis de aguas - determinación del ion sulfato en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba.
- SECOFI. 2000. NMX-AA-005-SCFI. Secretaría de comercio y fomento industrial. Análisis de aguas-determinación de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba.
- SECOFI. 2000. NMX-AA-093-SCFI. Secretaría de comercio y fomento industrial. Análisis de aguas-determinación de la conductividad electrolítica-método de prueba.

- SECOFI. 2001. Secretaría de comercio y fomento industrial. NMX-AA-029-SCFI. Análisis de aguas-determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba.
- SECOFI. 2001. Secretaría de comercio y fomento industrial. NMX-AA-034-SCFI. Análisis de aguas-medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba.
- SECOFI. 2001. Secretaría de comercio y fomento industrial. NMX-AA-051-SCFI. Análisis de aguas-determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas-método de prueba.
- SECOFI. 2001. Secretaría de comercio y fomento industrial. NMX-AA-073-SCFI. Análisis de aguas-determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba.
- SECOFI. 2011. NMX-AA-008-SCFI. Secretaría de comercio y fomento industrial. Análisis de agua determinación del pH - método de prueba.
- SECOFI. 2015. NMX-AA-026-SCFI. Secretaría de comercio y fomento industrial. Análisis de aguas-medición de nitrógeno total kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba.
- Seguí, A. L. A. 2004. Introducción a la regeneración y reutilización de las aguas residuales.
- SIAP. 2018. Anuarios estadísticos de la producción agropecuaria. Servicio de información agroalimentaria y pesquera. SAGARPA-SIAP. www.siap.gob.mx.
- Tartabull, P. T. y Betancourt, A. C. 2016. La calidad del agua para el riego. Principales indicadores de medida y procesos que la impactan. *Rev. Científ. Agroecos.* 4(1):47-61.
- Terrádez-Gurrea, M. 2006. Análisis de componentes principales. 71(1):1-11.
- Toze, S. 2006. Reuse of effluent water - benefits and risks. *Agricultural Water Management*, 80(1-3 SPEC. ISS.):147-159.
- USEPA. 2004. Guidelines for water reuse, EPA/625/R-04/108. US Environmental protection agency. Office of Research and Development. Washington, DC, USA.
- Valencia, E; Aragón, R. A. y Romero, J. 2012. Potencial de reutilización del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Nátaga en cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Rev. Act. Div. Cient.* 15(1):77-86.
- Veliz, L. E; Llanes, O. J. G; Asela, F. L. and Bataller, V. M. 2009. Reúso de aguas residuales domésticas para riego agrícola. Valoración crítica. *Revista CENIC Ciencias Biológicas.* 40(1):35-44.
- Vera, P. I. L; Rojas, A. M; Chávez, Y. W. and Arriaza, T. B. T. 2016. Evaluación de materiales filtrantes para el reúso en agricultura de aguas residuales tratadas provenientes de zonas áridas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina.* 26(1):5-19.
- WWAP. 2017. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: el recurso desaprovechado. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.