



Artículo: COMEII-16014

II CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2016

Chapingo, Edo. de México, del 08 al 10 de septiembre

DEPURACIÓN DE CONTAMINANTES DEL AGUA RESIDUAL A TRAVÉS DEL RIEGO EN EL FIDEICOMISO INGENIO PLAN DE SAN LUIS

Leonardo Pulido Madrigal^{1*}; Heber Eleazar Saucedo Rojas¹

¹Coordinación de Riego y Drenaje, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Mor. 62550. lpulido@tlaloc.imta.mx. (*Autor para correspondencia)

Resumen

El Fideicomiso Ingenio Plan de San Luis (FIPSL) en San Luis Potosí, anualmente genera agua residual con restricciones en cuanto a su calidad física, química y bacteriológica, ya que algunos parámetros presentan concentraciones fuera de norma. Para utilizar el agua en riego de caña de azúcar se plantean interrogantes que motivaron este estudio; por cuanto se desconoce su impacto en la calidad del agua freática, suelo y en el agua superficial y subterránea aledañas al FIPSL. La metodología consistió en el análisis físico y químico de suelos; construcción de pozos de observación para la monitorización del nivel freático y análisis de la calidad física, química y bacteriológica del agua freática; monitorización de la calidad física, química y bacteriológica del agua residual, y del agua de norias, río, manantial y pozo profundo ubicados en las inmediaciones del FIPSL. Los resultados muestran que el riego con agua residual mejora el contenido de materia orgánica y favorece la disponibilidad de nutrientes del suelo. Los análisis de laboratorio revelan que el uso de agua residual no afecta a los suelos irrigados ni a los cuerpos de agua aledaños al FIPSL; de acuerdo con los parámetros y límites establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996 y por la Ley Federal de Derechos. Por lo tanto, el agua residual desechada por el FIPSL es factible de utilizarse para riego de caña de azúcar.

Palabras clave adicionales: Agricultura de riego, caña de azúcar, monitorización de agua y suelo, cuidado del medio ambiente.



Introducción

El agua residual es una fuente importante de agua y nutrientes para muchos agricultores en climas áridos y semiáridos, y a veces esta es la única fuente de agua disponible para uso agrícola. Cuando el agua residual está bien manejada, esto ayuda en el reciclado de nutrientes y agua y por lo tanto disminuye el costo de los fertilizantes o simplemente los hace más accesible a los productores. Donde no se proporcionan servicios de tratamiento del agua, el uso agrícola de aguas residuales funciona como un método de tratamiento de bajo costo, aprovechando la capacidad del suelo para remover la contaminación en forma natural. El agua residual no nada más adiciona nutrientes a los suelos, sino que también enriquece el contenido húmico mediante la adición de materia orgánica la cual permite un aumento en la humedad del suelo, retiene los metales (a través del intercambio catiónico y de la formación de compuestos organometálicos) y aumenta la actividad microbiana. (World Health Organization, 2006).

Paralelamente al beneficio que aporta el agua residual al suelo al incorporarse a éste materia orgánica (MO), nitrógeno (N) y fósforo (P), están los efectos negativos, como la salinidad y la acumulación de metales pesados, que se acentúan en los suelos arcillosos. En la zona de riego de Atlixco, Puebla, México, donde se riega con agua del río Atoyac, la problemática que se presenta por el riego con agua residual es semejante a lo que ha venido sucediendo en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México, por cuanto el pH alcalino de los suelos ha estado favoreciendo la precipitación de metales pesados, como el cadmio (Cd), plomo (Pb) y cromo (Cr). Pero, el riesgo de que dichos metales se solubilicen podrá disminuir en la medida de que se conserve al alcalinidad de los suelos (Méndez *et al.*, 2000).

La contaminación de los suelos por elementos potencialmente tóxicos (EPTs) se ha incrementado considerablemente, como consecuencia del empleo intensivo de agroquímicos, de los residuos generados por la minería, fundición y del riego con aguas residuales. Los EPTs pueden ser absorbidos por las plantas cultivadas y asimilados o depositados en las mismas, por lo que es necesario conocer los niveles actuales de contaminación por metales pesados en suelos agrícolas, sobre todo por el efecto que estos pueden ejercer sobre la salud humana y animal (Tamariz, 1996; Méndez *et al.*, 1997, citados por Bautista-Cruz y Arnaud-Viñas, 2006)

En México, el uso de las aguas residuales en la agricultura se inició desde principios del siglo XX, y con el paso del tiempo el uso de aguas residuales se ha incrementado conforme al crecimiento poblacional y al desarrollo urbano, industrial y de servicios, así como por la escasez de otras fuentes de agua. La superficie regada con agua residual es aproximadamente de 350,000 ha que se riegan con agua residual cruda o mezclada con aguas de primer uso en diferentes proporciones. De manera general, el agua residual utilizada en México en la agricultura no recibe tratamiento. En algunos casos, y en particular en el valle del



Mezquital, Hidalgo, durante su conducción y distribución el agua residual recibe un tratamiento natural que puede equipararse con un tratamiento primario (IMTA, 2008).

Entre los cultivos que se riegan con aguas residuales en México está la caña de azúcar, que no es de consumo directo para los humanos. La caña de azúcar se produce en 15 estados, contándose con 61 ingenios. La superficie nacional establecida de caña de azúcar es de alrededor de 660,000 ha. Uno de los principales estados productores es San Luis Potosí que cuenta con aproximadamente 71,000 hectáreas, correspondiendo el 19% a condiciones de riego y el 81% a condiciones de temporal; en este estado se encuentran ubicados cuatro ingenios, uno de ellos es el Fideicomiso Ingenio Plan de San Luis (FIPSL) con 24 años de antigüedad (Sagarpa, 2004).

El FIPSL utiliza el agua del río El Salto, afluente del río Pánuco, cuya calidad físico-química y bacteriológica es buena para el proceso de industrialización de la caña. El Ingenio durante una zafra genera un volumen aproximado de agua residual de 842,000 m³ que se utiliza para el riego de caña de azúcar desde el año 2005. El agua es tratada en una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), misma que no opera adecuadamente. Desde hace alrededor de cinco años, que coincide con la construcción de la PTAR, el Ingenio decidió aprovechar el agua residual en el riego de una superficie aproximada de 88 ha de caña de azúcar, en parcelas ubicadas en las inmediaciones del Ingenio. Esta agua residual o efluente presenta restricciones en cuanto a su calidad físico-química y bacteriológica según la Ley Federal de Derechos (Diario Oficial de la Federación, 1981) y la NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT, 1996), ya que los niveles de los parámetros demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y sólidos suspendidos totales (SST), rebasan los límites que establecen la ley y norma referidos.

Según el Artículo 276 de la Ley Federal de Derechos (LFD) (Diario Oficial de la Federación, 1981), están obligados a pagar el derecho por uso o aprovechamiento de cuerpos receptores de las descargas de aguas residuales las personas físicas o morales que descarguen en forma permanente, intermitente o fortuita aguas residuales en ríos, cuencas, cauces, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua, así como los que descarguen aguas residuales en los suelos o las infiltren en terrenos que sean bienes nacionales o que puedan contaminar el subsuelo o los acuíferos, en términos de lo dispuesto en esta Ley (Diario Oficial de la Federación, 1981; última reforma publicada en el DOF el 18-11-2010).

En la zona del Fideicomiso Ingenio Plan de San Luis los cuerpos receptores se clasifican como de "tipo A", según la Ley Federal de Derechos (LFD) (Diario Oficial de la Federación, 1981). Los límites máximos permisibles por cada contaminante para el cuerpo receptor tipo "A" (ríos, aguas y suelos) son de 150 mg/l de sólidos suspendidos totales y de 320 mg/l de DQO, ambos valores como resultado de un promedio mensual. Por otro lado, la Norma Oficial NOM-001-SEMARNAT-1996 establece que para una descarga directa a suelo, con fines de uso en riego



agrícola, el único parámetro limitante son las grasas y aceites, con una concentración promedio mensual de 15 mg/l y una concentración promedio diaria de 25 mg/l.

Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo es investigar si el riego con el agua residual tiene un impacto negativo tanto en los suelos cultivados con caña de azúcar, así como en los cuerpos de agua superficial y subterráneos aledaños a este Ingenio, los cuales son el agua freática subsuperficial generada por la percolación del agua de riego, el río El Salto, dos norias propiedad de productores de caña particulares y un pozo de 90 m de profundidad que es propiedad del Ingenio.

Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en el FIPSL en el municipio de Cd. Valles S.L.P. El FIPSL dispone de una superficie de 15,640 ha que en su mayoría se distribuye en el municipio referido; cuenta con un clima semicálido húmedo. Los datos climáticos muestran que para un periodo de observación de 49 años (1961-2010) la temperatura media anual es de 24.5°C, con una máxima absoluta de 45.5°C y una mínima de 6°C. La precipitación pluvial anual es de 1,489 mm; los meses más lluviosos son desde mayo hasta septiembre. Se realizaron muestreos y análisis en laboratorio del agua de distintos cuerpos de agua y análisis de suelo; estudio topográfico y diseño ingenieril y agronómico de un sistema de riego.

El muestreo y los análisis físico químicos y bacteriológicos (FQB) del influente se llevaron a cabo de acuerdo con los parámetros que indican las normas NOM-001-SEMARNAT-1996, la LFD y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) para determinar la calidad del agua para riego (Ayers y Westcot, 1987). Se efectuaron tres muestreos en los meses de diciembre, febrero y marzo. Los parámetros analizados son: pH, coliformes fecales (NMP/100ml), conductividad eléctrica (CE, dS/m), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO, mgO₂/l), fósforo total (mg/l), sólidos suspendidos totales (SST, mg/l), nitrógeno total (N-total, mg/l), grasas y aceites (G y A, mg/l), arsénico (mg/l), cadmio (Cd, mg/l), cobre (Cu, mg/l), cromo (Cr, mg/l), mercurio (Hg, mg/l), níquel (Ni, mg/l), zinc (Zn, mg/l), cianuros (mg/l), plomo (Pb (mg/l), RAS calculado (relación de adsorción de sodio), sodio (meq/l), cloro (meq/l), bicarbonato (HCO₃, mg/l), boro (mg/l). Los muestreos se efectuaron por personal certificado del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), y los análisis se practicaron en el laboratorio de calidad del agua de este instituto; dicho laboratorio está acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditación, A.C., por lo que todos los análisis se hicieron según las normas específicas para cada caso.

Para esclarecer si la aplicación de riegos está creando un manto freático somero (<3 m de profundidad), e investigar si éste está contaminando el manto freático y el subsuelo (<1.5 m de profundidad), se instalaron ocho pozos de observación del nivel freático somero, a una profundidad de tres metros; cada pozo de 10 cm de



diámetro se además con tubos de PVC hidráulico con ranuras de 1 mm en toda su longitud. Los pozos se distribuyeron espacialmente cubriendo toda la zona de estudio, de 184 ha (1 pozo por cada 23 ha) tanto en parcelas de riego (superficie de riego de 88 ha) con agua residual como de secano (96 ha). En los pozos se midieron las fluctuaciones temporales y espaciales del nivel freático superficial y se tomaron muestras del agua freática para medir su calidad FQB, de esta forma se determinó la capacidad de los suelos para depurar los contaminantes existentes en el agua de riego; se tomaron muestras de agua en cuatro eventos, entre febrero y abril de 2011.

Se realizaron análisis puntuales para medir la calidad FQB a muestras de agua tomadas en tres eventos entre febrero y abril de 2011 en el río El Salto en puntos localizados aguas arriba y abajo del FIPSL; el río está ubicado aproximadamente a medio kilómetro del Ingenio. Se analizó el agua en dos norias, una está ubicada a un km aproximadamente al sur del Ingenio (noria 1) y a menor altitud del mismo, y la otra hacia el noroeste a una distancia de dos km del Ingenio y a mayor altitud de éste (noria 2). En la noria 1 se realizaron tres muestreos entre febrero y abril de 2011, y en la noria 2 se hicieron dos muestreos, uno en octubre de 2010 y el otro en marzo de 2011. Se analizó el agua de un pozo profundo en dos fechas, una en octubre de 2010 y la otra en marzo de 2011.

En el área de estudio de 184 ha se tomaron muestras de suelo a las profundidades de 0-30, 30-60, 60-90 y 90-150 cm en ocho sitios, cuatro en la zona de riego y cuatro en el área de temporal. Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio Central de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Los parámetros que se determinaron en cada una de las 32 muestras que en total se colectaron son: pH, materia orgánica (MO), nitrógeno inorgánico (N), fósforo asimilable (P), potasio intercambiable (K), calcio intercambiable (Ca), magnesio intercambiable (Mg), textura, hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn), boro (B), densidad aparente (Da), carbonato total (CaCO_3), conductividad eléctrica (CE), sodio intercambiable (Na), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y textura.

Los valores promedio de los análisis de la calidad del agua realizados en la PTAR y en los cuerpos de agua se compararon con los límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT 1996, Ley Federal de Derechos y la FAO. Se realizó un análisis de varianza de regresión lineal simple para determinar la relación entre algunos parámetros físico químicos analizados en el agua de riego y en el agua del nivel freático superficial. Se obtuvieron valores medios de los parámetros relacionados con salinidad y fertilidad del suelo, tanto en el área de riego como en la de temporal; se aplicó la prueba de t para dos muestras suponiendo varianzas iguales para discernir si la diferencia entre medias es significativa. Se realizó un análisis de varianza de regresión lineal simple para conocer si el pH del suelo está relacionado con los niveles de los parámetros químicos medidos en el suelo, en el área de riego. El análisis estadístico se realizó mediante el programa Excel 2010.

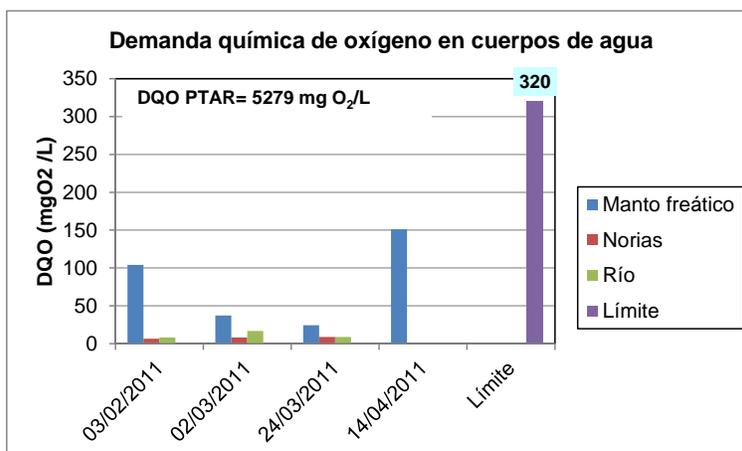


Análisis y discusión de resultados

Desde el punto de vista de las restricciones de la NOM-001 (SEMARNAT, 1996), LFD (Diario Oficial de la Federación, 1981) y del Manual 29 de la FAO (Ayers y Westcot, 1987), se examinó que el agua residual no cumple con los parámetros pH, coliformes fecales, CE, DBO₅, DQO, SST, N-total, Na y Cl (Cuadro1). Esto se debe a que la PTAR no opera adecuadamente porque su diseño, construcción y operación no son los adecuados. La PTAR debería ser de lodos activados (sistema biológico); sin embargo, su diseño corresponde a un sistema fisicoquímico (solo eliminación de sólidos suspendidos, no disueltos); además, El valor de la DQO es muy alto y se debe a que la PTAR solo remueve partículas suspendidas no disueltas (Sandoval, 2011). Asimismo, el manejo del agua residual que genera la fábrica es inadecuado, ya que propicia la fermentación y acidificación del agua previo a su disposición en la PTAR (Sandoval, 2011). El pH más bajo, de 5.16 se obtuvo en el muestreo de diciembre de 2010. En coliformes fecales el valor más alto observado fue de 9300 (NMP/100ml) en diciembre de 2010, cuando inició la zafra; su origen es el agua de uso doméstico de una colonia de trabajadores del Ingenio, que se mezcla con el agua generada por la fábrica. La mayor CE se determinó en marzo de 2012 con 3.5 dS m⁻¹. El contenido más alto de DBO₅, de 4271 mg l⁻¹, se midió en marzo. La DQO más elevada de 6106 mgO₂ l⁻¹ se observó en febrero de 2011. El dato más elevado de SST, de 610 mg l⁻¹, se obtuvo en febrero. En Pb el valor más alto se encontró en el muestreo de marzo, con 0.235 mg l⁻¹; sin embargo a pesar de su magnitud, está dentro del límite. El nivel medio de Cu de 0.13 mg l⁻¹ se observó dentro de la norma, aunque en febrero fue de 0.207 mg l⁻¹. De igual manera, el contenido de Hg más alto, de 0.002 mg l⁻¹, medido en marzo de 2011, también está dentro de la norma.

En los niveles de los parámetros analizados en las norias 1 y 2 no se observaron grandes diferencias, con excepción de la CE que en la noria 1 (más próxima al Ingenio que la noria 2) fue de 1.8 dS m⁻¹ mientras que en la noria 2 resultó de 0.71 dS m⁻¹. Esto se podría deber al flujo subsuperficial de agua de manantiales localizados en los cerros del lado poniente; ya que en el pozo de nivel freático número 6, localizado al poniente de la noria 1 y próximo a las faldas de los cerros, en el área de temporal y dentro de la zona de estudio, se encontraron niveles altos de CE, del orden de 6.1 dS m⁻¹. Sobre la calidad del agua del río aguas arriba y aguas debajo de la PTAR, se encontró cierta uniformidad en los resultados; sin embargo el pH aguas abajo resultó un poco más bajo, así como el nivel de As medido en marzo, de 0.025 mg l⁻¹. En ambos casos se supone un posible contacto subsuperficial de humedad que podría generarse de filtraciones del canal que conduce las aguas residuales producidas en la fábrica, hacia el tanque homogeneizador de la PTAR; aunque también podría presentarse filtraciones del propio tanque, cuya humedad entra en contacto con el agua del río El Salto. Es por ello que deberá estudiarse con más detalle dicho aspecto mediante un proyecto específico. Por todo lo anterior, se confirmó que el agua residual que es generada en la PTAR no cumple con la NOM-001-SEMARNAT 1996, Ley Federal de Derechos y la FAO; y por esta circunstancia el Ingenio ha estado sujeto a penalizaciones por parte de la Comisión Nacional del Agua (Conagua).

Sin embargo al entrar en contacto con el suelo por su aplicación en riego, la calidad FQB del agua cambia a niveles dentro de la norma, debido a la capacidad de remoción de contaminantes que tiene el suelo, ya que se observó que en los pozos de observación del nivel freático superficial, norias, río El Salto y un pozo profundo, la calidad FQB del agua estuvo dentro de los límites permitidos por la norma referida, por lo que el riego con agua residual no afecta la calidad de los cuerpos de agua analizados (Gráfica 1). Con excepción de la CE, en todos los parámetros analizados en los pozos de observación del nivel freático, norias y en el río aguas arriba y abajo, los resultados de laboratorio muestran que su calidad FQB está dentro de la norma (Cuadro 1).



Gráfica 1. Variación de la demanda química de oxígeno en cuerpos de agua.

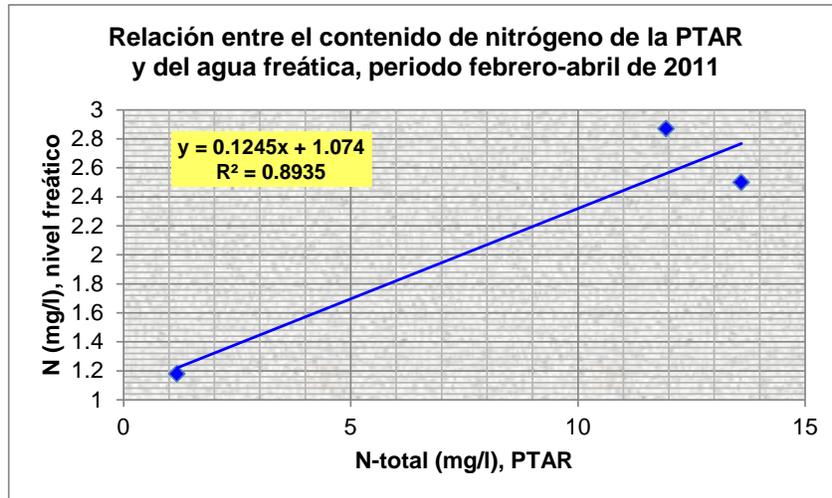
La mayoría de compuestos orgánicos originales de humanos, animales o plantas que están contenidos en las corrientes de drenaje son rápidamente descompuestos en los suelos (World Health Organization, 2006). La reducción en la concentración de la DBO en el presente estudio se explica porque los mecanismos de remoción incluyen filtración, absorción, adsorción y reducción y oxidación biológica. La aplicación de agua residual en condiciones controladas (es decir a través de láminas de riego controladas y utilizando inundación intermitente) permite la biodegradación de cientos de kg de DBO/ha, sin impactar en el ambiente. En los casos como el presente, donde las concentraciones de DBO son extremadamente altas ($>500 \text{ mg l}^{-1}$) combinadas con niveles altos de sólidos totales disueltos, puede ocurrir el sellamiento del suelo. En cuanto a los SST la filtración a través del perfil del suelo es el principal mecanismo de remoción (World Health Organization, 2006).

En México el azúcar es un producto de consumo popular. Pero además, la industria mexicana de alimentos es también un fuerte consumidor de azúcar. El consumo promedio anual de azúcar en México se ubicó en 4.6 millones de toneladas, con lo cual se convierte en el séptimo país que más consume. En este país la caña de azúcar se produce en 15 estados, contándose con 61 ingenios distribuidos en las zonas productoras de caña. La superficie Nacional establecida



de caña de Azúcar es de alrededor de 660,000 ha. Uno de los principales estados productores es San Luis Potosí, en el que la superficie que se destina a la producción de este cultivo es de aproximadamente 71,000 hectáreas, correspondiendo el 19% a condiciones de riego y el 81% a condiciones de temporal (Sagarpa, 2004). En el FIPSL el riego actual es intermitente, ya que en total se aplican alrededor de cuatro riegos en cada parcela, durante la zafra que cubre de diciembre a mayo, y el resto del año las lluvias aportan humedad al cultivo. Además, la caña de azúcar es un cultivo semiperenne, con raíz fibrosa que profundiza hasta aproximadamente 60 cm, y que por lo tanto con su desarrollo la raíz ayuda a evitar el sellamiento del suelo por los niveles de DBO y SST del agua de riego; que de otro modo se lograría con las altas cantidades de materia orgánica que se aplican con el riego. Es así que la caña de azúcar es un cultivo adecuado para aprovechar el agua residual que produce el FIPSL.

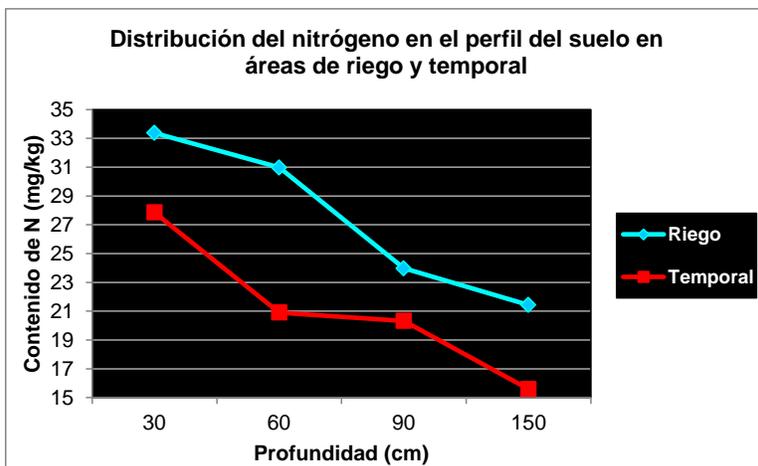
Se obtuvo un alto nivel de correlación entre la concentración de parámetros físico químicos del agua de riego y del agua de pozos de observación del nivel freático, en los parámetros pH, CE, DBO₅, DQO, N-total y Pb (Cuadro 2). Esto indica que en las parcelas de caña de azúcar que están siendo irrigadas, la relación del suelo, las plantas y el clima llevan a cabo un proceso eficiente de depuración de contaminantes. Con los niveles medios de estos parámetros tanto en la PTAR como en el agua freática, se calculó que la capacidad de remoción de la DQO se estimó del 98%, de DBO del 99%, de SST del 86%, optimización del nivel de pH del 97% y una reducción de coliformes fecales de un 99%. Por lo cual se concluye que el riego de caña de azúcar con agua residual disminuye los valores de los parámetros hasta niveles dentro de la NOM-001-SEMARNAT-1996, de la Ley Federal de Derechos y de la FAO. Un pH ácido del agua de la PTAR correlacionó con un pH neutro en el agua freática; la relación es inversa. La CE observada en el agua freática se relaciona con la CE del agua de la PTAR; la relación es directa ($R^2= 0.83$). Las altas concentraciones de DBO y DQO en el agua de riego correlacionaron con bajos niveles de estos parámetros en el agua freática ($R^2= 0.75$ y 0.97 , respectivamente); los niveles más altos de N del agua de la PTAR también correlacionaron con los altos valores analizados en el agua freática ($R^2= 0.89$) (Gráfica 2). Una de las causas de la existencia de Pb en el agua freática es su concentración observada en el agua de riego, que tuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.98 (Cuadro 2).



Gráfica 2. Relación entre el contenido de nitrógeno del agua de riego y del agua de pozos de observación del nivel freático superficial.

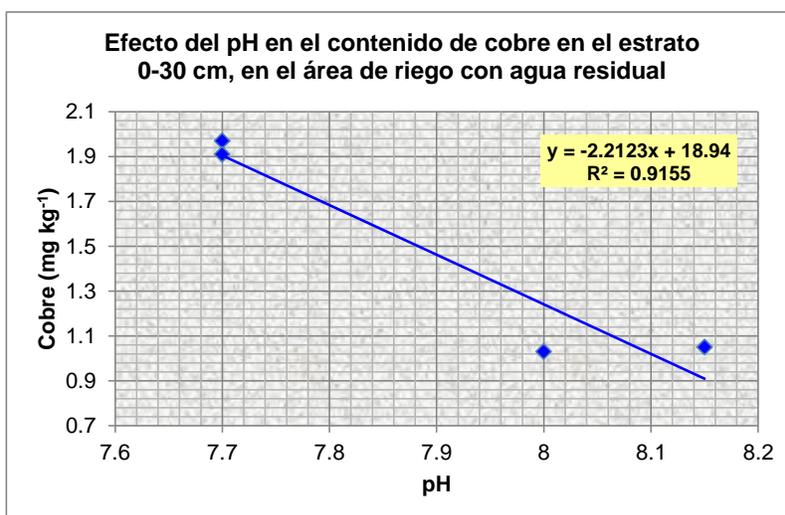
Un nivel freático menor que 1.5 m a partir de la superficie del suelo causa problemas de pudrición de las raíces de las plantas, ensalitramiento y sodificación de los suelos, y problemas nutrimentales a las plantas; además de restricciones para la operación de maquinaria para llevar a cabo las labores culturales de la caña de azúcar. Es así que la profundidad del nivel freático que se crea por la percolación del agua de riego, no representa un problema de drenaje para los suelos y la caña de azúcar, puesto que se observó por debajo de 1.9 m de profundidad en promedio durante la época de riegos, coincidente con la zafra; el sistema radicular de la caña explora los primeros 60 cm de suelo, por lo que los contaminantes presentes en el agua freática no entran en contacto con las raíces. Comparativamente, el nivel freático promedio en la época de estiaje fue de 0.9 m entre agosto y octubre de 2010; su origen son las precipitaciones pluviales, cercanas a 1500 mm por año.

En el área de riego los valores promedio medidos en los estratos a 0.30, 0.60, 0.90 y 1.5 m de profundidad, de CE, N, P, Mg, Fe, Cu, Zn y Mn resultaron más altos que en el área de temporal (Gráfica 3); por su parte los análisis promedio para el mismo espesor de suelo de pH, K, Ca, Na, CaCO₃ y B se observaron más bajos en el área de riego que en la de temporal. Cabe destacar que el pH natural es alcalino, con niveles hasta de 8.4; los contenidos de Ca son altos, hasta de 14532 mg/kg; la CIC natural que es hasta de 57.7 Cmol(+)/kg y los niveles de arcilla hasta de 80%. Los resultados confirman que el agua residual aporta elementos nutritivos al suelo, como son el N, P y micronutrientes, que están acordes con lo señalado por otros autores (Vásquez *et al.*, 2011; World Health Organization, 2006). Sin embargo, únicamente las diferencias determinadas en el pH, N inorgánico y Mn resultaron estadísticamente significativas ($\alpha=0.05$) (Cuadro 3).



Gráfica 3. Contenido de nitrógeno en el perfil del suelo en áreas de riego y temporal.

La disminución del pH de 8.0 a 7.4 en el área de riego por efecto de aplicar agua con un pH ácido (Cuadro 3), favoreció la disponibilidad de elementos mayores como N, ya que el pH afecta la nitrificación. También se observaron aumentos en P y Mg, así como de los micronutrientes Fe, Mg, Zn y Cu, lo cual concuerda con lo referido por Tisdale y Nelson (1982) y Abrol *et al.* (1988) (Gráfica 4). Estadísticamente, se analizó que con bajos valores de pH del suelo, de alrededor de 7, los contenidos de N, P, Zn, Mn, MO, Cu, Fe, Na, CIC, y B son más altos; en algunos casos el efecto fue mayor para estratos específicos del suelo (Cuadro 4). Los suelos son ligeramente más fértiles donde se riega con agua residual que en el área de temporal, como consecuencia del aporte de materia orgánica presente en el agua residual. La caña de azúcar tiene un mejor desarrollo cuando el pH del suelo está entre 5.5 a 7.0.



Gráfica 4. Relación entre el pH y el contenido de cobre en el estrato 0-30 cm de profundidad en el área bajo riego con agua residual.

Cuadro 1. Calidad del agua de la planta de tratamiento de aguas residuales, pozos de observación del nivel freático superficial, norias, río y pozo profundo. Valores promedio.

Parámetro ¹	PTAR ²	Pozos de observación	Norias		Río El Salto		Pozo profundo	Límite ³
			Noria 1	Noria 2	Arriba	Abajo		
pH	5.4	7.0	6.9	7.5	7.8	7.6	7.1	6.5-8.0
Coliformes fecales (NMP/100ml)	5400	7	<3	<3	<3	1500	0	
CE (dS m ⁻¹)	2.63	2.7	1.80	0.71	1.01	0.99	0.83	0.7
DBO ₅ (mg L ⁻¹)	3743	3	1.38	<0.58	<0.58	<0.58		75-150
DQO (mgO ₂ l ⁻¹)	5279	29	7.57	8.99	13.1	11.4	9	320
P-total (mg L ⁻¹)	3.74	0.36	<0.39	<0.39	<0.39	<0.39		20-30
SST (mg L ⁻¹)	407	75	2.42	3.25	1.86	3.51		75-125
N-total (mg L ⁻¹)	13.02	1.93	1.28	2.18	2.18	1.48		<5
G y A (mg L ⁻¹)	8.62	3.49	6.25	<8.81	<8.81	<8.81	<8.81	15-25
As (mg L ⁻¹)	0.006	0.016	<0.0050	0.0082	<0.005	0.0082	<0.0050	0.1-0.2
Cd (mg L ⁻¹)	<0.002	0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.001	0.1-0.2
Cu (mg L ⁻¹)	0.13	0.055	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050	<0.05	4.0-6.0
Cr (mg L ⁻¹)	<0.05	0.05	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050	<0.05	0.5
Hg (mg L ⁻¹)	0.0013	0.0011	0.0012	0.0013	0.0013	0.0012	<0.0015	0.005-0.01
Ni (mg L ⁻¹)	0.079	0.0687	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	2.0-4.0
Zn (mg L ⁻¹)	0.218	0.3856	0.857	0.814	0.814	0.660	4.849	10.0-20.0
Cianuros (mg L ⁻¹)	<0.020	0.02	0.020	0.020	0.020	0.020	<0.020	1.0-2.0
Pb (mg L ⁻¹)	0.190	0.1314	0.119	<0.10	<0.10	0.109	0.1289	0.2-0.4
RAS	2	2					0.3	0-3
Na (meq L ⁻¹)	6.4	4.2					0.4	<3
Cl (meq L ⁻¹)	4.9	1.9					0.2	<4
HCO ₃	19.5	5.1					6.8	<90
B (mg L ⁻¹)	<0.048	<0.048					<0.048	<0.7
Clasificación ⁴	C4-S1	C4-S1					C3-S1	

¹CE= conductividad eléctrica; DBO₅= demanda bioquímica de oxígeno (promedios mensual y diario, respectivamente); DQO= demanda química de oxígeno (promedio mensual); SST= sólidos suspendidos totales (promedios mensual y diario, respectivamente); G y A= grasas y aceites.

PTAR²= planta de tratamiento de aguas residuales

³Límites marcados por la NOM-001-SEMARNAT 1996 (SEMARNAT, 1996), por la Ley Federal de Derechos (Diario Oficial de la Federación, 1981) y por la FAO (Ayers y Westcot, 1987).

⁴ Para la clasificación se utilizó el diagrama del Manual 60 (Richards, 1954).

Cuadro 2. Relación entre niveles de parámetros químicos en el agua de riego (variable independiente) y su concentración en el agua de pozos de observación del nivel freático superficial (variable dependiente).

Parámetro ¹	Modelo estadístico	R ²	Número de observaciones	Ft	Fc
pH	Y= -0.057+7.364x	0.90	4	18.512	19.600
CE (dS m ⁻¹)	Y= -0.042+0.738x	0.93	4	18.512	29.574
DBO ₅ (mg L ⁻¹)	Y= -5.818+0.002x	0.92	4	18.512	25.407



DQO (mgO ₂ l ⁻¹)	Y= -16.960+0.007x	0.90	4	18.512	19.020
N-total (mg L ⁻¹)	Y= 1.071+0.124x	0.89	4	18.512	43.246
Pb (mg L ⁻¹)	Y= 0.064+0.341x	0.91	4	18.512	20.640

¹CE= conductividad eléctrica, dS m⁻¹; DBO₅= demanda bioquímica de oxígeno; DQO= demanda química de oxígeno; Fc= valor de F calculado con 95% de confianza; Ft= valor de F crítico, α=0.05 de significancia.

Cuadro 3. Prueba de t de parámetros edáficos para dos muestras suponiendo varianzas iguales.

Parámetro ¹	Concentración en suelo (valor medio)		Observaciones	Probabilidad	t (valor crítico)	t (valor calculado)
	Área bajo riego	Área de temporal				
pH	7.4	8.0	16	0.009	2.042	3.678
CE (dS/m)	1.1	0.9	16	0.381	2.055	0.891
MO (%)	1.8	1.8	16	0.972	2.042	0.034
N (mg/kg)	27.4	21.2	16	0.017	2.131	2.663
P (mg/kg)	8.8	8.1	16	0.735	2.042	0.340
K (mg/kg)	226	306	16	0.006	2.042	2.911
Ca (mg/kg)	6980	8838	16	0.088	2.042	1.760
Na (mg/kg)	39.8	68.0	16	0.051	2.042	2.024
Mg(mg/kg)	969	796	16	0.173	2.042	1.395
CIC (Cmol(+)/kg)	40.2	40.8	16	0.870	2.042	0.164
CaCO ₃ (mg/kg)	4.3	21.9	16	0.000	2.042	4.934
Fe (mg/kg)	18.6	17.0	16	0.708	2.042	0.378
Cu (mg/kg)	1.9	1.6	16	0.342	2.042	0.964
Zn (mg/kg)	0.7	0.6	16	0.655	2.042	0.450
Mn (mg/kg)	12.4	4.8	16	0.029	2.042	2.282
B (mg/kg)	0.4	0.7	16	0.046	2.042	2.077
Arcilla (%)	60.4	50.3	16	0.016	2.042	2.554

¹CE= conductividad eléctrica; MO= materia orgánica; CIC= capacidad de intercambio catiónico.

Cuadro 4. Modelos de regresión lineal simple que relacionan parámetros edáficos (variable dependiente) y el pH (variable independiente) en el área de riego con agua residual.

Parámetro ¹	Estrato (cm)	Modelo estadístico	R ²	Número de observaciones	Ft	Fc
CE (dS m ⁻¹)	60-90	Y= -0.656 + 0.264x	0.94	4	18.512	35.557
MO (%)	0-30	Y= 22.325 – 2.493x	0.75	4	18.51	6.158
N (mg kg ⁻¹)	0-150	Y= 70.308 – 5.704x	0.99	3	161.447	965.038
P (mg kg ⁻¹)	30-60	Y= -84.157 + 12.549x	0.90	4	18.512	19.507
K (mg kg ⁻¹)	0-30	Y= -1295.2 +	0.88	4	18.512	14.673



Ca (mg kg ⁻¹)	0-150	199.01x Y= -11984+ 2509x	0.87	3	161.447	6.910
Na (mg kg ⁻¹)	60-90	Y= 35.529 – 1.607x	0.99	3	161.447	320.333
Mg(mg kg ⁻¹)	0-30	Y= -2972 + 505x	0.87	4	18.512	14.407
CIC (Cmol(+) kg ⁻¹)	30-60	Y= 9.063 + 7.018x	0.99	3	161.447	359.038
CaCO ₃ (mg kg ⁻¹)	0-90	Y= -84.331 + 11.995x	0.99	3	161.447	210.111
Fe (mg kg ⁻¹)	0-150	Y= 68.854 – 7.590x	0.99	3	161.447	587.632
Cu (mg kg ⁻¹)	60-90	Y= 4.266 – 0.462x	0.99	3	161.447	358.484
Zn (mg kg ⁻¹)	0-150	Y= 5.222 – 0.591x	0.90	3	161.447	9.285
Mn (mg kg ⁻¹)	0-30	Y= 633.258 – 77.735x	0.89	4	18.512	17.563
B (mg kg ⁻¹)	0-150	Y= 1.732 – 0.196x	0.98	3	161.447	79.986

¹CE= conductividad eléctrica, dS/m; MO= materia orgánica; CIC= capacidad de intercambio catiónico.

Los mecanismos de remoción de DBO incluyen filtración, absorción, adsorción y reducción y oxidación biológica. Las reacciones de oxidación-reducción durante el tratamiento generalmente ocurren en el tercio superior de la pendiente de los sitios con escorrentía superficial. En cuanto a los SST la filtración a través del perfil del suelo es el principal mecanismo de remoción (World Health Organization, 2006). El agua residual aporta N y P y favorece la disponibilidad de micronutrientes (Vásquez *et al.*, 2011; Tisdale y Nelson, 1982). Se observó que el suelo irrigado tiene una gran capacidad para remover la DQO. Para lograr tal disminución en la DQO el alto contenido de arcilla (52% en promedio) del suelo contribuyó por su capacidad de adsorción. Asimismo, el alto contenido de cal del suelo que permite una disminución de su pH natural, por la reacción química con los sulfatos disueltos en el agua de riego, hacen favorable la biodegradación de los compuestos orgánicos disueltos en el agua de riego. Los contenidos de cloruro y sodio del agua de riego no representan un problema para el suelo, puesto que tanto en los pozos de observación como en los análisis de suelo no se observaron niveles altos; las sales solubles son lixiviadas hacia estratos más profundos durante la época de lluvias.

La caña de azúcar es moderadamente sensible a la salinidad (CE), con un valor umbral de 1.7 dS m⁻¹ (Ayers y Westcot, 1987), por lo que los niveles de salinidad observados en el área de riego, de entre 0.6-1.7 dS m⁻¹, no representan restricciones para su desarrollo. Es así que en el muestreo de suelos realizado en diciembre de 2010, después de finalizada la temporada de lluvias, se observaron valores de CE más bajos que en el muestreo realizado en junio del mismo año, un mes después de concluida la zafra. La clasificación de los suelos por su salinidad son normales, ya que su CE < 4 dS m⁻¹ (Richards, 1954).



De acuerdo con lo expuesto en este trabajo, el agua residual que genera el FIPSL se puede utilizar para el riego de caña de azúcar, ya que los suelos cultivados con esta gramínea depuran los contaminantes presentes en el agua residual. La caña es un cultivo industrial que no se consume directamente por la población, por lo que es un cultivo adecuado para el riego con agua residual. En el FIPSL el agua residual proporciona humedad a las plantas en la época de sequía que coincide con la zafra, por lo cual los rendimientos de caña bruta en las parcelas irrigadas con estas aguas se han incrementado de 60 hasta 90 ton ha⁻¹ (Ing. Miguel Ignacio Portales Guerrero, FIPSL, comunicación personal). El agua residual puede ser ventajosa para producir cultivos cuyos frutos no están en contacto directo con el agua residual. En experimentos controlados en los que se ha regado con agua residual se han obtenido incrementos; en trigo han sido del 39%, en maíz de un 27%, sorgo de un 34%, frijol de un 33% y maíz forrajero de un 34% (Marin *et al*, 2006).

Conclusiones

Se encontró que los suelos con caña de azúcar irrigados con agua residual tienen una capacidad de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) del 98%, de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) del 99%, de sólidos suspendidos totales (SST) del 86%, optimización del nivel de pH del 95% y una reducción de coliformes fecales de un 99%. Por lo cual se concluye que el riego de caña de azúcar con agua residual disminuye los valores de los parámetros hasta niveles dentro de la NOM-001-SEMARNAT-1996, de la Ley Federal de Derechos y de la FAO.

La calidad FQB del agua residual de la PTAR no cumple con la NOM-001-SEMARNAT-1996, ni con la LFD ni con la norma de la FAO para su uso en riego agrícola. Sin embargo al ser utilizada en riego de caña de azúcar, la calidad FQB del agua estudiada en los cuerpos de agua aledaños al Ingenio, como son el agua freática superficial, norias, pozo profundo y río El Salto, cumple con la NOM-001-SEMARNAT-1996 así como con la Ley Federal de Derechos. Por lo cual no es posible establecer un contacto y contaminación del agua residual con los cuerpos de agua estudiados. Es por esto que se puede determinar que la calidad del agua residual que genera anualmente el FIPSL es factible de utilizarse para el riego de 50 ha de caña de azúcar, mediante un sistema de riego por gravedad en baja presión de multicompuertas.

El uso del agua residual del FIPSL en riego de caña de azúcar aporta N, P, Mg y elementos menores; disminuye el pH del suelo lo cual mejora su fertilidad porque deja disponibles algunos elementos mayores y menores.

El suelo, las plantas y el clima contribuyen en la depuración de contaminantes presentes en el agua residual, por lo que operan como una planta de tratamiento natural. Es así que se recomienda realizar estudios sobre el efecto del agua residual en suelo y plantas de caña de azúcar, para investigar su efecto en el rendimiento, calidad de la caña, y los cambios físico-químicos en el suelo; y



también estudiar cultivos que no sean de consumo directo para los humanos, tales como forrajeros. Diseñar sistemas de riego para proteger a los regadores de posibles contagios de virus, bacterias y elementos tóxicos existentes en el agua residual, y para incrementar los rendimientos; así como para hacer un uso eficiente del agua de riego. Realizar estudios similares en otros ingenios y regiones del país, a la luz del calentamiento global que experimenta el planeta.

Referencias bibliográficas

- Ayers, R. S. y Westcot, D. W. (1987). La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje No. 29, Rev. 1, Roma, pp 172.
- Bautista-Cruz A. y María del Rosario Arnaud-Viñas. (2006). Elementos potencialmente tóxicos en suelos agrícolas con manejo del riesgo contaminante. *Naturaleza y Desarrollo*, vol. 4 núm. 1.
- Diario Oficial de la Federación. (1981). Ley Federal de Derechos. Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 31 de diciembre de 1981.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). (2007). Manual para diseño de zonas de riego pequeñas. Comisión Nacional del Agua. Jiutepec, Mor.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). (2008). Diagnóstico del uso de las aguas residuales en la agricultura en México. Informe del Proyecto Interno RD-0802.1. Coordinación de Riego y Drenaje. Subcoordinación de Contaminación y Drenaje Agrícola.
- I.P. Abrol; J.S.P. Yadav y F.I. Massoud. (1988). Salt-Affected Soils and their Management. FAO Bulletin 39. Rome.
- Marin-M.D.; Peña-Cabriales, JJ y Sanchez-Yañez, JM. 2006. Efecto de metales pesados de agua residual sobre la producción de un suelo agrícola. [www-monografias.com](http://www.monografias.com).
- Perroux y White. (1988). Designs for disc permeameter. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 52, pag. 1205-1214.
- Richards, L. A. (1954). Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. Agriculture Handbook No. 60, United States Department of Agriculture.
- Sagarpa (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2004). Plan rector del sistema producto caña de azúcar. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Obtenido de <http://www.amsda.com.mx/prestatales/estatales/sanluis/precanadeazucar.pdf>



Sandoval Y. L. (2011). Informe de actividades de la visita técnica al Ingenio Plan de San Luis. Documento interno, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (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.

Tisdale S. L. y W. L. Nelson. (1982). Fertilidad de los suelos y fertilizantes. UTEHA, México.

T. Méndez García; L. Rodríguez Domínguez y S. Palacios Mayorga. (2000). Impacto del riego con aguas contaminadas, evaluado a través de la presencia de metales pesados en suelos. Terra Latinoamericana, (Vol. 18, Núm. 004). Chapingo, México.

Vásquez S. David, Gavi R. Francisco y Mejía S. Enrique. (2011). Uso potencial del agua residual de los ingenios azucareros del Centro de Veracruz. XVI Congreso Nacional de irrigación, Culiacán, Sinaloa, México, del 6-9 de septiembre de 2011.

World Health Organization. (2006). Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume 2. Wastewater use in agriculture. United Nations Environment Programme. FAO. Printed in France.