

CALIDAD AGRONÓMICA DEL AGUA RESIDUAL TRATADA UTILIZADA EN LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA EN ATLIXCO, PUEBLA

AGRONOMIC QUALITY OF TREATED RESIDUAL WATER USED IN AGRICULTURAL PRODUCTION IN ATLIXCO, PUEBLA

Ivet **Olvera-Bautista**¹, Ignacio **Ocampo-Fletes**^{1*}, M. Alberto **Tornero-Campante**¹,
S. Emilia **Silva-Gómez**², Eduardo **González-Flores**³

¹Colegio de Postgraduados, Campus Puebla, Boulevard Forjadores de Puebla No. 205, Santiago Momoxpan, Municipio San Pedro Cholula. 72760. Puebla, Puebla, México, (ivet_yvy17@yahoo.com.mx), (ocampoif@colpos.mx), (mtornero@colpos.mx), ²Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Instituto de Ciencias, Av. 14 sur 6301, Edificio IC2, Ciudad Universitaria Col. San Manuel, Puebla, Pue. 72570. (soemigo@gmail.com). ³Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Puebla, División de Estudios de Postgrado e Investigación, Avenida Tecnológico No. 420, Colonia Maravillas. 72220. Puebla, Puebla (egonz1962@yahoo.com.mx)

RESUMEN

En la ciudad de Atlixco, Puebla, se genera agua residual municipal que se vierte al río Nexapa. Para tratar el agua se instaló una planta tratadora de aguas residuales (PTAR), sin embargo, esta agua se vierte al río Cantarranas para regar cultivos de Santa Ana Coatepec, Huaquechula. El objetivo fue evaluar la calidad del agua tratada y valorar su uso en la agricultura. Se tomaron muestras en tres puntos: el influente y el efluente de la planta tratadora y en la compuerta. Se muestreó durante la temporada de lluvias y la estación seca. Los procedimientos se basaron en la Norma Oficial Mexicana. Los resultados muestran que en el influente los valores de CE son altos y los índices de SP, SE, PSP y Cl^{-1} y la relación RAS y CE clasifican al agua como condicionada. En el efluente los índices de CE, SE, SP, PSP, Cl^{-1} y RAS y CE, también la clasifican como condicionada. El punto la compuerta, presentó valores altos de CE, y los índices de PSP, Cl^{-1} y RAS y CE condicionan el uso del agua. Los puntos muestreados presentan baja sodicidad pero riesgos de salinización. Se concluye que la calidad del agua resultó condicionada para el riego agrícola.

Palabras clave: Agua contaminada, calidad de agua, planta tratadora, recurso hídrico, riego agrícola.

INTRODUCCIÓN

En países en desarrollo alrededor de 90% de las aguas residuales⁴ se vierten sin tratar a ríos, lagos y océanos (UNESCO, 2015). En

* Autor responsable ❖ Author for correspondence.

Recibido: enero, 2017. Aprobado: octubre, 2018.

Publicado como ARTÍCULO en ASyD 17: 603-614. 2020.

ABSTRACT

In the city of Atlixco, Puebla, municipal residual water is generated that is poured into the Nexapa River. A residual water treatment plant (RWTP) was installed to treat the water, although this water is poured into the Cantarranas River to irrigate crops in Santa Ana Coatepec, Huaquechula. The objective was to evaluate the quality of treated water and to assess its use in agriculture. Samples were taken in three points: the inflow and the outflow from the treating plant and the floodgate. Samples were taken during the rainy season and during the dry season. The procedures were based on the Mexican Official Norm. The results show that the values of EC are high in the inflow and the indexes of PS, ES, PSP and Cl^{-1} and the SAR ratio and EC classify the water as conditioned. In the outflow, the indexes of EC, ES, PS, PSP, Cl^{-1} and SAR and EC also classify the water as conditioned. The floodgate point presented high values of EC, and the indexes of PSP, Cl^{-1} and SAR and CE condition the use of water. The points sampled present low sodicity but salinization risks. The conclusion is that the water quality was conditioned for agricultural irrigation.

Key words: Contaminated water, water quality, treating plant, water resource, agricultural irrigation.

INTRODUCTION

In developing countries around 90% of residual waters⁴ are poured without treating into rivers, lakes and oceans (UNESCO, 2015). In Mexico the generation of municipal residual water exceeds 7.458×10^9 cubic meters per year, which

México la generación de agua residual municipal rebasa 7.458×10^9 metros cúbicos por año, misma que se utiliza de diversas formas: la más importante es para riego agrícola, ya que en el país alrededor de 35 000 hectáreas son irrigadas con este tipo de aguas (AQUASTAT-FAO, 2015). Tan solo de agua residuales municipales se colectan 212 m^3 por segundo y se tratan 123.6 m^3 por segundo, con 2536 plantas de tratamiento, mientras que de aguas residuales industriales se generan 214.6 m^3 por segundo y se tratan 75.9 m^3 por segundo, con 3041 plantas (SEMARNAT, 2017).

Aunque los estudios ponían énfasis en los beneficios percibidos por los agricultores respecto a los nutrientes del efluente, la no extracción de aguas subterráneas y a la fiabilidad del efluente (Winpenny *et al.*, 2013), esta práctica tiene diferentes riesgos para el suelo, los cultivos, la salud humana y animal, como salinización de los suelos, contaminación de aguas superficiales y subterráneas, fijación y migración de contaminantes en suelos y plantas, y su eventual impacto por el consumo de alimentos por parte del ser humano y animales, generando enfermedades por helmintos (lombrices) en agricultores y consumidores de productos agrícolas (Guadarrama y Galván, 2015).

A nivel mundial la calidad del agua de fuentes de agua superficial y subterránea se está deteriorando como resultado de la descarga de aguas residuales no tratadas, que provienen de la minería, la industria y la agricultura (HLPE, 2015). Sin embargo, las ciudades son la principal fuente de contaminación del agua, después de utilizar el recurso, lo desechan en forma de agua residual mezclándola con las corrientes naturales, que generalmente son empleadas en el riego de cultivos. La descontaminación de las aguas residuales es esencial para preservar los ecosistemas, la biodiversidad y la salud humana (Reynoso *et al.*, 2009).

La agricultura es la actividad primaria que genera una gran demanda de agua (Ayers y Westcott 1976; Alexandratos, 1995; Silva *et al.*, 2008; Guadarrama y Galván, 2015). Incluidos los cultivos alimentarios y no alimentarios, usa a nivel mundial 70% de las extracciones de agua superficial y subterránea; y entre países existen grandes diferencias, 90% en países de bajos ingresos y 43% en países con altos ingresos (Winpenny *et al.*, 2013; HLPE, 2015; WWAP, 2018). En México 76% del agua es de uso agropecuario, 48.5% proviene de aguas superficiales y 27.5% de aguas subterráneas (SEMARNAT, 2017).

is used in various ways: the most important is for agricultural irrigation, since in the country around 35 000 hectares are irrigated with this type of water (AQUASTAT-FAO, 2015). Just from municipal residual water, 212 m^3 per second are collected, and 123.6 m^3 per second are treated, with 2536 treatment plants, while 214.6 m^3 per second are generated from industrial residual waters and 75.9 m^3 per second are treated, with 3041 plants (SEMARNAT, 2017).

Although studies emphasize the benefits perceived by farmers regarding the nutrients from the outflow, the non-extraction of underground water, and the reliability of the outflow (Winpenny *et al.*, 2013), this practice has different risks for the soil, the crops, and human and animal health, such as salinization of the soils, contamination of superficial and underground waters, fixation and migration of contaminants in soils and plants, and their occasional impact due to the consumption of foods by humans and animals, generating diseases from helminths (worms) in farmers and consumers of agricultural products (Guadarrama and Galván, 2015).

Globally, the water quality from superficial and underground water sources is deteriorating as a result of the discharge of untreated residual waters, which come from mining, industry and agriculture (HLPE, 2015). However, cities are the main source of water contamination; after using the resource, they discard of it in residual water form mixing it with natural currents, which are generally used in crop irrigation. The decontamination of residual waters is essential to conserve the ecosystems, biodiversity and human health (Reynoso *et al.*, 2009).

Agriculture is the primary activity that generates a large water demand (Ayers and Westcott 1976; Alexandratos, 1995; Silva *et al.*, 2008; Guadarrama and Galván, 2015). Including the food and non-food crops, it uses worldwide 70% of the superficial and underground water extractions; and between countries there are large differences, 90% in low-income countries and 43% in high-income countries (Winpenny *et al.*, 2013; HLPE, 2015; WWAP, 2018). In Mexico, 76% of water is used for agriculture and livestock production, 48.5% comes from superficial waters and 27.5% from underground waters (SEMARNAT, 2017).

En la actualidad el uso de aguas contaminadas en la agricultura es una forma eficiente para conservar dicho recurso y reciclar nutrientes; sin embargo, existen significativos riesgos para la salud asociados con el uso de aguas residuales no tratadas (Winpenny *et al.*, 2013). Otros impactos incluyen: mayor contaminación del agua por organismos patógenos, niveles inaceptablemente altos de metales traza y químicos tóxicos y cambios en la acidez, temperatura y salinidad del agua (HLPE, 2015).

Ante la problemática anterior, una alternativa empleada para la descontaminación del agua son las plantas de tratamiento de aguas residuales, que utilizan diversas técnicas de saneamiento; una de las más empleadas es la de lodos activados, tratamiento biológico de aguas residuales que emplean microorganismos para llevar a cabo la descomposición de los residuos (Marín y Osés, 2013).

La reutilización del agua residual tratada es una opción creciente que se está estudiando y adoptando en regiones con escasez del líquido, con crecimiento de la demanda y periódicas sequías por factores climáticos (Winpenny *et al.*, 2013). Se basa esencialmente, en aprovecharla como agua de riego o como agua de recarga con objeto de incrementar los recursos hídricos de un sistema acuífero. Esta reutilización puede evitar muchos problemas que ocasiona el vertido de estas aguas en cauces superficiales o en el mar, como riesgos sanitarios, cambios en las características organolépticas, eutrofización, etc. (Esteller, 2002; Hendricks, 2010; Winpenny *et al.*, 2013).

La calidad del agua de riego es un término que se utiliza para indicar la conveniencia o limitación del empleo del agua, con fines de riego de cultivos agrícolas, cuya determinación generalmente toma como base las características químicas del agua; así como la tolerancia de los cultivos a las sales, las propiedades de los suelos, aguas y las condiciones climatológicas (Palacios y Aceves, 1994).

En México existen diferentes normativas que establecen el manejo del agua residual entre las que se encuentran las Normas Oficiales Mexicanas: NOM-001-SEMARNAT-1996⁵, NOM-002-SEMARNAT-1996⁶, NOM-003-SEMARNAT-1997⁷ (SEMARNAT, 1997) y la NOM-004-SEMARNAT-2002⁸ (SEMARNAT, 2003) pero no incluyen parámetros agronómicos de calidad del agua. Rodríguez *et al.* (2009) señalan que la NOM-004-SEMARNAT-2002, no incluye parámetros

Presently, the use of contaminated waters in agriculture is an efficient way to conserve this resource and recycle nutrients; however, there are significant risks to health associated to the use of untreated residual water (Winpenny *et al.*, 2013). Other impacts include: higher water contamination by pathogenic organisms, unacceptably high levels of trace metals and toxic chemicals, and changes in water acidity, temperature and salinity (HLPE, 2015).

Facing the aforementioned quandary, an alternative used for the decontamination of water are residual water treatment plants, which use various techniques of sanitation; one of the most frequently used is that of activated sludge, biological treatment of residual water that uses microorganisms to carry out the decomposition of residues (Marín and Osés, 2013).

The reuse of treated residual water is a growing option that is being studied and adopted in regions with scarcity of the liquid, with an increase of the demand and periodical droughts from climate factors (Winpenny *et al.*, 2013). It is essentially based on taking advantage of it as irrigation water or recharge water with the objective of increasing the water resources of an aquifer system. This reuse can prevent many problems caused by the spilling of these waters in superficial courses or in the sea, such as sanitary risks, changes in organoleptic characteristics, eutrophication, etc. (Esteller, 2002; Hendricks, 2010; Winpenny *et al.*, 2013).

The quality of irrigation water is a term that is used to indicate the convenience or limitation of water use, with the purpose of irrigation for agricultural crops, whose determination generally takes as a basis the chemical characteristics of water, as well as tolerance of crops to salts, soil and water properties, and climatic conditions (Palacios and Aceves, 1994).

In Mexico there are different laws that establish the management of residual water, among which there are the Mexican Official Norms: NOM-001-SEMARNAT-1996⁵, NOM-002-SEMARNAT-1996⁶, NOM-003-SEMARNAT-1997⁷ (SEMARNAT, 1997) and NOM-004-SEMARNAT-2002⁸ (SEMARNAT, 2003), but they do not include agronomic parameters of water quality. Rodríguez *et al.* (2009) point out that NOM-004-SEMARNAT-2002 does not include parameters of agronomic quality such as the content of

agronómicos de calidad, como el contenido de sales solubles, el contenido de sodio en relación con otros cationes y el contenido de elementos tóxicos para la planta.

Los aspectos de salinidad y sodicidad se consideran en la mayoría de estudios realizados de agua residual y residual tratada como secundarios, ya que no se consideran de riesgo para el ser humano, sin embargo, representan un peligro potencial en los suelos y los cultivos, si no se les toma en consideración de manera anticipada (Ontiveros *et al.*, 2013).

Cuando el agua posee una elevada concentración de sales y no se maneja de manera apropiada, se expone al suelo en el aumento de su concentración salina, provocando que se reduzca el potencial osmótico de la solución de suelo, lo cual se ve reflejado en una reducción del potencial total de agua en el suelo, disminución de su disponibilidad en el cultivo y reducción del rendimiento (Castellanos *et al.*, 2000).

Una forma de evitar todos estos efectos, es tratar el agua antes de usarla en el riego agrícola, como el caso de la planta tratadora de aguas residuales (PTAR) instalada en el municipio de Atlixco, Puebla, en el año 2011. Se localiza en la colonia Juan Uvera, en Atlixco, Puebla, fue diseñada para tratar 150 L s⁻¹, actualmente opera a 50% debido a que se equipó para operar a esta capacidad. El tren de tratamiento de las aguas residuales domésticas de la ciudad de Atlixco, consta de los siguientes procesos unitarios (Comunicación personal⁹):

Tratamiento Preliminar. Consta de etapas de cribado y desarenado cuyo objetivo es eliminar sólidos gruesos cuya presencia pueda interferir en procesos posteriores.

Tratamiento Primario. En esta etapa se elimina una fracción de los sólidos en suspensión y de la materia orgánica del agua residual por medio de un proceso de sedimentación.

Tratamiento secundario o biológico. El objetivo es la remoción de la materia orgánica biodegradable y sólidos suspendidos por procesos biológicos. En este caso la planta emplea dos procesos de este tipo. Primero, un sistema de tratamiento biológico de tipo anaerobio por medio de un reactor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodos (UASB por sus siglas en inglés) y después uno de tipo aerobio por medio de un filtro percolador. Como etapa final de este proceso se realiza una sedimentación secundaria para remover los lodos biológicos producidos.

soluble salts, the content of sodium in relation to other cations, and the content of toxic elements for the plant.

The aspects of salinity and sodicity are considered in most studies carried out in residual water and treated residual water as secondary, since they are not considered risky for human beings; however, they represent a potential danger in soils and crops, if they are not taken into consideration in advance (Ontiveros *et al.*, 2013).

When water has a high concentration of salts and is not managed appropriately, the soil is exposed with the increase of saline concentration, causing it to reduce the osmotic potential of the soil solution, which is reflected in a reduction of the total water potential in the soil, decrease of its availability in the crop, and reduction in yield (Castellanos *et al.*, 2000).

A way to avoid all these effects is to treat water before using it in agricultural irrigation, as is the case of the residual water treating plant (RWTP) installed in the municipality of Atlixco, Puebla, in the year 2011. It is located in the neighborhood of Juan Uvera, in Atlixco, Puebla; it was designed to treat 150 L s⁻¹ and currently operates at 50% because it was equipped to operate at this capacity. The treatment train of domestic residual waters from the city of Atlixco consists of the following unitary processes (Personal communication⁹):

Preliminary Treatment. It consists of stages of filtering and desanding with the objective of eliminating coarse solids whose presence can interfere in later processes.

Primary Treatment. In this stage a fraction of the solids in suspension and of the organic matter from the residual water is eliminated through a sedimentation process.

Secondary or Biological Treatment. The objective is the removal of the biodegradable organic matter and suspended solids from biological processes. In this case, the plant uses two processes of this type. First, anaerobic biological treatment system is used with an upstream anaerobic sludge blanket (UASB), and then aerobic treatment through a percolating filter. As final stage of this process, secondary sedimentation is carried out to remove the biological sludge produced.

Tertiary Treatment. In this stage, chemical substances were applied with the objective of performing the elimination of pathogenic

Tratamiento terciario. En esta etapa se aplican sustancias químicas con el objetivo de llevar a cabo la eliminación de microorganismos patógenos existentes en el agua tratada. En este caso se aplica cloro.

Una vez tratada el agua por la PTAR es descargada al río Cantarranas, y por el canal principal se abastece la zona agrícola de Santa Ana Coatepec, municipio de Huaquechula. Este río es cuerpo receptor del agua residual proveniente de la ciudad de Atlixco y poblaciones de la parte alta, y sobre este mismo se descarga el agua residual tratada; en forma mezclada se emplea para el riego de cultivos forrajeros, hortícolas, aromáticos, flores y básicos.

Considerando el reuso de estas aguas para el riego agrícola, el objetivo de este estudio fue evaluar la calidad del agua residual tratada y valorar su uso en la producción agrícola.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio abarca parte de dos municipios: Atlixco, donde se encuentra la (PTAR) ubicada en la colonia Juan Uvera, y en Huaquechula donde se encuentran los campos de riego de la Junta Auxiliar de Santa Ana Coatepec que recibe las aguas tratadas (Figura 1).

Se realizaron muestreos en dos periodos, en época seca y en temporada de lluvias. Se muestreó agua residual y residual tratada en tres puntos: Influyente (I), Efluente (E) y Compuerta El Potrero (CP); se consideró este último porque es la entrada del agua a los campos de cultivo después de recorrer 4 km, una vez que se mezcla el agua residual tratada del Efluente de la PTAR con agua que provienen del río Cantarranas (Figura 2).

En cada punto se realizó un muestreo compuesto colectando agua en tres momentos cada dos horas. En cada punto de muestreo se determinaron parámetros hidrológicos en campo: coordenadas, hora, altitud (msnm), temperatura de agua (°C), pH, conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$) y materia flotante.

Las muestras se depositaron en frascos de plástico y se trasladaron al laboratorio manteniendo una temperatura menor a 4 °C de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Las muestras de agua se analizaron conforme a los procedimientos establecidos para cada parámetro en la Norma Oficial Mexicana para análisis de agua, concentradas en el Cuadro 1.

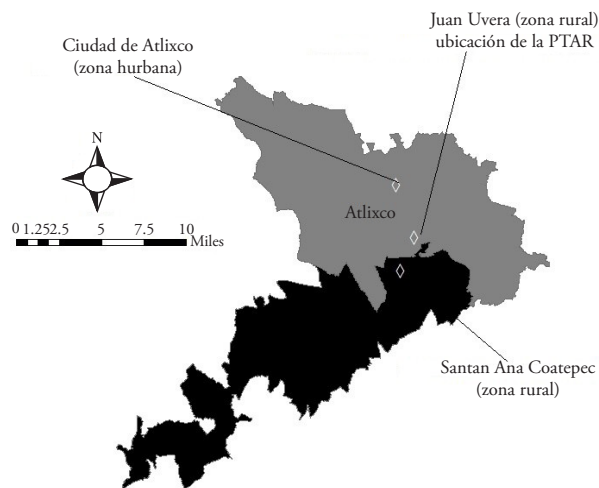
microorganisms that are present in the treated water. In this case, chloride is applied.

Once the water is treated by the RWTP it is discharged into the Cantarranas River, and is supplied to the agricultural zone of Santa Ana Coatepec, municipality of Huaquechula, through the main canal. This river is the receptor body of residual water from the city of Atlixco and populations in the high part, and the treated residual water is discharged into this same river; in a mixed form, it is used for irrigation of fodder, vegetable, aromatic, flower and basic crops.

Considering the reuse of these waters for agricultural irrigation, the objective of this study was to evaluate the quality of the treated residual water and to assess its use in agricultural production.

MATERIALS AND METHODS

The study zone covers part of two municipalities: Atlixco, where the RWTP is located in the neighborhood of Juan Uvera, and Huaquechula where the irrigation fields are found in the Auxiliary Board of Santa Ana Coatepec which receives the treated waters (Figure 1).



Fuente: elaboración propia con datos de CONABIO, 2016. Portal de Geoinformación. ♦ Source: Prepared by authors with data from CONABIO, 2016. Geoinformation Portal.

Figura 1. Ubicación de la PTAR en el municipio de Atlixco y la zona de riego en el municipio de Huaquechula, Puebla.

Figure 1. Location of the RWTP in the municipality of Atlixco and the irrigation zone in the municipality of Huaquechula, Puebla.



Fuente: elaboración propia con información de Google Earth, 2018. Google-INEGI. ♦ Source: Prepared by authors with information from Google Earth, 2018. Google-INEGI.

Figura 2. Ubicación de los sitios de muestreo en la PTAR (Atlixco) y en la compuerta el Potrero de la zona de riego en el municipio de Huaquechula, Puebla.

Figure 2. Location of the sampling sites in the RWTP (Atlixco) and in the Potrero floodgate of the irrigation zone in the municipality of Huaquechula, Puebla.

Se cuantificó la concentración de cationes y aniones para determinar los índices propuestos por Palacios y Aceves (1994), siendo los contenidos de sales solubles: Conductividad Eléctrica (CE), Sodio Potencial (SP), Salinidad Efectiva (SE), efecto probable del sodio sobre las características físicas

Sampling was done in two periods, during the dry season and the rainy season. Residual and treated residual water was sampled in three points: Inflow (I), Outflow (O) and “El Potrero” Floodgate (PF); the latter was considered because it is the entry of the water to the cultivation fields after traveling down 4 km, once the residual water treated from the Outflow of the RWTP mixes with water that comes from the Cantarranas River (Figure 2).

In each point a compound sample was taken by collecting water at three moments every two hours. In each point of sampling, hydrological parameters were determined in the field: coordinates, hour, altitude (masl), water temperature (°C), pH, conductivity ($\mu\text{s}/\text{cm}$) and floating matter.

The samples were placed in plastic containers and transported to the laboratory maintaining a temperature below 4 °C according to the NOM-001-SEMARNAT-1996.

The water samples were analyzed in agreement to the procedures established for each parameter in the Mexican Official Norm for water analysis, concentrated in Table 1.

The concentration of cations and anions was quantified to determine the indexes proposed by Palacios and Aceves (1994), with the contents of soluble salts being: Electric Conductivity (EC), Potential Sodium (PS), Effective Salinity (ES), probable effect of sodium on the physical characteristics of the soil: Sodium Adsorption Rate (SAR), Residual Sodium Carbonate (RCS) and Possible Sodium Percentage (PSP).

Cuadro 1. Parámetros y métodos empleados para evaluar la calidad del agua residual y tratada.

Table 1. Parameters and methods used to evaluate the quality of residual and treated water.

| Parámetro | Método |
|--|---------------|
| pH | NMX-AA-008 |
| Conductividad eléctrica dS m^{-1} | Conductímetro |
| Ca^{2+} mg L^{-1} | NMX-AA-072 |
| Mg^{2+} mg L^{-1} | NMX-AA-072 |
| Na^{+} mg L^{-1} | Flamometría |
| K^{+} mg L^{-1} | Flamometría |
| Nitratos (NO_3^-) mg L^{-1} | NMX-AA-079 |
| Sulfatos (SO_4^{2-}) mg L^{-1} | NMX-AA-074 |
| Fosfatos (PO_4^{3-}) mg L^{-1} | NMX-AA-029 |
| Carbonatos (CO_3^{2-}) mg L^{-1} | Volumetría |
| Bicarbonatos (HCO_3^-) mg L^{-1} | Volumetría |
| Cloruros (Cl^-) mg L^{-1} | NMX-AA-073 |

Fuente: elaboración propia. ♦ Source: prepared by authors.

del suelo: Relación de Adsorción de Sodio (RAS), Carbonato de Sodio Residual (CSR) y Porcentaje de Sodio Posible (PSP).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calidad agronómica del agua

Los resultados obtenidos de los análisis, muestran valores que caracterizan al agua como condicionadas para uso agrícola (Cuadro 2).

Los datos del cuadro anterior muestran una tendencia descendente en la conductividad eléctrica en los tres puntos de muestreo y en los dos periodos, observando el valor más alto en el influente y el más bajo en la Compuerta el Potrero, pese a ello los valores resultantes son indicativos de problemas de salinidad. En el muestreo del periodo de lluvia las sales disueltas también sufren un decremento, ya que la conductividad eléctrica es un parámetro regido por el

RESULTS AND DISCUSSION

Agronomic quality of water

The results obtained from the analyses show values that characterize water as conditioned for agricultural use (Table 2).

The data from Table 2 show a descending trend in electric conductivity in the three sampling points and in the two periods, showing the highest value in the inflow and the lowest in the Potrero Floodgate, and despite this, the resulting values are indicative of salinity problems. In the sample from the rainy period, the dissolved salts also suffer a decrease, since electric conductivity is a parameter ruled by the content of salts (Alcántar *et al.*, 1992). When traveling around 4 km until reaching the first floodgate, the water suffers decreases due to processes of auto-depuration, which are a set of

Cuadro 2. Parámetros fisicoquímicos de los muestreos, periodos: seco y lluvia.

Table 2. Physicochemical parameters of the samples, periods: dry and rainy.

| Parámetro | Muestreos | | | | | | PR |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------|
| | I | | E | | CP | | |
| | 1 S** | 2LL*** | 1 S** | 2LL*** | 1 S** | 2LL*** | |
| CE $\mu\text{mhos cm}^{-1}$ | 1030.00 | 1040.00 | 960.00 | 900.00 | 780.00 | 360.00 | 100 a 250 |
| pH (Unidades) | 8.02 | 8.87 | 7.64 | 8.7 | 7.49 | 8.23 | 6-8.4 |
| Ca ²⁺ (me L ⁻¹) | 4.24 | 2.17 | 4.06 | 1.98 | 2.86 | 0.98 | <1 |
| Mg ²⁺ (me L ⁻¹) | 1.93 | 3.49 | 1.29 | 3.2 | 1.85 | 1.64 | <0.4 |
| K ⁺ (me L ⁻¹) | 0.5 | 0.16 | 0.45 | 0.13 | 0.27 | 0.03 | <0.05 |
| Na ⁺ (me L ⁻¹) | 3.17 | 3.5 | 4.04 | 3.15 | 2.9 | 1.28 | <3 |
| Σ cationes | 9.84 | 9.32 | 9.84 | 8.46 | 7.88 | 3.93 | |
| CO ₃ ²⁻ (me L ⁻¹) | 1.24 | 0 | 0.5 | 0 | 0.25 | 0 | <0.02 |
| Cl ⁻ (me L ⁻¹) | 2.17 | 2.51 | 2.39 | 2.26 | 1.18 | 3.1 | <1 |
| HCO ₃ ⁻ (me L ⁻¹) | 4.97 | 7.52 | 4.44 | 5.83 | 3.77 | 0.75 | <0.1 |
| SO ₄ ²⁻ (me L ⁻¹) | 1.86 | 0.44 | 1.51 | 0.21 | 1.31 | 0.02 | <0.40 |
| Σ aniones (me L ⁻¹) | 10.24 | 10.48 | 8.84 | 8.38 | 6.51 | 3.87 | |
| CO ₃ ²⁻ + HCO ₃ ⁻ (%) | 60.64 | 39.8 | 55.88 | 47.35 | 61.69 | 73.23 | <20 |
| SP | 3.09 | 2.73 | 1.51 | 2.36 | 1.83 | 0.76 | <3 |
| RAS | 1.8 | 2.08 | 2.46 | 1.95 | 1.88 | 1.12 | 0-10 |
| SE | 4.07 | 4.81 | 3.49 | 3.11 | 1.79 | 1.25 | <3 |
| PSP | 77.95 | 72.70 | 115.76 | 101.29 | 161.5 | 102.1 | <50% |
| CSR* | 0.04 | 1.86 | -0.41 | 0.64 | 0.70 | 0.48 | <1.25 |
| RAS & CE | C3 S1 | C3 S1 | C3 S1 | C3 S1 | C3 S1 | C2 S1 | C1 S1 |
| Clasificación del agua para riego | Condicionada | Condicionada | Condicionada | Condicionada | Condicionada | Condicionada | Buena |

*Cuando la diferencia es negativa, no existe el problema y el valor de CSR puede suponerse igual a 0, **S: muestreo en periodo seco, ***LL: muestreo en periodo de lluvia. ♦ *When the difference is negative, the problem does not exist and the value of RCS can be assumed to be equal to 0, **S: sampling in the dry period, ***LL: sampling in the rainy period.

I: Influyente; E: Efluente; CP: Compuerta el Potrero, PR: Parámetros recomendados (Ayers y Westcot, 1976). ♦ I: Inflow; E: Outflow; CP: Potrero Floodgate, PR: Parameters recommended (Ayers and Westcot, 1976) (Initials based on Spanish terms).

contenido de sales (Alcántar *et al.*, 1992). El agua al recorrer alrededor de 4 km hasta llegar a la primera compuerta, sufre decrementos debido a los procesos de autodepuración, que es un conjunto de fenómenos físicos, químicos y biológicos, que tienen lugar en el curso del agua de modo natural y que provocan la destrucción de materias extrañas incorporadas a un cuerpo de agua (Renovato *et al.*, 2015), además del proceso de dilución a causa del agua de lluvia.

Con relación al pH puede observarse que los valores se encuentran dentro del rango permisible, en el caso específico del agua de riego, fluctúa entre 6.0 y 8.4 unidades. El pH resultó más bajo en el periodo seco que en el periodo de lluvia en los muestreos; entre sitios de muestreo se presentaron decrementos.

En el muestreo de la estación seca, algunos factores como el Ca^{2+} y K^+ presentan concentraciones descendentes del influente al punto de la compuerta; el Mg^{2+} tuvo un comportamiento distinto, en el influente se encuentra la mayor concentración y la menor en el efluente de la PTAR, en el punto de la compuerta aumenta nuevamente; el Na^+ presenta la mayor concentración en el efluente y disminuye en la compuerta, por el contrario en el periodo de lluvia la concentración de iones Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ , es mayor la concentración en el influente y menor en el punto de la compuerta a consecuencia del proceso de autodepuración, añadiendo que las plantas acuáticas con que interacciona el agua, absorben algunos componentes en forma de nutrientes, causando un decremento de estos iones (Renovato *et al.*, 2015) y tomando en consideración que la lluvia es un factor que interviene en la concentración de sales (Acevedo *et al.*, 2005).

En el caso de los aniones CO_3^{2-} , HCO_3^- y SO_4^{2-} los resultados en ambos periodos, muestran que la concentración disminuye posterior al tratamiento del agua residual, encontrándose el valor más bajo en el punto de la compuerta.

En Cl^- se observa el valor más alto en el efluente de la PTAR, esto se atribuye a que la etapa final del proceso de tratamiento es la cloración, excepto en el punto de la compuerta del segundo muestreo incrementa su valor. Este valor debe considerar el recorrido de agua, ya que pueden existir factores no contemplados que elevan estos valores.

Con los resultados obtenidos se determinaron los factores de salinidad con la finalidad de clasificar el agua de riego con base en la conductividad eléctrica (CE) y la relación de adsorción de sodio (RAS), para

physical, chemical and biological phenomena that take place naturally in the course of the water and which provoke the destruction of foreign material incorporated to a water body (Renovato *et al.*, 2015), in addition to the dilution process because of rain water.

With relation to pH, it can be observed that the values are within the permissible range which, in the specific case of irrigation water, fluctuates between 6.0 and 8.4 units. The pH was lower in the dry period than in the rainy period in the samples; between sampling sites, there were decreases.

In the sample from the dry season, some factors such as Ca^{2+} and K^+ showed decreasing concentrations of the inflow to the floodgate point; Mg^{2+} had a different behavior, in the inflow there is higher concentration and the lowest in the outflow from the RWTP, while it increases in the floodgate point again; Na^+ shows the highest concentration in the outflow and decreases in the floodgate, and on the contrary in the rainy period the concentration of Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ and Na^+ ions is higher in the inflow and lower in the floodgate point as consequence of the process of auto-depuration, adding that the aquatic plants with which water interacts absorb some components in the form of nutrients, causing a decrease of these ions (Renovato *et al.*, 2015), and taking into consideration that rain is a factor that intervenes in the concentration of salts (Acevedo *et al.*, 2005).

In the case of anions CO_3^{2-} , HCO_3^- and SO_4^{2-} the results in both periods show that the concentration decreases after treatment of residual water, with the lowest value present in the floodgate point.

The highest value in Cl^- is seen in the outflow of the RWTP, which is attributed to the final stage of the treatment process being chlorination, except in the floodgate point of the second sample where it increases its value. This value should consider the water's path, since there can be factors that are not contemplated which increase these values.

With the results obtained, the factors of salinity have been determined with the aim of classifying irrigation water based on electrical conductivity (EC) and sodium adsorption rate (SAR), and for the three points sampled a classification C3S1 was found. Valencia *et al.* (2012), in a similar study performed in Colombia for the exploitation of

los tres puntos muestreados se registró una clasificación C3S1. Valencia *et al.* (2012), en un estudio similar realizado en Colombia para el aprovechamiento de aguas residuales tratadas, en la producción de cacao, encontraron el agua del efluente con una clasificación de C2S1, pero de igual manera establecen que existe riesgo de salinidad en el mediano plazo. Mencionan que el agua tratada aportó 839 kg año^{-1} P, suficiente para abastecer el cultivo y 958 kg año^{-1} de materia seca proveniente de lodos, disminuyendo así los costos por fertilizantes. Consideran que la clase C2S1 es de buena calidad para regar cacao, pero existe peligro de salinización medio y de alcalinización bajo, por lo que puede salinizar los suelos, si no se aplican prácticas de manejo adecuadas al cultivo y al suelo.

Según Palacios y Aceves (1994), el agua de tipo C3 es un agua de salinidad alta. No puede usarse en suelos con drenaje deficiente. Aún con drenaje adecuado se pueden necesitar prácticas especiales para el control de la salinidad, debiéndose seleccionar plantas muy tolerantes a las sales. La conductividad está comprendida entre 750 y $2250 \mu\text{mhos cm}^{-1}$ a 25°C . Los resultados obtenidos en los tres puntos muestreados se encuentran entre 780 y $1030 \mu\text{mhos cm}^{-1}$ lo que indica que el agua presenta salinidad alta para el primer periodo de muestreo, algo similar ocurre en el segundo periodo donde se obtiene valores de C. E. en influente de $1040 \mu\text{mhos cm}^{-1}$ y en efluente de 900 , con la misma tendencia, agua con salinidad alta, lo que indica que el agua presenta riesgo de salinizar los suelos por su alto contenido de sales disueltas.

La clasificación S1 es un indicativo de agua con bajo contenido en sodio. Los valores de RAS recomendados están comprendidos entre 0 y 10, pueden usarse para el riego en la mayoría de los suelos con pocas posibilidades de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. Con respecto a los valores de SP la calidad del agua en el influente es "Condicionada" y para el efluente y punto de riego es "buena", SE para el efluente e influente es condicionada y para el punto de riego es buena, RAS es bajo para los tres puntos de muestreo, CSR es bueno para los tres puntos, PSP y Cl^- los valores obtenidos clasifican al agua como condicionada. Resultados similares encontraron Bonilla *et al.* (2015) en un estudio realizado en las unidades de riego con aguas residuales de la presa Valsequillo en Puebla, México.

En ambos muestreos los resultados obtenidos en efluente son similares a los reportados por Rodríguez

trated residual waters in the production of cacao, found the water with a classification of C2S1, although they also establish that there is a risk of salinity in the medium term. They mention that the treated water contributed $839 \text{ kg}\cdot\text{year}^{-1}$ P, enough to supply the crop, and 958 kg year^{-1} of dry matter from sludge, thus decreasing the costs from fertilizers. They consider that class C2S1 is of good quality to irrigate cacao, but there is danger of medium salinization and low alkalization, so it can salinize the soils if adequate management practices are not applied to the crop and to the soil.

According to Palacios and Aceves (1994), type C3 water is high salinity water. It cannot be used in soils with deficient drainage. Even with adequate drainage, special practices may be needed to control salinity, and plants that are very tolerant to salts should be selected. The conductivity is comprised between 750 and $2250 \mu\text{mhos cm}^{-1}$ at 25°C . The results obtained in the three points sampled are between 780 and $1030 \mu\text{mhos cm}^{-1}$ indicating that the water presents high salinity for the first sampling period; something similar happens in the second period where CE values of $1040 \mu\text{mhos cm}^{-1}$ are obtained in the inflow and in the outflow of $900 \mu\text{mhos cm}^{-1}$, with the same trend, high salinity water, indicating that the water presents risks of salinization of soils due to its high content of dissolved salts.

The S1 classification is an indication of water with low sodium content. The SAR values recommended are comprised between 0 and 10, and can be used for irrigation in most of the soils with low possibilities of reaching dangerous levels of exchangeable sodium. Regarding the PS values, the water quality in the inflow is "Conditioned" and in the outflow and irrigation point it is "good"; SE for the outflow and inflow is conditioned and for the irrigation point it is good; SAR is low for the three sampling points, RCS is good for the three points; and the values of PSP and Cl^- obtained classified water as conditioned. Similar results were found by Bonilla *et al.* (2015) in a study carried out in the irrigation units with residual waters from the Valsequillo Dam in Puebla, Mexico.

In both samples the results obtained in the outflow are similar to those reported by Rodríguez *et al.* (2009), in a study carried out in San Luis Potosí on residual waters treatment plants of urban origin,

et al. (2009), en un estudio realizado en San Luis Potosí a plantas de tratamiento de aguas residuales de origen urbano, al igual a los encontrados por Pérez *et al.* (2016), donde los valores de RAS indican que el agua no muestra riesgo de sodicidad. Mientras que los índices de CE, SE, SP, CSR y RAS son más elevados que los encontrados en este estudio.

Efecto de las sales en el suelo

Con los datos obtenidos se calcularon las sales totales (ST) incorporadas al suelo. Considerando que cada mm de riego equivale a 10 m³ ha⁻¹ o 10 000 L ha⁻¹ (Prieto, 2008), se multiplicó las sales totales por la cantidad de agua de riego como se observa en el Cuadro 3.

Para el primer muestreo, por cada mm de riego se adicionan al suelo 5.561 kg ha⁻¹ de sales, en el segundo muestro 3.4828 kg ha⁻¹ en apariencia podría decirse que es pequeña la cantidad. Por citar algunos ejemplos: el maíz requiere una lámina de riego neta de 670 mm (CONAGUA, 2015), se estima un total de 3.7 y 2.3 toneladas por hectárea respectivamente de acumulación de sales, en el caso de frijol se requiere una lámina neta de 330 mm (CONAGUA, 2015) estimado un total de 1.8 y 1.1 toneladas de acumulación de sales por hectárea. Lo anterior pone en evidencia que los riesgos de salinización del suelo a mediano plazo son inminentes si se continúa mezclando el agua tratada con el agua residual del río Cantarranas y utilizándose para el riego agrícola.

the same as those found by Pérez *et al.* (2016), where values of SAR indicate that the water does not show risk of sodicity. Meanwhile, the indexes CE, ES, PS, RCS and SAR are higher than those found in this study.

Effect of salts in the soil

With the data obtained, total salts (TS) incorporated to the soil were calculated. Considering that each mm of irrigation is equivalent to 10 m³ ha⁻¹ or 10 000 L ha⁻¹ (Prieto, 2008), the total salts are multiplied by the amount of irrigation water, as observed in Table 3.

For the first sample, 5.561 kg ha⁻¹ of salts are added to the soil for each mm of irrigation, in the second sample 3.4828 kg ha⁻¹ in appearance could be said is a small amount. To cite some examples: maize requires a net irrigation sheet of 670 mm (CONAGUA, 2015), a total of 3.7 and 2.3 tons per hectare, respectively, are estimated in accumulation of salts, in the case of bean a net sheet of 330 mm is required (CONAGUA, 2015), with a total estimate of 1.8 and 1.1 tons of accumulation of salts per hectare. This shows that the risks of salinization in the soil in the medium term are imminent if the treated water continues to be mixed with the residual water from the Cantarranas River and using it for agricultural irrigation.

Cuadro 3. Salinidad potencial.
Table 3. Potential salinity.

| | | Cationes (mg/L) | | Aniones (mg/L) | |
|--------------------------|------------------|---------------------------|--|-------------------------------|---------|
| Muestreo 1 | Ca ²⁺ | 57.2 | | Cl ⁻ | 42 |
| | Mg ²⁺ | 22.5 | | HCO ₃ ⁻ | 305 |
| | Na ⁺ | 66.6 | | SO ₄ ²⁻ | 62.8 |
| | Suma | 146.3 | | | 409.8 |
| | Sales totales | 556.1 | | mg L ⁻¹ | |
| Sales incorporadas= ST*R | | 0.5561 | | g L ⁻¹ | |
| | | 5.561 g ha ⁻¹ | | 5.561 kg ha ⁻¹ | |
| | | Cationes (mg/L) | | Aniones (mg/L) | |
| Muestreo 2 | Ca ²⁺ | 19.63 | | Cl ⁻ | 26.786 |
| | Mg ²⁺ | 19.934 | | HCO ₃ ⁻ | 251.524 |
| | Na ⁺ | 29.503 | | SO ₄ ²⁻ | 0.912 |
| | Suma | 69.067 | | | 279.22 |
| | Sales totales | 348.28 | | mg L ⁻¹ | |
| Sales incorporadas= ST*R | | 0.34828 | | g L ⁻¹ | |
| | | 3.4828 g ha ⁻¹ | | 3.4828 kg ha ⁻¹ | |

Fuente: elaboración propia. ♦ Source: Prepared by authors.

CONCLUSIONES

El objetivo del estudio fue evaluar la calidad del agua tratada y valorar su uso en la producción de productos agrícolas. En general el agua tratada no tiene la calidad para usarse en el riego agrícola y se clasifica como condicionada (C3S1 y C2S1).

La calidad agronómica del agua residual y residual tratada utilizada para riego agrícola está condicionada (relación RAS y CE) por presentar las siguientes características: en el influente (agua residual cruda) los valores observados de CE son altos, al igual los índices de SP, SE, PSP y Cl^{-1} , existen riesgos de salinidad en suelos. En el efluente los índices: CE, SE, SP, PSP, Cl^{-1} , también son altos. En el punto de la compuerta (entrada a la zona de riego) presenta valores altos de CE, al igual que los índices de PSP, Cl^{-1} . Todos los puntos muestreados presentan baja sodicidad pero riesgos de salinización.

Si se continúa con el uso del agua residual tratada mezclada con agua residual que conduce el río Cantarranas, a mediano y largo plazo existe una tendencia a la salinización de los suelos agrícolas.

NOTAS

⁴Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas. (SEMARNAT, 1997). ♦ **The waters of varied composition** from municipal, industrial, commercial, service, agricultural, livestock discharges, and domestic uses, including residential developments, and in general from any other use, as well as a mixture of them (SEMARNAT, 1997).

⁵Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. ♦ **Which establishes the maximum limits permissible of contaminants in the discharges of residential residual waters and national property.**

⁶Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. ♦ **Which establishes the maximum limits permissible of contaminants in the discharges of residual waters to the urban or municipal sewage systems.**

CONCLUSIONS

The objective of the study was to evaluate the quality of the treated water and to assess its use in the production of agricultural products. In general, the treated water does not have the quality to be used in agricultural irrigation and is classified as conditioned (C3S1 and C2S1).

The agronomic quality of the residual and treated residual water used for agricultural irrigation is conditioned (SAR rate and EC) by presenting the following characteristics: in the inflow (raw residual water) the EC values observed are high, the same as the PS, ES, PSP and Cl^{-1} , and there are risks of salinity in the soils. In the outflow, the indexes EC, ES, PS, PSP and Cl^{-1} are also high. In the floodgate point (entry to the irrigation zones), there are high values of EC and also of indexes PSP, Cl^{-1} . All the points sampled show low sodicity but risks of salinization.

If the use of treated residual water mixed with residual water that leads to the Cantarranas River continues, in the medium and long term there is a trend toward salinization of agricultural soils.

—End of the English version—



⁷Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. ♦ **Which establishes the maximum limits permissible of contaminants for treated residual waters that are reused in public services.**

⁸Protección ambiental. -Lodos y biosólidos. -Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. ♦ **Environmental protection. -Sludge and biosolids. -Specifications and maximum limits permissible of contaminants for their use and final disposal.**

⁹Titular de la PTAR Atlixco, 2016. ♦ **Leader of the PTAR Atlixco, 2016.**

LITERATURA CITADA

Acevedo, M. A., Garrido P. C., Nebot S. E., y Sales M. D. 2005. Fenómenos de dilución y autodepuración de un vertido de aguas residuales urbanas en un ecosistema litoral: El caso del estuario

- del Río Iro (suroeste de España). *Ciencias Marinas*, 31(1B): 221–230. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/ciema/v31n1b/v31n1ba9.pdf>, consultado el 13 de diciembre de 2018.
- Alcántar, G. G., Etchevers B. J. D., y Aguilar S. A. 1992. Los análisis físicos y químicos. Su aplicación en agronomía. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados, México.
- Alexandratos, N. 1995. Agricultura mundial hacia el año 2010: estudio de la FAO. Food & Agriculture Org.
- AQUASTAT-FAO. 2015. Disponible en: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/MEX/Tables.htm.
- Ayers, R. S., y Westcot, D. W. 1976. Water quality for agriculture. Irrigation and Drainage. Paper No. 29. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). Rome, Italy.
- Bonilla y F. M. N., Ayala O. A. I., González C. S., Santamaría J. J. D., y Silva G. S. E. 2015. Calidad físicoquímica del agua del distrito de riego 030 Valsequillo para riego agrícola. *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*. Vol. 2 (4): 29 p.
- Castellanos, J. Z., Uvalle B. J. X., y Aguilar S. A. 2000. Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas. Segunda edición. Instituto Nacional de Capacitación (INCAPA). Guanajuato, México.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). 2016. Portal de Geoinformación. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2015. Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego Año Agrícola 2013-2014, Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGIH-6-15.pdf>, consultado el 09 de octubre de 2016.
- Esteller, M. V. 2002. Vulnerabilidad de acuíferos frente al uso de aguas residuales y lodos en agricultura. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, No. 2, p. 103-113.
- GOOGLE EARTH. 2018. Google-INEGI. Disponible en: <https://www.google.com.mx/maps/place/Atlixco,+PUE/@18.9029768,-98.423099,3883m/data=!3m1!1e3!4m2!3m1!1s0x85cfb3eee015f935:0x5c4b12a3f9f700e7>, consultado el 15 de noviembre de 2018.
- Guadarrama, B. M. E., y Galván F. A. 2015. Impacto del uso de agua residual en la agricultura. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 4(7): 1-23.
- Hendricks, D. 2010. Fundamentals of water treatment unit processes: physical, chemical, and biological. CRC Press. New York. p. 927.
- HLPE (High Level Panel of Experts). 2015. Water for food security and nutrition. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security, Rome 2015. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-av045e.pdf>, consultado el 13 de diciembre de 2018.
- Marín, O. A., y Osés P. M. 2013. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales con el proceso de lodos activados. Tomo I. Manual de procedimientos. DOP-CEA Jalisco, Gobierno de Jalisco. p. 244.
- Ontiveros, C. R. E., Diakite D. L., Álvarez S. M. E., y Coras M. P. M. 2013. Evaluación de aguas residuales de la ciudad de México utilizadas para riego. *Tecnología y Ciencias del Agua*, IV(4): 127-140.
- Palacios, O., y Aceves E. 1994. Instructivo para el muestreo, registro de datos e interpretación de la calidad del agua para riego agrícola. Centro de Hidrociencias. Colegio de Postgraduados. Ciencias Agrícolas. Montecillo, Estado de México.
- Pérez, D. J. P., Peña C. E., López C. R., y Hernández T. I. M. 2016. Metales pesados y calidad agronómica del agua residual tratada. *Idesia (Arica)*, 34(1): 19-25. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292016000100003>.
- Prieto, D. 2008. Riego con aguas salinas y aguas de drenaje, control de impacto de salinidad. Jornadas sobre Ambiente y Riegos: Modernización y Ambientalidad. La Antigua (Guatemala), 11 al 14 de agosto de 2008, Red Riegos, CYTED y AECID.
- Renovato, T. Y. A., Wakida F. T., García F. E., y Pastrana C. M. A. 2015. Evaluación del impacto de la canalización del arroyo Alamar en la calidad de agua de su acuífero subyacente. *Ingeniería*, 19(1): 13-23.
- Reynoso, F. L. A., Solorio T. J. I., Sánchez J. J., y Figueroa D. M. 2009. Sistema de indicadores ambientales del estado de Aguascalientes. Aguascalientes, México: Gobierno del Estado de Aguascalientes e Instituto del Medio Ambiente. p. 52.
- Rodríguez, O. J. C., García H. J. L., Valdez C. R. D., Lara M. J. L., Rodríguez F. H., y Loredo O. C. 2009. Calidad agronómica de efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(3): 355-367.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 1997. Normas Oficiales Mexicanas: NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997. SEMARNAT-CONAGUA, México, D. F.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2003. Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, México, D. F.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2017. Numeragua, México, 2017. SEMARNAT, Comisión Nacional del Agua, México. Disponible en: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/Numeragua_2017.pdf, consultado el 13 de diciembre de 2012.
- Silva, J., Torres P., y Madera C. 2008. Reuso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 26(2): 347-359.
- UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 2015. Iniciativa Internacional sobre la Calidad del Agua. Para la promoción de la investigación científica, el intercambio de conocimientos y enfoques tecnológicos y normativos eficaces a fin de mejorar la calidad del agua con miras al desarrollo sostenible. UNESCO, Programa Hidrológico Internacional. París, Francia. Disponible en: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000243651_spa, consultado el 13 de diciembre de 2018.
- 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.). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 15 (1): 77 – 86.
- Winpenny, J., Heinz I., y Koo-Oshima S. 2013. Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos? Informe sobre temas hídricos (35), FAO, Roma. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/017/i1629s/i1629s.pdf>, consultado el 13 de diciembre de 2018.
- WWAP (Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos)/ONU-Agua. 2018. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua. París, UNESCO.