



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ÁRIDAS

## APORTE NUTRIMENTAL DE AGUA RESIDUAL TRATADA EN MAÍZ FORRAJERO (*Zea mays L.*)

### TESIS

Que como requisito parcial para  
Obtener el título de

**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES  
Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS**

**PRESENTA:**

**ABIGAIL GUERRERO GUZMÁN**

**DIRECTOR:**

**DR. RICARDO TREJO CALZADA**



DIRECCION GENERAL ACADEMICA  
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES  
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

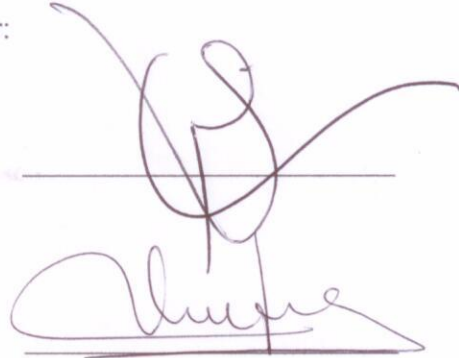


**BERMEJILLO, DURANGO, MEXICO MAYO DEL 2016**

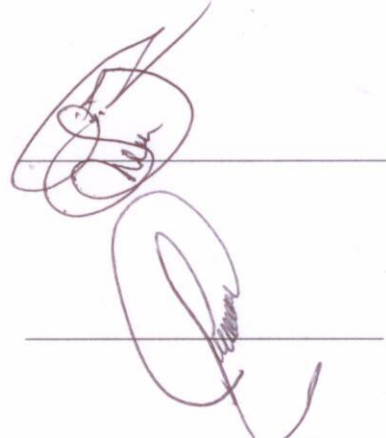
La presente tesis de maestría titulada “**APORTE NUTRIMENTAL DE AGUA RESIDUAL TRATADA EN MAIZ FORRAJERO (*Zea mays* L.)**” realizada por la Ing. Abigail Guerrero Guzmán bajo la dirección del Dr. Ricardo Trejo Calzada y Dr. Uriel Figueroa Viramontes, ha sido revisada y aprobada por el Comité Asesor como requisito parcial para obtener el grado de: **Maestro en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas.**

Comité Asesor:

**Director:** Dr. Ricardo Trejo Calzada

Handwritten signature of Ricardo Trejo Calzada in blue ink, written over a horizontal line.

**Co-director:** Dr. Uriel Figueroa Viramontes

Handwritten signature of Uriel Figueroa Viramontes in blue ink, written over a horizontal line.

**Asesor:** M.C. María del Rosario Jacobo Salcedo

Handwritten signature of María del Rosario Jacobo Salcedo in blue ink, written over a horizontal line.

**Asesor:** M.C. José Ramón Hernández Salgado

Handwritten signature of José Ramón Hernández Salgado in blue ink, written over a horizontal line.

**Asesor:** Dr. Jesús Guadalupe Arreola Ávila

Handwritten signature of Jesús Guadalupe Arreola Ávila in blue ink, written over a horizontal line.

**Asesor externo:** Dr. Ricardo Mata González

Handwritten signature of Ricardo Mata González in blue ink, written over a horizontal line.

## **DATOS BIOGRÁFICOS**

El presente trabajo fue realizado por Abigail Guerrero Guzmán, Ingeniero en Sistemas Agrícolas de Zonas Áridas, egresada de la Unidad Regional Universidad de Zonas Áridas perteneciente a la Universidad Autónoma Chapingo (URUZA-UACH), en la generación 2008-2013.

Los estudios de maestría los realizo en el programa de Recursos Naturales y Medio Ambiente de Zonas Áridas en la Unidad Regional Universidad de Zonas Áridas perteneciente a la Universidad Autónoma Chapingo (URUZA-UACH), generación 2014-2015. Dentro de este periodo realizó una estancia de investigación en Oregon State University (OSU), Estados Unidos. Durante el período de agosto-octubre del 2015. En la cual desarrollo trabajo de investigación referente a las aguas residuales.

## AGRADECIMIENTOS

*Por darme una segunda oportunidad y permitirme experimentar un proyecto más en la vida, en el que aprendí de mis aciertos y errores, pero sobre todo por permitirme probarme a mí misma, Gracias Jehová.*

*A mi familia por su apoyo, por siempre estar animándome en cada momento bueno o difícil.*

*A la universidad Autónoma Chapingo, por la oportunidad, el apoyo y las anécdotas, gracias infinitas por brindarme la mejor de las experiencias: el aprendizaje.*

*Agradezco al Dr. Ricardo Trejo Calzada, por la confianza, por todo su apoyo, por todos los consejos y conocimiento aportado a lo largo de este periodo y en la realización de este proyecto.*

*Mi sincero agradecimiento al Al Dr. Uriel Figueroa Viramontes y la MC. María del Rosario Jacobo Saucedo, por brindarme la confianza en la realización de este proyecto, por todo lo aprendido y por el apoyo y facilidades brindadas en el uso las instalaciones del INIFAP.*

*A Dr. Ricardo Mata González, por las facilidades en la realización de mi estancia de investigación, por brindarme su consejo y apoyo, como profesor y como amigo.*

*A la familia: Holguín y Mejía por apoyarme durante este tiempo, por brindarme su confianza y amistad.*

## DEDICATORIAS

*A mi familia.* Aquilino y Catalina, no pude tener mejores padres, a mis hermanos: Eduardo, Carlos, Flor y Daniel, los amo, gracias por apoyarme, cada uno a su manera y momento, por siempre estar ahí a pesar de las diferencias, distancia y el tiempo, gracias por sus mensajes, por sus regaños, por su paciencia, por todo lo enseñado.

*A mi alma mater.* Universidad Autónoma Chapingo, por estos hermosos años.

*A mi familia Chapinguera.* Especialmente a mis huastecos del pacífico (Nora, Rafa, Pedro, Charly, Cheo y Tere). Por probarme que la amistad supera el tiempo y la distancia, gracias por todos los momentos y por todas sus porras.

*A mi comité asesor.* Gracias por todos sus aportes y apoyo a lo largo de este proyecto.

*A la familia Holguín.* Gracias por permitirme ser parte de su familia y por apoyarme durante este tiempo.

*A mis compañeros de posgrado.* Por su amistad y compañerismo, a lo largo de estos años.

*Agradezco especialmente al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo en estos dos años para realizar mi maestría, así como también para la realización de mi estancia de investigación. Y sobre todo por permitirme realizar este proyecto personal*

## CONTENIDO

<b>I.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.2.	Objetivo General.....	4
1.2.1.	Objetivos Específicos.....	4
1.3.	Hipótesis .....	5
<b>II.</b>	<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	6
2.1.	Importancia del agua.....	6
2.2.	Disponibilidad de agua en México.....	6
2.3.	Aguas potables .....	8
2.4.	Aguas residuales .....	8
2.4.1.	Aguas tratadas y aguas crudas .....	8
2.4.2.	Tipos de tratamientos .....	9
2.4.3.	Usos .....	9
2.5.	Calidad de las aguas residuales.....	11
2.6.	Normatividad de aguas residuales en México.....	12
2.7.1.	Aporte nutrimental .....	15
2.7.2.	Desventajas .....	16
<b>2.8.</b>	<b>Acuíferos sobreexplotados</b> .....	19
2.9.	Comarca Lagunera .....	22
2.9.1.	Clima.....	22
2.9.2.	Disponibilidad de agua para riego en la región.....	23
2.9.4.	Aguas residuales en la región.....	23
2.10.	Maíz forrajero .....	25
2.11.	Fertilizantes químicos .....	26
2.11.1.	Nitrógeno (N).....	29
2.11.2.	Fósforo (P) .....	30
<b>III.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	31
3.1.	Ubicación del sitio experimental.....	31
3.2.	Establecimiento del experimento .....	31

3.3. Diseño experimental .....	32
<b>IV. APOORTE NUTRICIONAL EN SUELO IRRIGADO CON AGUA RESIDUAL TRATADA Y CONVENCIONAL EN LA REGIÓN DE LA LAGUNA MÉXICO. ....</b>	<b>34</b>
<b>V. APOORTE NUTRIMENTAL EN MAÍZ FORRAJERO IRRIGADO CON AGUA RESIDUAL TRATADA Y DE POZO EN LA COMARCA LAGUNERA, MÉXICO. ....</b>	<b>47</b>
<b>VI. LITERATURA CITADA .....</b>	<b>60</b>



## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Límites máximo permisibles de contaminantes en aguas residuales tratadas, para su uso en suelo en base a la NOM-001-ecol-1996 .....	12
Cuadro 2.2. Normatividad existente en México con relación a las aguas residuales. ....	14
Cuadro 2.3. Clasificación, símbolo, forma absorbida y síntoma de deficiencia de los nutrimentos.....	28
Cuadro 3.1. Dosis de fertilización aplicadas en el experimento. ....	32
Cuadro 3.2. Variables analizadas y metodología utilizada. ....	33
Cuadro 4.1. Dosis de fertilización aplicadas.....	37
Cuadro 4.2. Caracterización de los dos tipos de agua utilizadas en el experimento.....	39
Cuadro 4.3. Caracterización de suelo antes del establecimiento del experimento.....	39
Cuadro 4.4. Probabilidades de significancia de propiedades químicas en suelo a tres profundidades (15, 30 y 60 cm) con dos tipos de agua de riego (AR y AP), y fertilización nitrogenada a 300 kg ha <sup>-1</sup> y fósforo a distintas dosis en parcelas sembradas con maíz forrajero.....	40
Cuadro 4.5. Probabilidades de significancia nitrógeno y fósforo en suelo a tres profundidades (15, 30 y 60 cm) con dos tipos de agua de riego (AR y AP), y fertilización nitrogenada a 300 kg ha <sup>-1</sup> y fosforada a distintas dosis en parcelas sembradas con maíz forrajero.....	41
Cuadro 4.6. Probabilidades de significancia de propiedades químicas en suelo a tres profundidades (15, 30 y 60 cm) con dos tipos de agua de riego (AR y A), y fertilización fosforada a 50 kg ha <sup>-1</sup> y nitrógeno a distintas dosis en parcelas sembradas con maíz forrajero.....	42
Cuadro 4.7. Probabilidades de significancia de nitrógeno y fósforo en suelo a tres profundidades (15, 30 y 60 cm) con dos tipos de agua de riego (AR y AP), y	

fertilización fosforada a 50 kg ha <sup>-1</sup> y nitrógeno a distintas dosis en parcelas sembradas con maíz forrajero. ....	44
Cuadro 4.8. Efectos en propiedades del suelo al aplicar diferentes tipos de fertilización. ....	44
Cuadro 5.1 dosis de fertilización aplicadas. ....	49
Cuadro 5.2. Caracterización de agua residual y de pozo utilizada en el experimento. ....	51
Cuadro 5.3. Caracterización del suelo antes del establecimiento del experimento. ....	51
Cuadro 5.4. Probabilidades de significancia de nutrientes analizados en la parte vegetativa y en granos, fertilizados con P 50 kg ha <sup>-1</sup> y dosis variables de nitrógeno. ....	52
Cuadro 5.5. Probabilidades de significancia de nutrientes analizados en la parte vegetativa y en granos, fertilizados con N 300 kg ha <sup>-1</sup> y dosis variables de fósforo. ....	54
Cuadro 5.6. Efectos en la asimilación de nutrientes al aplicar distintas dosis de fertilización. ....	57

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Evolución de la disponibilidad del agua en México ( $\text{m}^3 \text{ hab}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) 1975-2006.....	7
Figura 2.2. Presión antropogénica y acuíferos sobreexplotados en México.....	20
Figura 2.3. Distribución de zonas áridas y semiáridas en México. ....	21
Figura 2.4. Distribución del consumo nacional de granos.....	25
Figura 3.1.ubicación del sitio experimental e instalaciones del inifap cenid-raspa. ....	31
Figura 4.1 Efectos del tipo de agua aplicada sobre el pH, CE, $\text{HCO}_3$ y MO en suelo fertilizado con $300 \text{ kg ha}^{-1}$ y fósforo a distintas dosis, comparados con la muestra basal del suelo. AR= agua residual, AP= agua de pozo. Las letras a y b indican diferencias entre tipo de agua. ....	40
Figura 4.2. Efectos de tipo de agua en NT y P en suelo fertilizado con N a $300$ $\text{kg ha}^{-1}$ y P a distintas dosis, comparado con muestra inicial. AR= agua residual. AP= agua de pozo. ....	41
Figura 4.3. Efectos por tipo de agua aplicada en pH, CE, $\text{HCO}_3$ y MO en suelo fertilizado con P $50 \text{ kg ha}^{-1}$ y nitrógeno a distintas dosis, comparados con la muestra basal. AR= agua residual, AP= agua de pozo.. ....	43
Figura 4.4. Graficas de efectos por tipo de agua aplicada en NT y P en suelo fertilizado con P $50 \text{ kg ha}^{-1}$ y nitrógeno a distintas dosis, comparados con la muestra basal. AR= agua residual. AP= agua de pozo. ....	44
Figura 5.1. Efectos por tipo de agua en micronutrientes al aplicar fertilización de P $50 \text{ kg ha}^{-1}$ y dosis variables de nitrógeno.....	53
Figura 5.2. Efectos por tipo de agua en micronutrientes al aplicar fertilización de N $300 \text{ kg ha}^{-1}$ y dosis variables de fósforo. ....	55
Figura 5.3. Rendimiento en maíz forrajero (peso fresco) irrigado con distintas dosis de fertilización. Tratamientos comparados con una muestra testigo (N 00- P 00).....	56

## **Aporte nutrimental de agua residual tratada en maíz forrajero (*Zea mays*)**

### **Nutritional contribution of treatment wastewater in forage maize (*Zea mays*)**

<sup>1</sup>Abigail Guerrero Guzmán, <sup>2</sup>Ricardo Trejo Calzada, <sup>3</sup>Uriel Figueroa Viramontes, <sup>4</sup>María del Rosario Jacobo Salcedo

#### **RESUMEN**

La sobre-explotación del agua subterránea provoca su escasez y riesgos de contaminación. Estos se incrementan por el uso excesivo de fertilizantes. La reutilización de agua residual tratada puede ser una alternativa ecológica y económica porque además del ahorro de agua se puede reducir el uso de fertilizantes químicos. El objetivo de este estudio fue evaluar y comparar el aporte nutrimental de aguas tratadas y de pozo en la producción agrícola. Se estableció un diseño experimental en factorial incompleto con arreglo en parcelas divididas, con cuatro repeticiones. Los factores de variación fueron: tipo de agua (residual y pozo profundo), fósforo (0,50, 100 y 150 kg ha<sup>-1</sup>) y nitrógeno (0, 100, 200 y 300 kg ha<sup>-1</sup>). Los resultados obtenidos mostraron que el agua residual tuvo un aporte significativo (P <0.05) de nitrógeno en suelo respecto al agua de pozo, en tanto que para fósforo solo se registró un aporte mayor cuando se aplicaron dosis variables de Nitrógeno. La concentración de nitrógeno en la planta mostró diferencias no significativas. La concentración de fósforo fue significativamente mayor (P <0.05) con riego de agua de pozo. El rendimiento de forraje fue significativamente mayor (P<0.05) en plantas regadas con agua de pozo.

**Palabras clave:** nitrógeno, fósforo, Comarca Lagunera, agua residual.

#### **ABSTRACT**

Over-exploitation of groundwater water causes shortages and pollution risks. These risks may be increased by the excessive use of fertilizers. The reuse of treated wastewater is an ecological and economic alternative because, besides water savings, it can reduce the use of fertilizer. The objective of this study was to evaluate and compare the nutritional input of treated wastewater and well water in agricultural production. An incomplete factorial split-plot experimental design with four replications was established. Variation factors were: water type (wastewater and well water), phosphorus (0, 50, 100 and 150 kg ha<sup>-1</sup>) and nitrogen (0,100,200 and 300 kg ha<sup>-1</sup>). Results showed that wastewater had a significant nitrogen input (P <0.05) compared to well water, while the amount of phosphorus had a major nutritional input only when variable nitrogen doses were added. Nitrogen concentration in plant showed non-significant differences. Phosphorus concentration was significantly higher (P<0.05) in plants irrigated with well water. Forage yield was significantly higher (P<0.05) in plants watered with well water.

**Keywords:** nitrogen, phosphorus, Comarca Lagunera, wastewater.

<sup>1</sup>Tesista, <sup>2</sup>Director, <sup>3</sup>Co-Director, <sup>4</sup>Asesor

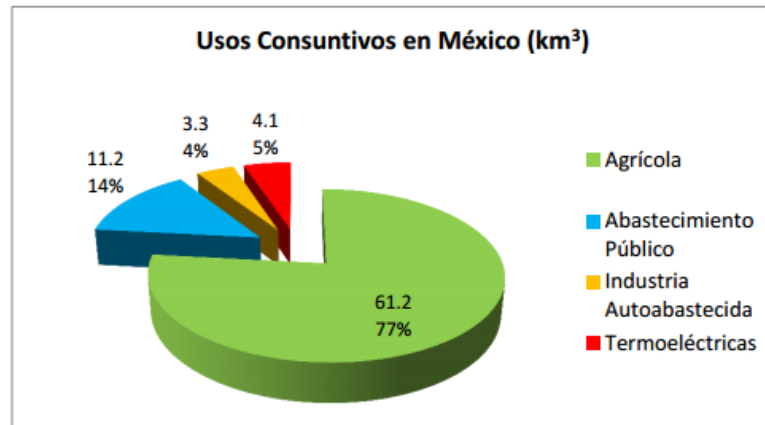
## I. INTRODUCCIÓN

El recurso agua es un factor limitante para la salud humana, así como también para la producción de alimentos, desarrollo industrial y la estabilidad económica. A pesar de que la mayor parte de la superficie de la tierra está cubierta por agua, con un volumen aproximado de 1 386 millones de km<sup>3</sup>, únicamente el 2.5% de ese volumen es agua dulce (Díaz, 2013). Además, la cantidad total de agua dulce superficial junto con la subterránea de todo el planeta es menor 1% del volumen total (Dudgeon, 2006; Beekman, 2014). Lo anterior implica que solamente 200 000 km<sup>3</sup> están disponibles para el consumo humano y el mantenimiento de los ecosistemas naturales (Guerrero, 2009).

Actualmente, el agua para uso en el riego agrícola en México requiere del 77% de toda el agua dulce destinada a consumo humano. Esta proporción como se aprecia en la Figura 1.1., es mayor a la empleada en otras actividades productivas (UNESCO, 2006; CONAGUA, 2011). Uno de los grandes retos en la seguridad alimentaria global es generar una producción agropecuaria sustentable (Hussain, 2015). Sin embargo, muchas regiones del mundo, al igual que México, están experimentando crecientes problemas de déficit en recursos hídricos. Esto es debido al crecimiento de la demanda de agua frente a unos recursos hídricos estáticos o en disminución y a las periódicas sequías agudizadas por el cambio climático.

En el ámbito agrícola se han probado diferentes métodos y tecnologías para hacer eficiente el uso del agua. Estas incluyen al riego por goteo y aspersión entre algunos que permiten menores gastos de agua en la producción de cosechas (García, 2007, Beekman, 2014). La

FAO propone el uso de aguas residuales tratadas para cultivar especies agrícolas, como estrategia para mitigar los problemas de escasez de agua (FAO, 2010).



**Figura 1. 1. Principales demandas de agua y porcentaje de uso en México (CONAGUA, 2010).**

El déficit del recurso hídrico también se produce por la contaminación provocada por las aguas residuales de ciudades en expansión y la contaminación de los acuíferos por diversas fuentes. Dicha contaminación del agua empeora los efectos de la escasez, al reducir la cantidad de agua segura para el consumo (De la Peña, 2013). Ello debido a que las aguas contaminadas solo son tratadas de manera parcial, y no llegan a tener la calidad para su empleo en los hogares. Además de los efectos directos, la escasez de agua en todos sus aspectos conlleva graves costos económicos, sociales e incluso políticos.

Un factor importante ante esta problemática es que México cuenta con 40 millones de m<sup>3</sup> de agua dulce renovable, la mayor disponibilidad se encuentra en el sur-este del país, mientras que en el centro y norte hay déficit de recursos hídricos. Debido a las actividades agropecuarias el deterioro de los mantos acuíferos ha comenzado a afectar la producción del norte de México. En el país existen 653 acuíferos, de los cuales 104 se encuentran

sobreexplotados, respecto a los volúmenes de agua concesionados para uso consultivo el 76.8% se destinó para riego agrícola (CONAGUA, 2007 y 2014).

La Comarca Lagunera es una región en donde desde hace más de 40 años la extracción del agua subterránea no es sustentable (Diaz, 2013). Ejemplo de esto es que la sobreexplotación del acuífero tan solo en 2002, fue de 480 millones de  $\text{hm}^3$  (CONAGUA, 2004).

La Comarca Lagunera, se caracteriza por ser la cuenca lechera más importante del norte del país. La región cuenta con aproximadamente 423,000 cabezas de ganado lechero, el cual demanda una producción de 1.2 millones  $\text{ton año}^{-1}$  (Figuroa, 2015). Los forrajes producidos tienen una demanda hídrica aproximada de 2,685.1  $\text{Mm}^3$ . La demanda de agua se satisface principalmente con agua del río Nazas y agua del subsuelo. Los altos volúmenes de agua extraída del subsuelo y la recarga insuficiente contribuyen restarle viabilidad a largo plazo a los sistemas de producción agrícolas y pecuarios de la región (Sánchez, 2014).

Por otra parte, la alta demanda de forrajes exige el empleo de sistemas de producción intensivos. Una de las características de estos sistemas es el empleo de grandes cantidades de fertilizantes. Frecuentemente las cantidades aplicadas de fertilizantes o abonos rebasan las necesidades nutrimentales de los cultivos. El exceso de fertilizantes puede ser una de las fuentes de contaminación de suelos y aguas (FAO, 2010; Loughheed, 2011). Además, ello implica la aplicación innecesaria de recursos económicos.

Las aguas residuales tratadas proporcionan un aporte nutrimental importante que generalmente consta de nitrógeno, materia orgánica así como diversos micronutrientes, los cuales en conjunto favorecen la nutrición de los cultivos disminuyendo de esta manera

la necesidad de la adición química de los mismos. Con lo cual, se logra disminuir los gastos de fertilización, teniendo una producción eficiente a costos menores.

La trascendencia en el manejo responsable y eficiente del agua residual tratada permite generar una opción favorable para los agricultores desde el punto de vista de costos tanto por menor uso de fertilizantes químicos, como por la disminución de costos en la extracción de agua subterránea, ya que el agua residual tiene un costo menor que el agua extraída del subsuelo. Lo anterior exige la necesidad de generar un sustento científico válido que proporcione certidumbre en cuanto al manejo y uso de agua residual tratada. Sin embargo, existe escasa documentación científica sobre la potencialidad nutrimental del agua residual tratada para la producción agrícola.

### **1.1.Objetivo General**

Evaluar la contribución nutrimental de agua residual tratada en un cultivo de maíz forrajero en la Comarca Lagunera.

#### **1.2.1. Objetivos Específicos**

- Comparar el rendimiento en maíz forrajero bajo diferentes dosis de fertilización y tipo de agua de riego.
- Determinar la disponibilidad nutrimental del suelo irrigado con agua tratada en comparación a agua de pozo.
- Evaluar la calidad del agua residual tratada en comparación con agua de pozo para riego agrícola



### **1.3. Hipótesis**

- Las aguas residuales tratadas aportan al suelo mayores cantidades de nutrientes que el agua de pozo.
- Los cultivos forrajeros irrigados con agua residual tratada tienen una mayor disponibilidad nutrimental que aquellos cultivos regados con aguas de pozo.
- Las aguas residuales producen mayores rendimientos con dosis bajas de fertilización.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Importancia del agua.

El agua es un recurso fundamental para el desarrollo de cualquier país, es el compuesto químico más abundante en el planeta y es indispensable para el desarrollo de la vida. El incremento de la población, la urbanización, la mejora en calidad de vida y el desarrollo económico, han conducido al incremento de los volúmenes de aguas residuales originadas por los sectores industriales, doméstico y comercial (Asano, 2007; CONAGUA, 2011).

El agua subterránea tiene distintos usos tales como, cubrir las demandas municipales y agrícolas, irrigar el paisaje y abastecer el agua requerida en los procesos industriales (Asano, 2004 (CONAGUA, 2011)); estas aguas representan entre el 25 y 40% del agua potable del mundo, sin embargo, la recarga del agua subterránea es muy lenta (Asano., 2007; Díaz, 2013).

Los acuíferos pueden suministrar agua aún bajo condiciones de largas temporadas sin lluvias, otro dato interesante sobre los acuíferos es que el 30% del total de agua dulce en la tierra se encuentra contenido en estos depósitos subterráneos. En México el agua subterránea cubre el 75% de las demandas de agua de las zonas urbanas (CONAGUA, 2012).

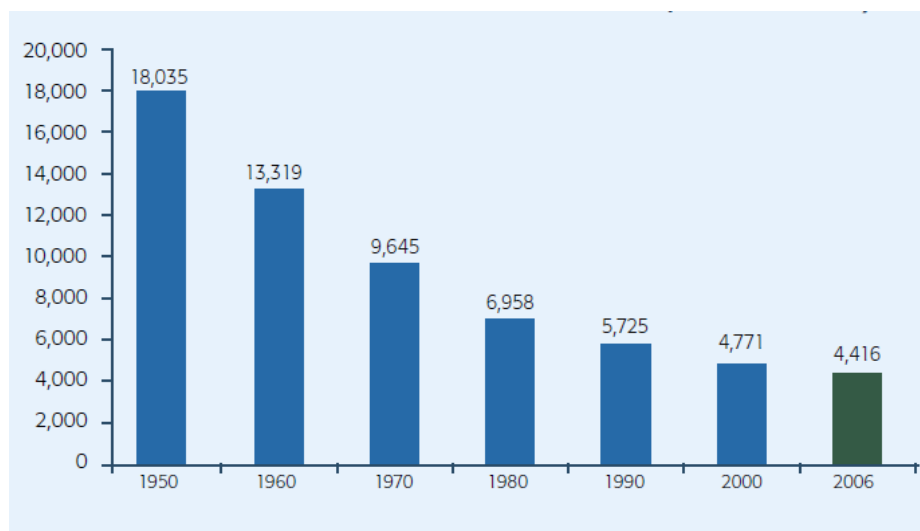
### 2.2 Disponibilidad de agua en México.

México es un país que recibe en promedio 1,489 miles de millones de m<sup>3</sup> de agua de lluvia. El promedio de precipitación es de 760 mm al año. Sin embargo, de este volumen sólo el 4.7% se infiltra en el subsuelo y recarga los acuíferos. En México, el sector más demandante de agua es el agrícola, en el cual se incluyen: los usos agrícola, acuícola y

pecuario. El sector agrícola en conjunto tiene un volumen concesionado de 61 800 millones de m<sup>3</sup> al año, del cual el 33.8% son extraídos de aguas subterráneas, el resto se obtiene de las corrientes de ríos y lagos y de la precipitación (CONAGUA, 2011).

En los acuíferos mexicanos se extrae un volumen total de 30.1 km<sup>3</sup> con el cual se abastecen los siguientes usos: agricultura (71%), abastecimiento público-urbano (20%), uso industrial (6%) y para uso doméstico y de abrevadero (3%) (CONAGUA, 2011).

Por otro lado, la disponibilidad del agua para consumo humano ha ido disminuyendo conforme al crecimiento poblacional. Un dato importante es que el mayor crecimiento poblacional y económico se ha generado en las zonas del país con menor disposición de agua, es decir en el centro y norte. En esta zona se cuenta con solo el 31% de la disponibilidad nacional y en ella habita el 77% de la población (CONAGUA, 2008). En la Figura 2 se puede observar que en el período de 1950 a 2006 la disponibilidad de agua per cápita en México se ha reducido prácticamente a la mitad (CONAGUA, 2007).



**Figura 2.1. Evolución de la disponibilidad del agua en México (m<sup>3</sup> hab<sup>año</sup>) 1975-2006. Fuente: Estadísticas del agua en México, CONAGUA, edición 2007.**

### 2.3 Aguas potables

El agua superficial, es por mucho la fuente más importante de abastecimiento para la población. Sin embargo, alrededor del 37% del volumen total concesionado para usos consultivos, provienen del agua subterránea (CONAGUA, 2011). Particularmente en México, el agua subterránea representa la única fuente permanente disponible para las zonas áridas y semiáridas, las cuales representan la mitad del territorio del país.

### 2.4 Aguas residuales

La Ley de Aguas Nacionales (2014) define agua residual (AR) a las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos público, urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento y en general, de cualquier uso, así como la mezcla de ellas. Esta misma Ley estipula que compete al ejecutivo federal el adoptar las medidas necesarias para el cumplimiento de acuerdos y convenios internacionales en materia de aguas, tomando en cuenta el interés nacional, regional y público. Para el año 2013 existían un total de 2 287 plantas de tratamiento de agua residual en México. Las cuales tienen una cobertura de 1059 m<sup>3</sup> s de caudal tratado en descargas de aguas residuales (CONAGUA, 2014).

En México se generan 6.7 miles de millones de m<sup>3</sup> de aguas residuales al año, en 2012 la cobertura nacional de tratamiento de aguas residuales fue de 47.5%, lo que representa el 52.5 % de las aguas colectadas (De la Peña, 2013).

#### 2.4.1 Aguas tratadas y aguas crudas

De acuerdo a la NOM-001-ECOL-1996, las AR se clasifican en: crudas o tratadas. Las primeras son las aguas residuales que se utilizan sin pasar por ningún tipo de tratamiento

o filtro. Las aguas residuales tratadas son aquellas que dependiendo de su uso u origen pasan por distintos procesos de tratamientos. Estos tratamientos pueden ser individuales o combinados de tipo físico, químicos, biológicos, entre otros. El tratamiento las acondicionan para hacerlas aptas para su reutilización en servicios al público.

#### 2.4.2 Tipos de tratamientos

Entre los distintos tratamientos conocidos se encuentran:

- **Lagunas de estabilización:** se basa de las condiciones naturales de depuración.
- **Lodos activados:** En el proceso de lodos activados los microorganismos son completamente mezclados con la materia orgánica en el agua residual de manera que ésta les sirve de alimento para su producción.
- **Filtros biológicos:** es un sistema mixto anaerobio y aerobio no forzado para la depuración de las aguas residuales.
- **Primario avanzado:** es para reducir aceites, grasas, arenas y sólidos gruesos. El afluente es filtrado en cámaras de rejillas para eliminar todos los objetos grandes que son depositados en el sistema de alcantarillado
- **Rafa o Uasb:** Son un tipo de bioreactor que operan en régimen continuo y en flujo ascendente, es decir, el afluente entra por la parte inferior del reactor, atraviesa todo el perfil longitudinal, y sale por la parte superior. Son reactores anaerobios. en los que los microorganismos se agrupan formando biogranulos.

#### 2.4.3 Usos

La reutilización de las aguas residuales depende del Límite máximo permisible (Valor o rango asignado a un parámetro, que no debe ser excedido por el responsable del suministro de agua residual tratada) establecido en la NOM-001-ECOL-1996 pueden destinarse a:

Riego no restringido: La utilización del agua residual destinada a la actividad de siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas en forma ilimitada como forrajes, granos, frutas, legumbres y verduras.

Riego restringido: La utilización del agua residual destinada a la actividad de siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas, excepto legumbres y verduras que se consumen crudas.

**Uso en servicios públicos con contacto directo.**- Es el que se destina a actividades donde el público usuario esté expuesto directamente o en contacto físico: llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en lancha, remo, fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego de parques y jardines, entre otros (SEMARNAT, NMX-AA-003-1980, 1997).

**Uso en servicios al público con contacto indirecto u ocasional.** Es el que se destina a actividades donde el público en general esté expuesto indirectamente o en contacto físico incidental y que su acceso es restringido, ya sea por barreras físicas o personal de vigilancia: riego de jardines y camellones en autopistas, camellones en avenidas, fuentes de ornato, campos de golf, lagos artificiales no recreativos, barreras hidráulicas de seguridad y peatones (NMX-AA-003-1980) .

**Uso público urbano,** es la utilización del agua residual tratada para abastecer centros de población o asentamientos humanos, destinada para el uso y consumo humano, con previa potabilización (NOM-001-ECOL-1996).

**Acuacultura:** Son las aguas dulces que se aprovechan para el cultivo de peces, langostines o ranas, mediante el uso de estanques construidos sobre las márgenes y alineados por

bombeo. En ocasiones se practican cultivos intensivos en jaulas flotantes, que se fijan sobre la corriente de los ríos y arroyos, o se anclan en las lagunas (Vidal, 2009).

**Recarga de acuíferos:** utilización del agua para atenuar efectos de sobreexplotación, como abatimiento de los niveles del agua, asentamientos del terreno o intrusión salina; das tratamiento natural al agua en el subsuelo; manejar los acuíferos como vasos de almacenamiento y regulación, y utilizar el subsuelo como una red de acueductos (CONAGUA, 2003)

**Uso en riego agrícola:** el agua destinada a este sector puede utilizarse en actividades de siembra, cultivo y cosecha y su preparación para la primera enajenación, siempre que los productos no hayan sido objeto de transformación industrial. El uso para esta actividad puede ser de dos maneras: restringido y no restringido (NOM-001-ECOL-1996, 1996).

- ✓ El riego restringido es la utilización del agua residual destinada para las mismas actividades que en el riego no restringido excepto en el caso de legumbre y verduras que se consuman crudas.
- ✓ El riego no restringido es la utilización de agua residual destinada a la actividad de siembra, cultivo y cosecha de productos agrícola en forma ilimitada como es el caso de forrajes, granos frutas, legumbres y verduras.

De acuerdo a los cultivos que se tienen autorizados dentro del riego no restringido se encuentran los forrajes los cuales se caracterizan por ser cultivos demandantes de agua.

## 2.5 Calidad de las aguas residuales.

Algunos componentes de las aguas residuales contribuyen en su toxicidad, esto ocurre durante los procesos biológicos de los tratamientos de la planta o durante el recibimiento del agua. Existen parámetros establecidos que determinan la calidad de las AR, los cuales

se encuentran en las normas oficiales. Los parámetros establecidos para evaluar las AR para uso en suelo se encuentran en el Cuadro 2.1.

**Cuadro 2.1. Límites máximo permisibles de contaminantes en aguas residuales tratadas, para su uso en suelo en base a la NOM-001-ecol-1996**

PARAMETRO	CONTAMINANTE	LIMITE PERMITIDO mg l <sup>1</sup>	
		P.D	P.M
Materia flotante		Ausente	Ausente
DBO		N.A	N.A
DQO		N.A	N.A
Grasas y aceites		15	25
Metales pesados	Arsénico	0.2	0.4
	Plomo	5	10
	Cadmio	0.05	1
	Cianuros	2	3
	Mercurio	0.005	0.01
	Níquel	2	4
Microorganismos		N.A	N.A
N		N.A	N.A
P		N.A	N.A
K		N.A	N.A
MICRONUTRIENTES	Cu	4	6
	Cr	0.05	1
	Zn	10	20
pH y CE		N.A	N.A

▪ **P.D: Por día, P.M: Por mes, N.A: No Aplica.**

## 2.6 Normatividad de aguas residuales en México.

En México la normatividad existente en materia de agua es muy amplia y específica. Respecto de las aguas residuales, cada estado cuenta con su normatividad y reglamento, en los que se incluyen los derechos, obligaciones y sanciones o multas que se aplicaran a quien administre una planta tratadora de aguas residuales (PTAR's) y no cumpla con los parámetros establecidos (Ley de Aguas Nacionales, 2014)



Toda empresa o institución que conforme a la ley deba contar con una PTAR's debe cumplir al pie de la letra dichas reglas y basarse en las normas oficiales para que el agua residual tratada se encuentre dentro de los estándares requeridos. En México entre las industrias más contaminantes se encuentran la del papel y celulosa, la química y petroquímica, la de pinturas y la refresquera (Ramirez, 2004; INEGI, 2011).

Con relación a la utilización del agua tratada en México, la Comisión Nacional del Agua (2004) señala en particular a los siguientes usos: el agropecuario, que incluye el agrícola, el pecuario y la acuicultura; el abastecimiento público, para uso público urbano y doméstico, que incluye todas las industrias y servicios que toman agua de las redes municipales; y el uso industrial, servicios y generación de energía eléctrica.

Una vez ocupada el agua para cualquiera de estos destinos, su calidad se altera en diferente grado, por lo que es necesario evaluarla. Es aquí en donde se aplican las normas oficiales, para las cuales se aplica una metodología específica, ya que hay distintos tipos de contaminación como biológica (virus, bacterias, protozoarios), química (residuos de procesos industriales, pinturas, agroquímicos, pesticidas), sólidos, metales pesados y compuestos orgánicos. Cada empresa se encargará de utilizar y aplicar las normas que le correspondan (Garcia, 2010).

En cuanto a la normatividad sobre los límites, análisis y características preferentes de las aguas residuales, en México existen diversas normas nacionales aplicables en el control de la calidad y límites permisibles de las aguas residuales (AR). A continuación, se presenta un listado de las norma oficiales mexicanas disponibles en materia de aguas residuales.

**Cuadro 2.2. Normatividad existente en México con relación a las aguas residuales.**

<b>NOMBRE</b>	<b>PRINCIPIO</b>
<b>NOM-001-ECOL-1996</b>	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales
<b>NOM-002-SEMARNAT-1996</b>	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
<b>NOM-003-ECOL-1997</b>	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público
<b>NOM-014-CONAGUA-2003</b>	Recarga artificial de acuíferos con aguas residuales y de infiltración de aguas pluviales al suelo y subsuelo.

El incremento en la producción del agua usada para irrigación agrícola es clave para lograr disminuir la presión sobre los recursos hídricos (Beekman, 2014). El uso de agua residual tratada de origen industrial o agrícola, ha ido teniendo cada vez más aceptación, pues se ha visto que mejora el vigor de las plantas y puede extender las temporadas de cultivo. Aunque el uso agrícola de las aguas residuales sin tratar, se ha asociado a la producción agrícola durante siglos (Keraita *et al.*, 2008), durante la última parte del siglo XX el uso de las aguas residuales se extendió en varios países del mundo, especialmente en las regiones áridas como en algunas partes del mediterráneo (Urkiaga, 2008)

El uso de aguas residuales destinado para la irrigación agrícola, puede tener múltiples beneficios para casi todos los países, su uso resulta particularmente beneficioso y rentable

para las zonas áridas y semiáridas de bajos ingresos (Liqā, 2010; Jimenez, 2010), ya que puede propiciar un uso más intensivo del suelo (Galavi, 2009; Chalkoo, 2014) aunque lamentablemente el proceso de tratamiento de aguas residuales no puede ir a la par del crecimiento de la población y por ende con su demanda alimentaria (Jimenez, 2013).

En países en vías de desarrollo como México, Perú, Egipto, Líbano, India y Vietnam, las aguas residuales se han utilizado como una fuente de nutrientes para los cultivos durante muchas décadas. Se tiene estimado que en el mundo hay alrededor de 20 000 000 de hectáreas irrigadas con aguas residuales de distintos tipos: tratadas, sin tratar, parcialmente tratadas y diluidas (Raschid-Sally, 2008; Jimenez., 2008). Una de las ventajas del uso de las aguas residuales para riego, es que contribuye a la recarga de los acuíferos, para convertirse en una nueva fuente de agua usable (Jimenez, 2010).

#### 2.7.1 Aporte nutrimental

Las aguas residuales, ya sean de procesos agrícolas o industriales traen consigo macro nutrientes útiles a las plantas y al suelo como: carbón orgánico (CO), nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), así como micronutrientes y materia orgánica (MO). Estos dañan a los ríos, pero a los suelos les da un impacto positivo (Qadir, 2012), además de que son necesarios para el crecimiento de las plantas.

Masciandaro (2014) menciona que el uso de aguas residuales representa una estrategia ecológica en la recuperación de minerales y nutrientes orgánicos, ya que al reciclar el agua se incrementa la calidad y fertilidad del suelo a la vez que se mantienen las fuentes de agua.

El potencial nutritivo de las aguas residuales varía dependiendo de su origen, dilución o tratamiento (Aghtape, 2011), muchos productores creen que las aguas residuales sin tratar aportan mayor cantidad de nutrientes que las aguas residuales tratadas; sin embargo, un estudio realizado en la India por Yadav *et al.* (2002), reveló que el 74% del contenido de N era retenido en el agua residual después de haber pasado por tratamiento, en cuanto al P se retiene el 79% y en K el 57%. Aunque para saber el valor de fertilización de las aguas residuales es necesario monitorear periódicamente, para determinar los nutrientes presentes, su concentración y con base en esto ajustar las aplicaciones de fertilizantes (Lazarova, 2005).

### **2.7.2 Desventajas**

Como ya se mencionó la aportación nutrimental de las aguas residuales pueden compensar la necesidad nutrimental de las plantas y suelo, pero si este aporte promueve el exceso de estos nutrientes puede haber desequilibrios indeseables en el desarrollo vegetativo y madurez de las plantas, disminuyendo la calidad del cultivo y la contaminación de los mantos acuíferos (Qadir, 2012) Algunos efectos no deseables que las aguas residuales pueden ocasionar en el suelo son:

El exceso de N y P en aguas residuales pueden causar eutrofización de los cuerpos de agua naturales y de los sistemas de irrigación por el crecimiento indeseable de algas.

La lixiviación de nitrógeno (N) causa la contaminación del agua subterránea.

El fósforo (P) puede acumularse en el suelo ya que es inmóvil

El exceso de sodio (Na) y magnesio (Mg) deteriora la estructura del suelo y causan efectos indeseables en sus propiedades hidráulicas, como la infiltración y su conductividad hidráulica.

El exceso de sales tiene efectos osmóticos en las plantas.

Algunos iones de cloro (Cl), boro (B) y sodio (Na) pueden causar fitotoxicidad (Qadir, 2012).

Aunado a los efectos no deseados en lo referente a nutrición el agua residual también puede tener efectos negativos en la salud, el riesgo aumenta si el agua utilizada para riego no pasó por ningún tipo de tratamiento.

## **2.6 Situación de las aguas residuales en México**

En México existe una variación regional con respecto a la disponibilidad de agua. En la zona norte, centro y noroeste, donde habita el 77% de la población solamente se cuenta con el 31% de disponibilidad de agua, mientras que en la zona sur y suroeste, se concentra el 23% de la población y se tiene una disponibilidad de agua del 69%.

En México se generan 6.7 miles millones de  $m^3$  de aguas residuales cada año, se espera que dicho volumen aumente a 9.2 miles de millones de  $m^3$  para el año 2030 (de la Peña, 2013). Durante el periodo del 200-2006 hubo avances importantes al incrementar los porcentajes de agua residual tratada, aumentando de 23% al 36.1%. La CONAGUA (2012) reporta que el caudal de aguas residuales tratadas incrementó en 11.4 % llegando a un 47.5%, que representa un caudal de  $99.8 m^3s^{-1}$ .

En 1995 existían en el país 403 plantas de tratamiento de aguas residuales, con capacidad total de  $30 m^3s^{-1}$ , (Ortiz, 1995). Para 2011 existían 2,289 plantas municipales de

tratamiento de AR en operación, con capacidad total instalada de 137,082.13 L<sup>1</sup>s y caudal tratado de 97,640.22 L S<sup>-1</sup>, alcanzando una cobertura de tratamiento de 46.5% de aguas residuales municipales (CONAGUA, 2011).

En México es muy común que las zonas áridas y semiáridas reutilicen el agua, pues una de las principales problemáticas de estas zonas es la falta de agua para riego agrícola, en varios casos el agua utilizada no pasa por un tratamiento adecuado (CONAGUA, 2008). Como se puede observar en la Figura 3 los estados que mas utilizan las AR se encuentran en el norte del país, en donde se concentran las zonas áridas.



**Figura 2.2. Situación de la cobertura de aguas residuales en México. Fuente: CONAGUA 2012.**

En el país existen diversos programas impulsados por la CONAGUA que han promovido el tratamiento de las aguas residuales, como los que se enuncian a continuación:

- Programa de Agua Potable y Alcantarillado en Zonas Urbanas (APAZU ).
- Programa de Devolución de Derechos (PRODDER)

- Programa Federal de Saneamiento de Aguas residuales (PROSANEAR)
- Programa de Modernización de Organismos Operadores de agua (PROMAGUA)
- Programa de Tratamiento de Aguas Residuales (PROTAR)
- Programa para la Sostenibilidad de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento (PROSSAPYS)

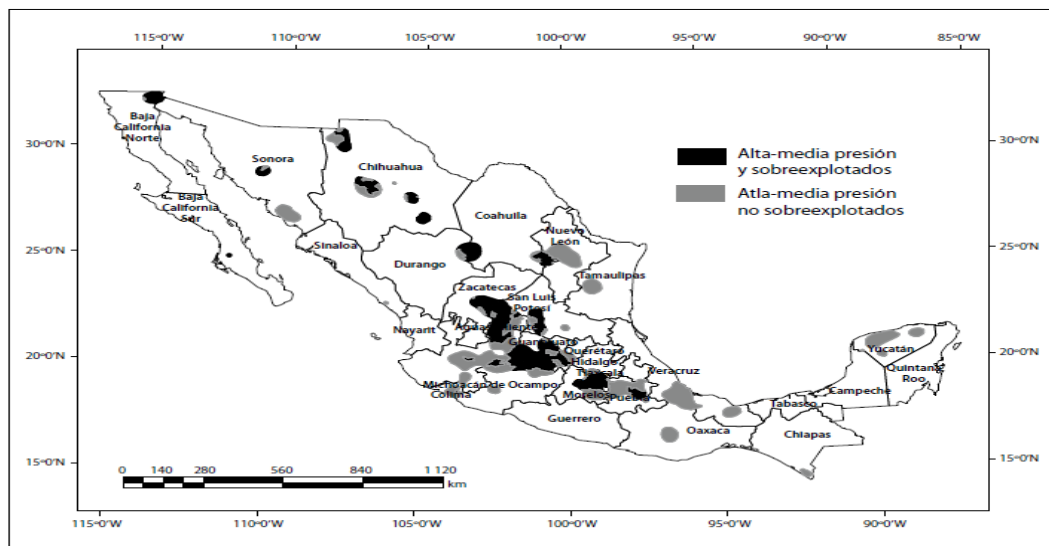
El estado del tratamiento de las aguas residuales en México obedece a la necesidad de reutilización. De acuerdo al Inventario Nacional de Descargas de Aguas Residuales, reportado en las Estadísticas del Agua en México (2012) la acuicultura es la industria que libera más aguas residuales. En cuanto al volumen de contaminación, las industrias azucarera, petrolera y agropecuaria en general son las más destacadas (1750, 1186 y 1063 miles de toneladas por año). Si se calcula una razón entre materia orgánica y descarga producida, las industrias agropecuaria y petrolera juntas resultan las más contaminantes en México.

## **2.7 Acuíferos sobreexplotados**

De los 11 400 millones de  $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$  concesionados para uso público urbano y doméstico, que se encuentran en México, 62.2% proviene de aguas subterráneas. De acuerdo a la CONAGUA para 1975 de 653 acuíferos existentes, 32 estaban sobreexplotados. En 1985 eran 80 y en 2009 existían 100 acuíferos sobreexplotados, de los cuales se extraen el 53.6% del agua subterránea a nivel nacional. De estos 100 acuíferos 72 se ubican en los estados de Sonora, Chihuahua, Baja California, Baja California Sur, Coahuila, Durango, Nuevo León, Guanajuato, Puebla, San Luis Potosí, Zacatecas, Estado de México y Querétaro (CONAGUA, 2011).

Este hecho es crítico ya que año con año las demandas de agua van incrementando. Una de las consecuencias de la sobreexplotación es la salinización de suelos y la presencia de aguas subterráneas salobres. Este efecto como se muestra en Figura 4, está presente en 31 acuíferos con presencia de suelos salinos. Estos se encuentran localizados principalmente en la península de Baja California, Zacatecas, San Luis Potosí Aguascalientes, Guanajuato Querétaro y Morelos (Díaz, 2013).

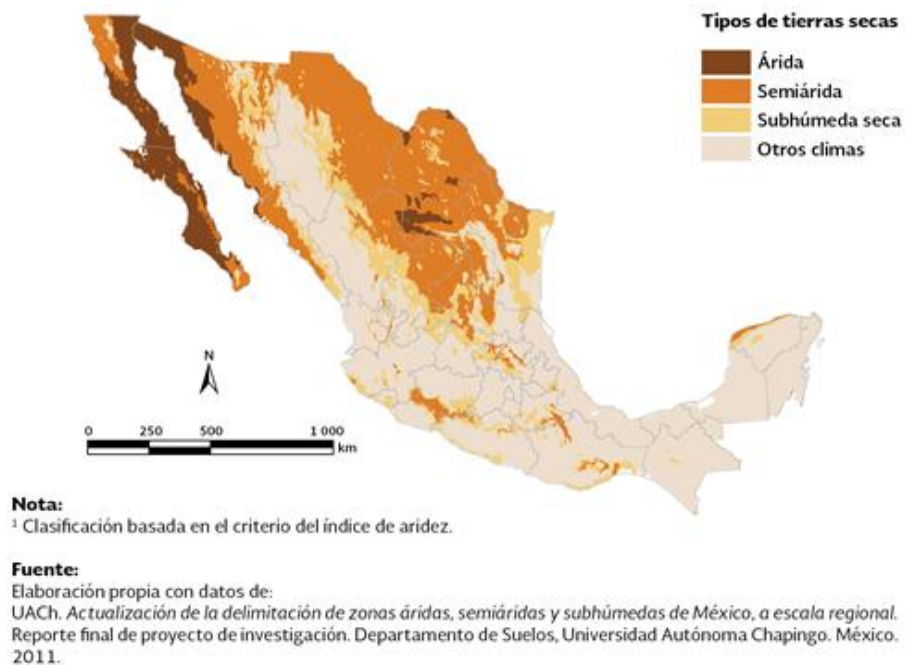
Durante las primeras décadas en las que se generó la sobreexplotación (1960-1980) se creó un importante impacto ambiental (Figura 2.3). Este impacto se reflejó en la desaparición de manantiales, lagos y humedales, pérdida de vegetación nativa y de ecosistemas, así como la disminución del caudal de los pozos de extracción. Esto a su vez ocasionó problemas tanto económicos como ambientales tales como: incremento en los costos de bombeo, intrusión salina y contaminación del agua subterránea. En general la sobreexplotación de los acuíferos ha ocasionado efectos negativos en los ecosistemas y agro (Soto, 2012).



**Figura 2. 1. Presión antropogénica y acuíferos sobreexplotados en México. Fuente: (Díaz, 2013).**



A pesar de que en los sectores industriales, petroleros y agropecuarios se contamine y desperdicie una gran cantidad de agua, hay alternativas que mitigan en cierto modo la carencia de este recurso como es el uso de las aguas residuales tratadas. Esta es una alternativa viable y con un enfoque sustentable, para el abastecimiento de los cultivos agrícolas. Se ha comprobado que el uso de estas aguas en la irrigación agrícola, puede tener múltiples beneficios para casi todos los países. Particularmente resulta beneficioso y rentable para las zonas áridas y semiáridas de bajos ingresos (Liqa, 2010) principalmente las ubicadas en el norte del país (Figura 2.4). El uso racional del agua en estas zonas es fundamental para el manejo sustentable de los recursos naturales (Suloma, 2013). En las zonas áridas de México habitan aproximadamente 33.6 millones de habitantes, quienes representan el 30% de la población nacional (INEGI, 2011).



**Figura 2. 2. Distribución de zonas áridas y semiáridas en México. Fuente Inegi, 2011.**

## 2.8 Comarca Lagunera

La Comarca Lagunera se encuentra ubicada en el centro-norte de México en las coordenadas 24°22'N y 102°22'O, a una altitud de 1,120 msnm, asentada en la cuenca Nazas-Aguanaval y comprendida dentro de la eco-región del Desierto Chihuahuense. Está conformada por 16 municipios, pertenecientes a los estados de Coahuila y Durango la población aproximada es de 1,282.247 habitantes (SEMARNAT, 2010). Esta región debe su nombre a los cuerpos de agua anteriormente existentes en la región entre la cual se encontraba Laguna de Mayrán, la más grande de Latinoamérica.

La Comarca Lagunera se encuentra formada por una enorme planicie semidesértica con clima caluroso y con un alto grado de aridez. Esta planicie cuenta con grandes llanuras resacas, bolsones y valles muy extensos, pocas prominencias orográficas. Se caracteriza por una ágil economía que, sin embargo, se apoya en un uso del agua que rebasa sobre manera la capacidad de auto recuperación de sus mantos acuíferos, dado el promedio de precipitación de esta zona (CONAGUA, 2012).

### 2.9.1Clima

El clima de la región se clasifica como de tipo desértico y de los subtipos secos semiáridos, con escasas lluvias de verano, la temperatura promedio varía entre los 28 y 40°C, aunque llega a alcanzar los 48°C en verano y en invierno desciende hasta a los -8°C. La temperatura media anual y temperatura media anual de 20 a 22°C, la precipitación media anuales de 224.6 mm y la humedad de 38% (SEMARNAT, 2004).

### 2.9.2 Disponibilidad de agua para riego en la región.

El acuífero principal-región lagunera cuenta con un volumen concesionado de agua subterránea de 651.226 millones de m<sup>3</sup>, mientras su volumen de extracción es de 930.9 millones de m<sup>3</sup>, la recarga es de 518 millones de m<sup>3</sup> y el déficit del acuífero restando el volumen concesionado menos la recarga es de -132 millones de m<sup>3</sup> (CONAGUA, 2009).

En la parte más baja de la cuenca se extiende una amplia llanura, donde se emplazó el Distrito de Riego No. 17. En el subsuelo de esta llanura se aloja el acuífero “Principal-Región Lagunera”. El acuífero se ubica en la Región Hidrológica de los Ríos Nazas y Aguanaval (RH-36), Cuencas Río Nazas-Torreón y Laguna de Mayrán y Viesca, y tiene una extensión territorial aproximada de 14,505 km<sup>2</sup> (CONAGUA, 2009). Con las presas “Lázaro Cárdenas” y “Francisco Zarco”, el escurrimiento del Nazas fue regulado, derivado a través de los canales principales del Distrito de Riego 017 y distribuido en una amplia zona de riego (CONAGUA, 2009; SEMARNAT, 2004).

### 2.9.4 Aguas residuales en la región

Las plantas tratadoras de la región se encuentran en funcionamiento desde 1991, en el 2012 se contaban con 141 plantas de tratamiento dentro de la cuenca Nazas-Aguanaval, la cual abarca los estados de Coahuila, Durango, San Luis Potosí y Zacatecas, de éstas 79 se encuentran dentro de los estados de Durango y Coahuila, en total cuentan con una capacidad para 3, 613.49 L s<sup>1</sup>. En el estado de Durango la mayoría de las plantas tratadoras utilizan lagunas de estabilización, mientras que en Coahuila predominan los lodos activados (CONAGUA, 2011).

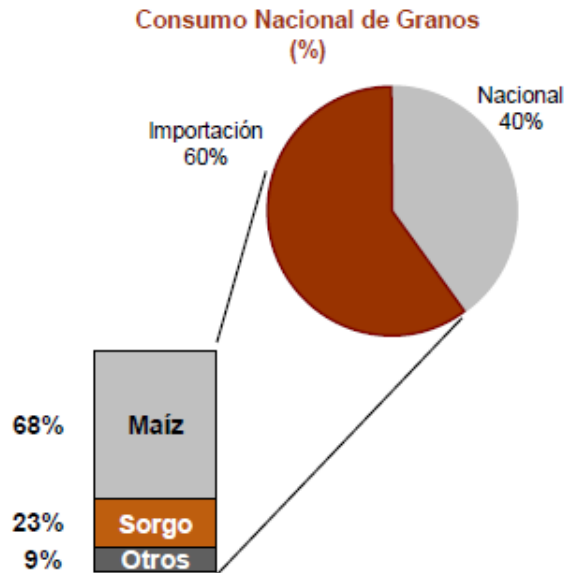
En la Comarca Lagunera existen 25 plantas tratadoras de agua. Diecinueve de estas plantas se encuentran ubicadas dentro del estado de Durango y seis dentro del estado de Coahuila.

El 96% del agua de estas plantas recibe un proceso secundario, 17 de estas plantas recibe un tratamiento por lodos activados El 44% de las descargas es para riego agrícola (CONAGUA, 2011).

La agricultura es uno de los sectores que ocupa más superficie de tierra y agua a nivel mundial. En México, recientemente ha habido un incremento de 13, 500.63 ha de superficie sembrada y un incremento de 1, 290,149.72 ton en volumen de producción. La alfalfa y el maíz representan los cultivos con mayor superficie (SAGARPA, 2013). Estos cultivos se destinan principalmente para la alimentación del ganado. En 2005 se estimó un consumo de agua para uso pecuario de 8,101 millones de litros diarios (CAST, 2012; Steinfeld, 2006).

#### **2.9.5 Cultivos forrajeros.**

Los cultivos forrajeros representan cerca del 50% de la producción mundial de granos, el maíz representa el 48.7% de la producción a nivel mundial. En México se producen en promedio 32 millones de toneladas de forraje, de los cuales 68% corresponde a este cultivo (Figura 2.5). El cual representa el 20% de la producción en promedio nacional (SAGARPA, 2007). En la región de la Laguna se demanda una gran cantidad de forraje, en los últimos 10 años ha habido un incremento de 13, 500.63 ha de superficie sembrada y un incremento de 1, 290,149.72 toneladas en volumen de producción. Entre los forrajes con mayor superficie sembrada se encuentran, la alfalfa forrajera y el maíz forrajero (SAGARPA, 2013).



**Figura 2. 3. Distribución del consumo nacional de granos. SIAP, 2015.**

### 2.10 Maíz forrajero

El maíz es uno de los cultivos más importantes en la aportación energía para los humanos y animales (Zabadil, 2009). Este cultivo requiere de una fertilización adecuada, ya que, pueden presentar deficiencias nutrimentales ocasionando la disminución de la producción. La cual dependerá de la magnitud de la deficiencia.

Esta gramínea requiere para su desarrollo cantidades importantes de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S) y en menor cantidad de micronutrientes (Anjib, 2015), los cuales dependiendo de las propiedades del suelo se compensan con la aplicación de fertilizantes químicos. El nitrógeno y el potasio son nutrientes esenciales para la producción y rendimiento de maíz forrajero (Djalovic, 2008; Jurado, 2014).

## 2.11 Fertilizantes químicos

Los suelos contienen todos los elementos esenciales que la planta requiere para su desarrollo y reproducción; sin embargo, dichos elementos no siempre se encuentran en las cantidades necesarios para obtener un desarrollo y rendimiento deseable, ocasionando deficiencias en el cultivo, en el Cuadro 2 se muestran algunos de los síntomas de deficiencia de estos nutrientes. Esa insuficiencia se tiene que compensar por medio de fertilizantes (SAGARPA, 2007). Existen predicciones de que para el año 2050 habrá escasez del suministro mundial de los minerales esenciales utilizados en los fertilizantes (Ashley, 2011). El estado nutricional natural de los suelos es un factor importante en los cultivos entre los principales nutrientes presentes en el suelo se encuentran el nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) (Djalovic I., 2008).

El uso de fertilizantes químicos ha incrementado el costo de producción de los cultivos. Así mismo su uso excesivo es contaminante para el suelo y agua, principalmente con nitratos, ya que los fertilizantes nitrogenados son los más utilizados en la agricultura (FAO, 2010). Algunos de los componentes básicos o comunes de los fertilizantes son: nitrógeno como promotor de crecimiento vegetativo, fósforo, como promotor de floración y potasio como promotor de la fructificación (Chalkoo, 2014).

El carbono, el hidrogeno y el oxígeno son nutrimentos disponibles de manera natural en las plantas, el nitrógeno y el fósforo son dos macro elementos que si bien se encuentran disponibles de manera natural, es necesario realizar aportes para compensar las demandas de las plantas.

**Cuadro 2.3. Clasificación, símbolo, forma absorbida y síntoma de deficiencia de los nutrimentos (Fageria et al., 1997).**

CLASIFICACIÓN	NOMBRE SIMBOLO	Y	FORMA ABSORBIDA	SINTOMA DE DEFICIENCIA
Sin clasificación	Carbono (C)		CO <sub>2</sub>	
	Hidrogeno (H)		H <sub>2</sub> O	
	Oxigeno (O)		H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub>	
Primarios	Nitrógeno (N)		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub>	Clorosis en las hojas viejas
	Fósforo (P)		H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> , HPO <sub>4</sub>	Hojas con margen color púrpura
	Potasio (K)		K <sup>+</sup>	Hojas con márgenes cloróticos
Secundarios	Calcio (Ca)		Ca <sup>++</sup>	Achaparramiento y raíces cortas
	Magnesio (Mg)		Mg <sup>++</sup>	Hojas con clorosis intervenal
	Azufre (Mg)		SO <sub>4</sub> , SO <sup>2</sup>	Hojas jóvenes cloróticas y poco desarrolladas
Micronutrimentos	Hierro (Fe)		Fe <sup>++</sup> , Fe <sup>+++</sup>	Hojas con clorosis intervenal
	Manganeso (Mn)		Mn <sup>++</sup>	Clorosis intervenal
	Boro (B)		H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	Poco crecimiento apical y puntas cloróticas
	Zinc (Zn)		Zn <sup>++</sup>	Hojas jóvenes con clorosis intervenal
	Cobre (Cu)		Cu <sup>++</sup>	Hojas jóvenes amarillas y poco desarrolladas
	Molibdeno (Mo)		MoO <sub>4</sub>	Hojas con clorosis y achaparramiento
	Cloro (Cl)		Cl	Hojas marchitas cloróticas y raíz corta

### 2.11.1 Nitrógeno (N)

El ascendente incremento en la producción de fertilizantes a base de nitrógeno es notable. El ser humano ha alterado el ciclo del nitrógeno con el fin de poder abastecer a los más de 7 billones de personas que habitan la tierra (Stark, 2008) porque el nitrógeno es un elemento esencial para las plantas y animales (Figueroa, 2015).

El nitrógeno en su forma reactiva, es agregado a la producción agrícola y a la alimentación del ganado. Sin embargo, como fertilizante su aplicación es sumamente usada en cultivos y forrajes. El porcentaje de nitrógeno presente en el cultivo tiene una influencia considerable en el estado nutricional y en el rendimiento (Djalovic, 2008).

Cada año 85-90 millones de toneladas de fertilizantes nitrogenados son incorporados al suelo (Good, 2007). La habilidad que tienen las plantas para capturar el nitrógeno del suelo depende del tipo que sea este (Segura, 2012). Se ha estimado que aproximadamente el 50-70% del nitrógeno aplicado al suelo se pierde, ejemplo de esto es China en donde en los cultivos de arroz se llega a aplicar del 30-60% más fertilizante del que es necesario (Ju, 2006; Xu, 2010) pasando directamente a las corrientes de agua o pasando directamente a la atmosfera. Peng (2007) estimó que las pérdidas totales de este fertilizante fueron de 3.79 Kg ha<sup>-1</sup>. Los excesos de nitrógeno se asimilan en el ambiente en sus formas reactivas, nitrato (NO<sub>3</sub>) y óxidos de nitrógeno (NO y N<sub>2</sub>O). La urea es económicamente competitiva debido a su alta concentración de nitrógeno, aunque cuando esta se aplica al voleo tiene altas pérdidas de nitrógeno, especialmente cuando se aplica de esta manera a cultivos orgánicos.



### 2.11.2 Fósforo (P)

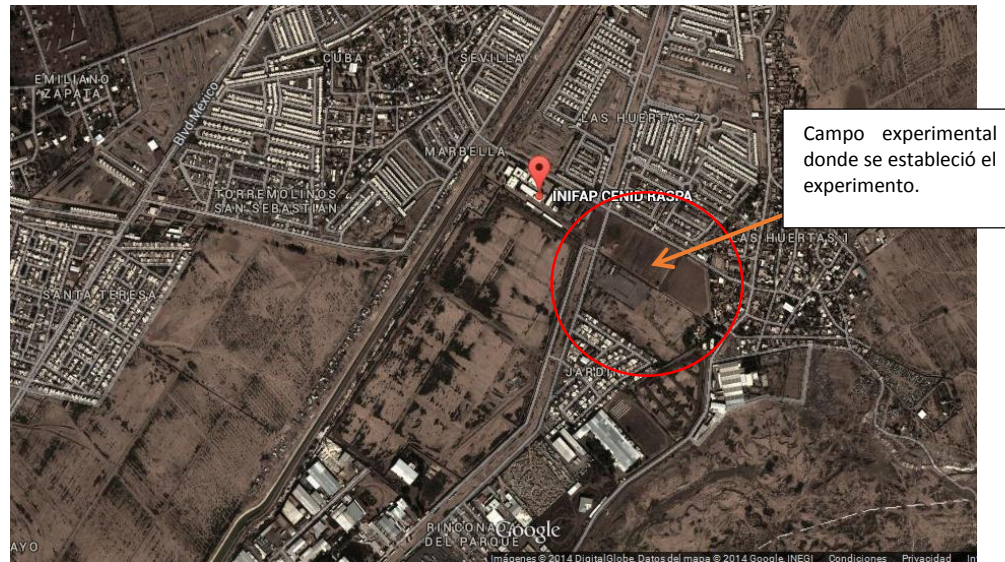
El fósforo es un elemento esencial en las plantas pues rige su crecimiento, promueve la respiración y fotosíntesis (Owino, 2015). Es uno de los elementos más comunes en el planeta; sin embargo, solo puede disponerse de un pequeño porcentaje de él para el uso humano (Schröder, 2010). Es por esto que actualmente se encuentra en una situación crítica, ya que es un recurso no renovable y recientemente sus reservas en el suelo se han ido agotando (Cordell, 2009).

El fósforo juega un papel esencial dentro del metabolismo de las plantas en la transferencia de energía, respiración y fotosíntesis (Glass et al, 1980), además no existe algún otro elemento que pueda reemplazar las funciones del fósforo. (Lougheed, 2011). Es un nutrimento inmóvil en el suelo, por lo que su aplicación como fertilizante se recomienda cercana a las raíces (FAO, 1985). La falta de acceso a los fertilizantes ya es una realidad para los agricultores de los países que no cuentan con recursos considerables de fosfato. Unos cuantos países controlan las reservas de fosfatos restantes, el 93% de las reservas mundiales de fosfato se encuentran en seis países: Marruecos, China, Argelia, Siria, Sudáfrica y Jordania (Jasinski, 2011); lo que ocasiona que los países dependientes de importaciones de fertilizantes se vuelvan vulnerables ante la volatilidad de los precios y de la disponibilidad (Cordell, 2009).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Ubicación del sitio experimental

El presente trabajo se realizó dentro de las instalaciones del INIFAP CENID-RASPA, localizado en las coordenadas 103° 26' 54.63" W, 25° 35' 17.19" N (Figura 7).



**Figura 3. 1. Ubicación del sitio experimental e instalaciones del INIFAP CENID-RASPA.**

#### 3.2 Establecimiento del experimento

Se estableció un experimento en el que las fuentes de variación fueron el tipo de agua (residual y de pozo) y la fertilización con siete niveles en los que se hizo variar las dosis de nitrógenos y fósforo. Las fuentes de nitrógeno y fósforo fueron fosfato monoamónico (MAP) y sulfato de amonio. La lámina de riego aplicada fue de 70 cm durante el ciclo de cultivo. La unidad experimental constó de 5 surcos de 80 cm de ancho y 4 metros de largo. El cultivo establecido fue maíz forrajero, la semilla fue un híbrido de la marca Asgrow variedad Ocelote. La fecha de siembra fue el 25 de julio, se sembró a una distancia 20 cm

entre plantas para obtener una población de 62, 500 plantas por hectárea. La cosecha se llevó a cabo en octubre.

### 3.3 Diseño experimental

El diseño experimental fue en bloques al azar con factorial incompleto con cuatro repeticiones (Cuadro 3.1.).

Cuadro 3. 1. Dosis de fertilización aplicadas en el experimento.

<b>Tratamiento</b>	<b>N kg/ha</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> kg/ha</b>
1	00	50
2	100	50
3	200	50
4	300	50
5	300	100
6	300	150
7	300	00

Con el fin de conocer el aporte nutrimental de las distintas variables manejadas se realizaron distintos análisis de suelo y planta en cada uno de los tratamientos establecidos, los análisis de agua se hicieron por variable, AR y AP. Antes de establecer el cultivo se tomó una muestra compuesta de suelo a 5 profundidades distintas: 0-7.5, 7.5-15. 15-30, 30-60 y 60-90 cm. Asimismo, se tomaron muestras de agua de pozo y residual tratada con base en la norma NMX-AA-003-1980, la cual especifica el método de muestreo para agua.

### 3.5.1 Variables evaluadas

Las variables evaluadas incluyeron características del suelo, del agua y de la planta.

**Cuadro 3. 2. Variables analizadas y metodología utilizada.**

Tipo de Muestra	Ensayo realizado	Técnica empleada	Norma usada
Suelo	pH	Determinación con electrodo	NOM-021-SEMARNAT-2000.
	CE	Determinación con potenciómetro.	
	HCO <sub>3</sub>	Colorimetría usando ácido nítrico al 0.005 N como titulante.	
	P	Método Olsen	
Agua	MO	Método de Walkley y Black.	NOM-AA-008-SCFI-2011
	N	Mediante un analizador de nitrógeno TruSpec LECO	
	pH	Mediante un electrodo.	NOM-021-SEMARNAT-2000
	CE	Mediante un potenciómetro	
	HCO <sub>3</sub>	Colorimetría usando ácido nítrico al 0.005 N como titulante.	NMX-AA-026-SCFI-2001
	N	Método Kjeldahl,	
	P	Mediante el método de cloruro estañoso mediante espectro fotocolorímetro	NMX-AA-029-SCFI-2001
	Cationes (Na, Ca, Mg, K)	Mediante espectrómetro de absorción atómica	NOM-021-SEMARNAT-2000. Con modificaciones para agua.
Micronutrientes (Cu, Mn, Fe y Zn)	Mediante espectrómetro de absorción atómica	NOM-021-SEMARNAT-2000. Con modificaciones para agua.	
Planta	N	Kjendahl,	Método KJeldah.
	P	Mediante espectrofotómetro a partir de una digestión con ácido nítrico perclórico y una solución de metabanadato de amonio	
	Micronutrientes (Mn, Zinc, Cu y Fe); Mg, K	A partir de la digestión con ácido nítrico perclórico, con espectrómetro de absorción atómica	NOM-021-SEMARNAT-2000. Con modificaciones para planta.

#### **IV. APORTE NUTRICIONAL EN SUELO IRRIGADO CON AGUA RESIDUAL TRATADA Y CONVENCIONAL EN LA REGIÓN DE LA LAGUNA MÉXICO.**

##### **Introducción**

El agua disponible en el mundo es de aproximadamente 1 386 millones de km<sup>3</sup>, de los cuales solo el 2.5% es agua dulce (Díaz, 2013). La cantidad total de agua dulce superficial junto con la subterránea de todo el planeta es menor del 1% (Dudgeon, 2006), lo que implica que solamente 200 000 km<sup>3</sup> están disponibles para el consumo humano y el mantenimiento de los ecosistemas naturales (Guerrero, 2009). Muchas regiones del mundo, al igual que México, están experimentando crecientes problemas de déficit hídrico. Debido al crecimiento implacable de la demanda de agua frente a unos recursos hídricos estáticos o en disminución y a las periódicas sequías debidas a factores climáticos.

Una de las actividades más demandantes de agua es la agricultura, actualmente, el riego agrícola el cual requiere el 77% de toda el agua dulce destinada a consumo humano (UNESCO, 2006). En México un factor importante ante esta problemática es que de los 40 millones de m<sup>3</sup> de agua dulce renovable disponibles, la mayor disponibilidad se encuentra en el sur-este del país, mientras que en el centro y norte, donde se concentra las actividades agrícolas y pecuarias hay déficit hídrico, lo que ha ocasionado la sobreexplotación de los mantos acuíferos del norte de México CONAGUA (2007) en el país existen 653 acuíferos, de los cuales 104 se encuentran sobreexplotados

La Comarca Lagunera es una de estas regiones, en donde desde más de 40 años la extracción del agua subterránea ha no sustentable ejemplo de esto es que la sobreexplotación del acuífero solo en 2002, de acuerdo a la CONAGUA ha sido de 480

millones de  $\text{hm}^3$ . La región, se caracteriza por ser la cuenca lechera más importante del norte del país, por lo que en la región se producen 1,290, 149.72 ton de cultivos forrajeros para alimentar al ganado, estos cultivos una demanda hídrica aproximada de  $2,685.1 \text{ Mm}^3$ , en los últimos 10 años ha habido un incremento de 13, 500.63 ha de superficie sembrada en la región (SAGARPA, 2013)., sin embargo esta región presenta escasez de agua, ya que se ubica dentro de las zonas áridas del país esta zona cuenta con una precipitación promedio de 240 mm por año (SEMARNAT, 2010).

Entre los forrajes con mayor superficie sembrada se encuentran, la alfalfa forrajera y el maíz forrajero (SAGARPA, 2013). De acuerdo a la SIAP en 2014 el maíz forrajero a nivel nacional tuvo una superficie sembrada de 566,304.53 has con un volumen de producción de 1.2 millones  $\text{ton año}^{-1}$  (Figuroa, 2015). El maíz forrajero representa el 86% del consumo nacional de granos (SIAP, 2015).

Debido al incremento de la producción agrícola, el uso de fertilizantes químicos ha incrementado el costo de producción de los cultivos, a la par que su uso excesivo es contaminante para el suelo y agua, principalmente con nitratos, ya que los fertilizantes nitrogenados son de los más utilizados en la agricultura (FAO, 2010). Los excesos aplicados terminan evaporándose, lixiviándose e infiltrándose en los mantos acuíferos o terminan en las corrientes de los ríos o mares, alterando la composición del agua y la flora y fauna (Lougheed, 2011).

De acuerdo a la FAO, el reciclar las aguas residuales urbanas y usarlas para cultivos agrícolas puede ayudar a mitigar los problemas de escasez y al mismo tiempo a reducir la contaminación de la misma (FAO, 2010). Las aguas residuales, ya sean de procesos agrícolas o industriales traen consigo macro nutrientes útiles a las plantas y al suelo como:

carbón orgánico (CO), nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), así como micronutrientes y materia orgánica (MO), que es dañino para los ríos, pero a los suelos les da un impacto positivo (Qadir y Scott, 2012), además de que son necesarios para el crecimiento de las plantas.

El uso de aguas residuales representa una estrategia ecológica en la recuperación de minerales y nutrientes orgánicos, ya que al reciclar el agua se incrementa la calidad y fertilidad del suelo a la vez que se mantienen las fuentes de agua (Masciandaro, 2014).

La trascendencia en el manejo responsable y eficiente del agua residual tratada permite generar una opción favorable para los agricultores desde el punto de vista de costos tanto en el menor uso de fertilizantes químicos así como en los costos que se generan en la extracción de agua subterránea, ya que el agua residual tiene un costo menor que el agua extraída del subsuelo. Es por eso que el objetivo de este trabajo fue determinar la disponibilidad nutrimental del suelo irrigado con aguas tratadas en comparación a agua de pozo.

### **Materiales y métodos**

El presente trabajo se realizó dentro de las instalaciones del INIFAP CENID-RASPA, localizado en las coordenadas 103° 26' 54.63" W, 25° 35' 17.19" N.

El cultivo se estableció el 15 de mayo del 2014, a una distancia entre plantas de 20 cm y 70 cm entre hileras. Cada parcela consto de 5 surcos de 4 m de largo, con una población de 62,500 plantas ha<sup>-1</sup>. Las dimensiones de la parcela experimental fueron de 4.26 m de largo por 6.23 de ancho.

El experimento se estableció en dos parcelas, las cuales representaron los utilizados, de manera que la parcela 1 fue regada con agua de pozo (AP), mientras que la parcela 2 con agua residual tratada (AR), se aplicó una lámina de riego de 70 cm. En cada una de estas parcelas se establecieron cuatro bloques o repeticiones con los tratamientos de dosis de fertilización con nitrógeno y fósforo (Cuadro 4.1.). Los fertilizantes empleados como fuentes de nitrógeno y fósforo fueron: sulfato de amonio y MAP, respectivamente.

El abastecimiento de agua residual se obtuvo de la Planta Tratadora Oriente, la cual se encuentra dentro del municipio de Gómez Palacio, el agua de pozo o noria utilizada se obtuvo de los pozos propiedad del INIFAP CENID-RASPA.

**Diseño experimental** Se estableció un diseño de bloques al azar con un factorial incompleto, con 4 repeticiones.

**Variables.** Se evaluaron las siguientes variables independientes: tipo de agua y dosis de fertilización, en las primeras se emplearon AR y AP. En la fertilización se evaluaron las distintas dosis de fertilización aplicadas

**Cuadro 4. 1. Dosis de fertilización aplicadas.**

Tratamiento	N Kg ha <sup>-1</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Kg ha <sup>-1</sup>
1	0	50
2	100	50
3	200	50
4	300	50
5	300	100
6	300	150
7	300	0



**Muestreos.** Antes de establecer el cultivo se tomó una muestra compuesta de suelo a 5 profundidades distintas: 7.5, 15, 30, 60 y 90 cm. Posteriormente, se tomaron muestras de suelo de acuerdo a la NOM-021 a 3 profundidades distintas: 15, 30 y 60 cm.

**Preparación de muestras.** Las muestras de suelos se tomaron de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 con una barrena de acero inoxidable, secaron al aire en papel canela, se molieron y tamizaron en tamiz de 2mm.

Los muestreos de agua se realizaron al momento de aplicarse el riego, la toma de la muestra se realizó en base a la norma NMX -AA-003-1980.

**Análisis de muestras.** Los análisis realizados al suelo se hicieron de acuerdo a la NOM-021-021-SEMARNAT-2000, fósforo (P) Olsen, pH, Conductividad eléctrica (CE), bicarbonatos ( $\text{HCO}_3$ ) y materia orgánica (MO) se analizaron de acuerdo a los métodos señalados en dicha norma. Así como nitrógeno total (NT) mediante analizador elemental, TruSpec LECO.

**Análisis estadístico.** Se realizaron análisis de varianza y pruebas de Tukey en el programa SAS versión 9.3

## **Resultados**

Los Cuadros 4.2 y 4.3 presentan las propiedades del suelo y agua utilizada antes del establecimiento del experimento. En la caracterización del agua aplicada puede apreciarse que el agua residual tiene un mayor aporte de nitrógeno (2.2 %), fósforo (8.41 %) y bicarbonatos ( $14.33 \text{ mmol L}^{-1}$ ) que el agua de pozo, sin embargo el pH es más bajo en agua residual (7.57). En suelo pH y materia orgánica tienen mayor concentración a los 15 cm, los valores de nitrógeno (0.2 %) no varían en las profundidades.

**Cuadro 4. 2. Caracterización de los dos tipos agua utilizadas en el experimento.**

Tratamiento	pH	CE (dS m <sup>-1</sup> )	N %	P %	HCO <sub>3</sub> mmol L <sup>-1</sup>
Agua residual tratada	7.57	2.18	12.22	8.41	14.33
Agua de pozo	8.57	0.37	0.78	0.79	2.28

**Cuadro 4. 3. Caracterización de suelo antes del establecimiento del experimento.**

Profundidad (cm)	pH	CE dS m <sup>-1</sup>	NT %	MO %	P %	HCO <sub>3</sub> mmo L <sup>-1</sup>
<b>7.5</b>	7.3	1.3	0.2	0.909	3.7	11
<b>15</b>	7.8	1.2	0.2	2.726	3.4	17
<b>30</b>	7.6	1.1	0.2	1.704	4.2	18
<b>60</b>	7.4	1.1	0.2	1.59	2.9	18
<b>90</b>	7.2	2.1	0.2	1.136	2.3	14

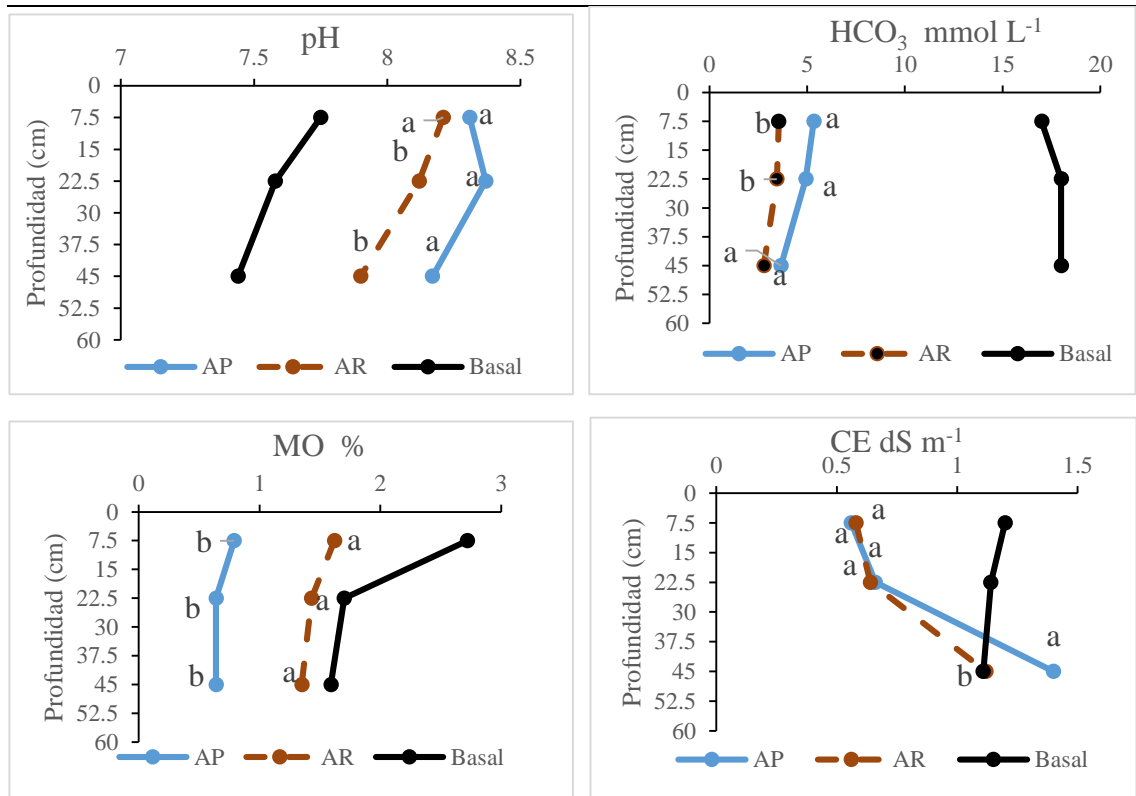
**Dosis de fertilización nitrógeno 300 Kg ha<sup>-1</sup> y dosis de fósforo variable.** En el Cuadro 4.4 se muestran los efectos en el suelo provocados por la aplicación de agua residual y de pozo. Las propiedades CE y MO no fueron modificadas significativamente por el tipo de agua en las tres profundidades de muestreo. Se presentaron diferencias significativas en el pH a los 30 y 60 cm de profundidad. La concentración de HCO<sub>3</sub> fue significativamente diferente por efectos de tipo de agua a los 15 y 30 cm.

Los resultados muestran que después del experimento el pH inicial del suelo se incrementó en ambos tratamientos. El AP provocó un incremento significativo (P<0.05) respecto a AR. Asimismo, el pH tiende a incrementar de acuerdo a la profundidad. Sin embargo en la CE del suelo no hubo diferencias entre el tipo de agua aplicada, ambos tratamiento tuvieron el mismo comportamiento y tendieron a disminuir la CE en las dos primeras profundidades.,

AP tuvo un aporte significativamente mayor de  $\text{HCO}_3$  en suelo, que AR. La MO disminuyó en suelo, pero la disminución fue significativamente menor ( $P>0.05$ ).

**Cuadro 4. 4. Probabilidades de significancia de propiedades químicas en suelo a tres profundidades (15, 30 y 60 cm) con dos tipos de agua de riego (AR y AP), y fertilización nitrogenada a 300 Kg ha<sup>-1</sup> y fosforada a distintas dosis en parcelas sembradas con maíz forrajero.**

Propiedades	15 cm			30 cm			60 cm		
	Tagua	P	Tagua*P	Tagua	P	Tagua*P	Tagua	P	Tagua*P
<b>pH</b>	---	0.0227	0.0003	0.0006	0.0019	0.0054	0.0001	0.0001	0.0001
<b>CE</b>	0.0225	---	---	---	0.0098	---	0.0013	0.0337	---
<b>HCO<sub>3</sub></b>	0.0033	0.0227	0.0067	0.048	---	0.0129	---	---	0.0534
<b>MO</b>	---	---	0.0146	0.0018	---	0.0002	0.0029	---	0.0002



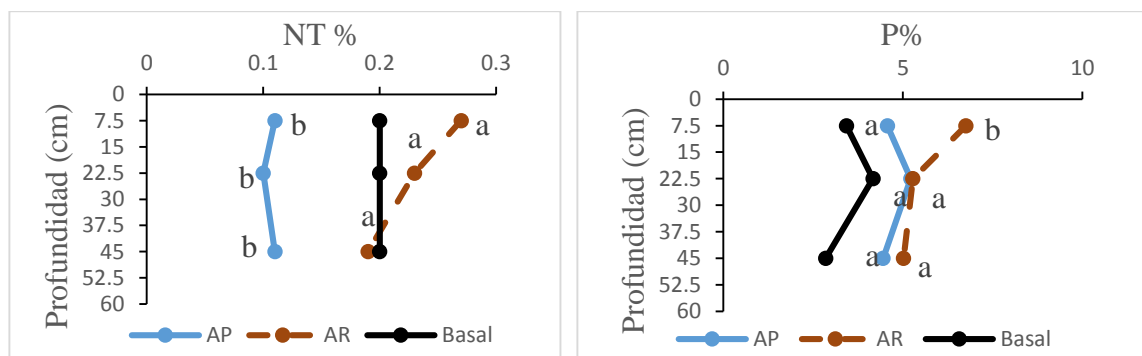
**Figura 4. 1 Efectos del tipo de agua aplicada sobre el pH, CE, HCO<sub>3</sub> y MO en suelo fertilizado con N 300 kg ha<sup>-1</sup> y fósforo a distintas dosis, comparados con la muestra basal del suelo. AR= Agua Residual, AP= Agua de Pozo. Las letras a y b indican diferencias entre tipo de agua, por profundidad.**

En el Cuadro 4.5 se presentan las probabilidades de los efectos en suelo de nitrógeno y fósforo. El tipo de agua tuvo efectos significativos ( $P < 0.05$ ) sobre el NT en las tres profundidades. Por el contrario la concentración de P fue significativamente solo en los primeros 15 cm de profundidad del suelo.

El suelo presentó un incremento significativo ( $P < 0.05$ ) de NT por parte de AR a los 15 y 30 cm, a los 60 cm de profundidad no hubo diferencias significativas respecto a la muestra basal de suelo, las concentraciones en AP estuvieron por debajo de la muestra inicial de suelo. Tanto AP como AR tuvieron concentraciones mayores de P en comparación a la muestra inicial, a los 15 cm AR presentó concentraciones significativas ( $P < 0.05$ ).

**Cuadro 4. 5. Probabilidades de significancia nitrógeno y fósforo en suelo a tres profundidades (15, 30 y 60 cm) con dos tipos de agua de riego (AR y AP), y fertilización nitrogenada a  $300 \text{ kg ha}^{-1}$  y fosforada a distintas dosis en parcelas sembradas con maíz forrajero.**

Característica	15 cm			30 cm			60 cm		
	Tagua	P	Tagua*p	Tagua	P	Tagua*p	Tagua	P	Tagua*P
<b>NT</b>	0.0001	0.0021	0.0265	0.0001	0.0001	0.0001	0.0234	0.003	0.0008
<b>P</b>	0.012	---	0.0001	---	---	0.001	---	---	0.0001



**Figura 4. 2. Efectos de tipo de agua en NT y P en suelo fertilizado con N a  $300 \text{ kg ha}^{-1}$  y P a distintas dosis, comparado con muestra inicial. AR= Agua Residual. AP= Agua de Pozo. Las letras a y b indican diferencias entre tipo de agua, por profundidad.**

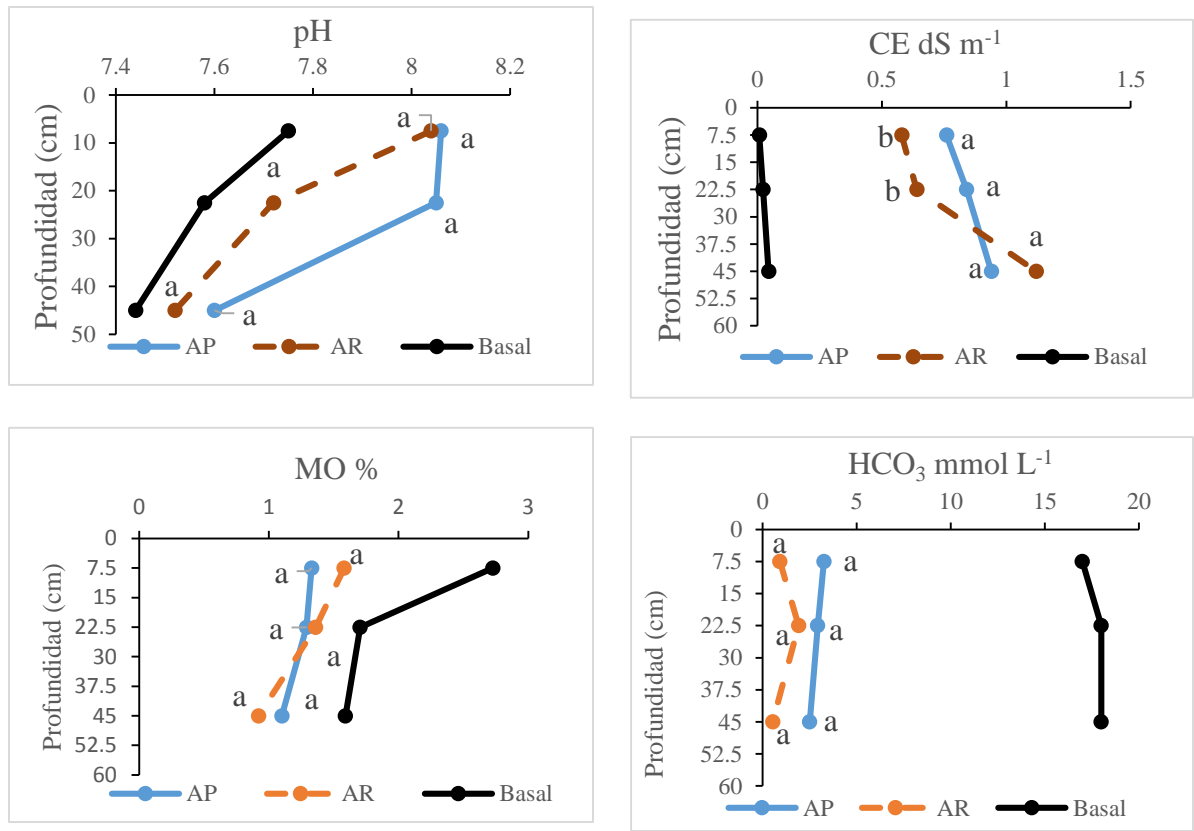
**Dosis de fertilización P50 N variante.** Los efectos al aplicar una fertilización con P a 50 Kg ha<sup>-1</sup> para las propiedades del suelo se encuentran en el Cuadro 4.5. El pH del suelo presento aportes significativos por el tipo de agua aplicada a los 30 y 60 cm, CE a los 15 y 30. HCO<sub>3</sub> a los 15 cm y MO en las tres profundidades.

En la Figura 4.3 se muestran los efectos en suelo al irrigarlo con los dos tipos de agua. En el que el pH del suelo se vio incrementado al aplicar ambos tipos de agua, aunque no se obtuvieron diferencias significativas (P<0.05) por los tipos de agua aplicados, la CE también incremento, a los 15 y 30 cm, AP tuvo un aporte mayor (P<0.05) respecto a AR.

Los bicarbonatos y materia orgánica presentaron valores por debajo a los obtenidos en la muestra basal, en ambas propiedades no se encontraron diferencias significativas (P<0.05) para los dos tipos de agua empleados.

**Cuadro 4. 6. Probabilidades de significancia de propiedades químicas en suelo a tres profundidades (15, 30 y 60 cm) con dos tipos de agua de riego (AR y AP), y fertilización fosforada a 50 Kg ha<sup>-1</sup> y nitrógeno a distintas dosis en parcelas sembradas con maíz forrajero.**

Característica	Tagua	15 cm			30 cm			60 cm	
		NT	Tagua*N	Tagua	N	Tagua*N	Tagua	N	Tagua*N
<b>pH</b>	----	0.0322	---	0.0014	---	---	0.0005	---	0.0008
<b>CE</b>	0.0042	---	---	0.0354	---	---	---	0.0346	0.0354
<b>HCO<sub>3</sub></b>	0.0001	---	0.017	0.46	---	---	0.0001	---	---
<b>MO</b>	0.0064	---	0.0146	0.0018	---	0.0002	0.0029	---	0.0002

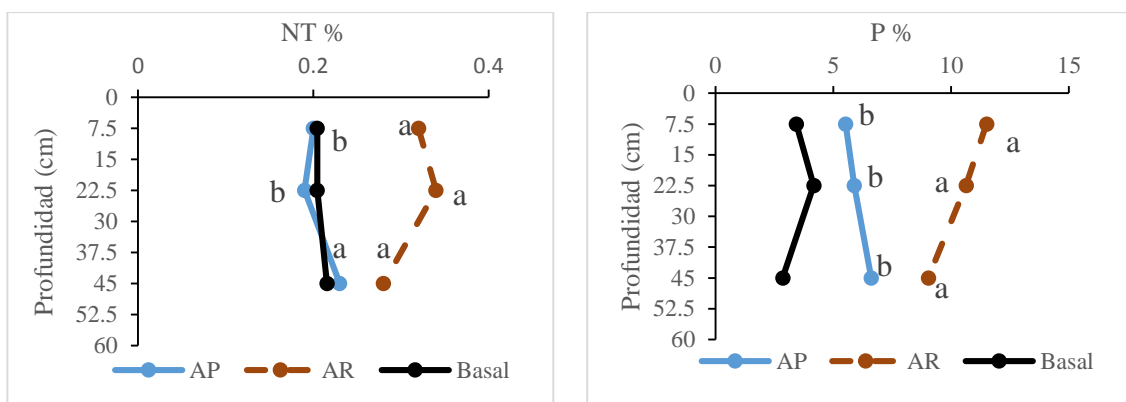


**Figura 4. 3. Efectos por tipo de agua aplicada en pH, CE, HCO<sub>3</sub> y MO en suelo fertilizado con P 50 kg ha<sup>-1</sup> y nitrógeno a distintas dosis, comparados con la muestra basal. AR= Agua Residual, AP= Agua de Pozo. Las letras a y b indican diferencias entre tipo de agua, por profundidad.**

En el Cuadro 4.7 se muestran las probabilidades de los efectos en suelo al aplicar agua residual y de pozo con una fertilización fosforada con 50 kg ha<sup>-1</sup> y nitrógeno a distintas dosis, el NT tuvo efectos (P<0.05) por el tipo de agua aplicada a los 15 y 30 cm, P también tuvo efectos significativos (P<0.05) en las tres profundidades analizadas. Como se puede observar en la Figura 4.4 la concentración de NT en suelo incremento significativamente (P<0.05) al regar con AR en tanto que AP no tuvo efectos en suelo. En ambos tratamientos presentaron concentraciones altas de P respecto a la muestra basal, sin embargo se observó que al aplicar AR se aporta más P al suelo (P<0.05) que al regar con AP.

**Cuadro 4. 7. Probabilidades de significancia de nitrógeno y fósforo en suelo a tres profundidades (15, 30 y 60 cm) con dos tipos de agua de riego (AR y AP), y fertilización fosforada a 50 Kg ha<sup>-1</sup> y nitrógeno a distintas dosis en parcelas sembradas con maíz forrajero.**

Característica	15 cm			30 cm			60 cm		
	Tagua	N	Tagua*N	Tagua	N	Tagua*N	Tagua	N	Tagua*N
NT	0.0027	0.0037	0.0001	0.0001	0.0002	0.00001	---	0.0057	0.0046
P	0.0005	0.0001	0.0017	0.0006	0.0005	0.00004	0.0305	0.0048	0.0137



**Figura 4. 4. Graficas de efectos por tipo de agua aplicada en NT y P en suelo fertilizado con P 50 Kg ha<sup>-1</sup> y nitrógeno a distintas dosis, comparados con la muestra basal. AR= Agua Residual. AP= Agua de Pozo. Las letras a y b indican diferencias entre tipo de agua, por profundidad.**

**Cuadro 4.8. Efectos en propiedades del suelo al aplicar diferentes tipos de fertilización.**

ELEMENTO	N 300 Kg ha <sup>-1</sup> P variable	P 50 Kg ha <sup>-1</sup> N variable
pH	AP>AR	AP=AR
CE	AP=AR	AP>AR
P	AP=AR	AR>AP
HCO <sub>3</sub>	AP=AR	AP=AR
MO	AR>AP	AP=AR
NT	AR>AP	AR>AP

## **Discusión**

Las propiedades del suelo pueden cambiar dependiendo no solamente del tipo de agua aplicada en el riego (Abdelraham, 2011; Mohammad, 2007; Qian, 2005), las dosis de fertilización también tienen efectos sobre el suelo. Los resultados obtenidos comprueban que las propiedades cambian de acuerdo al tipo de fertilización aplicada, de este modo al hacer un comparativo (Cuadro 4.8) entre las dos dosis usadas obtenemos que el pH no varía entre tratamientos al aplicar dosis variables de nitrógeno lo cual puede deberse a que de acuerdo con diversos autores a que la influencia del agua residual en el cambio del pH se da largo plazo (Ziyad, 2014).

Algunos autores reportan que se necesitan al menos de 2 años para tener un efecto significativo en el suelo (Schipper, 1996; Aghtape, 2011), sin embargo al aplicar dosis altas de nitrógeno el pH aumenta al regarse con agua de pozo, de acuerdo a (Xu, 2010) la disminución de pH en agua residual se debe a la formación de ácidos orgánicos y el contenido alto de amoníaco aportado por el agua y la fertilización, tal como lo reporto Mohammad (2003) el agua residual tratada baja los pH del suelo y aumenta el fósforo, lo cual sucedió en el experimento al regar con agua residual tratada y aplicar una fertilización de fósforo baja ( $50 \text{ kg ha}^{-1}$ ).

Al aplicar dosis altas de nitrógeno no hubo diferencias en las concentraciones de fósforo en suelo, sin embargo al aplicar una fertilización fosfatada estas concentraciones aumentan (Altansuvd, 2014).

Por su naturaleza la materia orgánica del suelo se favorece al regar con agua residual y aplicar dosis altas de nitrógeno, aunque los resultados obtenidos en ambos tratamientos fueron menores a los de la muestra inicial de suelo, este comportamiento se debió a la etapa



en la que se encontraba el cultivo, en el que la materia orgánica se encontraba en proceso de descomposición, favoreciendo la fijación y absorción de fósforo (Ohno, 2010; Ohno,2007), de acuerdo a Hue (1990) la materia orgánica aumenta la absorción y el crecimiento del cultivo.

El nitrógeno juega un rol importante en la productividad de los cultivos, su deficiencia es uno de los principales factores que limitan el rendimiento, principalmente de los cereales (Mosee, 2006), los resultados mostraron que las dosis de fertilización alteran la presencia de nitrógeno en el suelo, en ambos tipos de fertilización el nitrógeno se ve favorecido al aplicar agua residual (Muhammad, 2015), Los resultados del incremento de nitrógeno al aplicar una fertilización nitrogenada alta, coinciden con los reportados por (Hammad, 2011) quien observo que el desarrollo y crecimiento del cultivo de maíz se ve favorecido por las dosis de nitrógeno. Existe evidencia de que al incrementar la dosis de nitrógeno a 300 kg el rendimiento aumenta positivamente (Khaliq, 2009).

### **Conclusión**

Por sus características el agua residual tratada aporta mayor cantidad de nutrientes al suelo, sin embargo, al aplicar fertilizantes no toda esta aportación se ve asimilada en el cultivo. El suelo irrigado con agua residual tratada mostro un mayor aporte nutrimental, las concentraciones dependieron de las profundidades del suelo.

En el caso del nitrógeno se comprobó que las dosis de fertilización no necesariamente aportan más disponibilidad del nutriente al suelo, lo mismo en el caso del fósforo.

**V. APORTE NUTRIMENTAL EN MAÍZ FORRAJERO IRRIGADO CON  
AGUA RESIDUAL TRATADA Y DE POZO EN LA COMARCA  
LAGUNERA, MÉXICO.**

**Introducción**

México cuenta con 460 000 000 m<sup>3</sup> de agua utilizables, la mayor parte de esta agua se encuentra localizada en el sur este de país, sin embargo el centro norte del país se encuentra en déficit hídrico (Mejia, 2013). Las prácticas agrícolas han provocado la pérdida de la calidad del agua subterránea por el efecto negativo de la producción agrícola (CONAGUA, 2007). En el país existen 653 reservas de fuentes de agua de las que 104 han sido sobre explotadas, el 78.8% se ha destinado al riego agrícola (CONAGUA, 2011). La región de la Comarca Lagunera es la cuenca lechera más importante del norte de México y se encuentra localizada en el norte de México en donde la extracción del agua subterránea ha sido insostenible desde 1940.

En esta región se producen 1,291 ton de forrajes al año la cual utiliza 2,685 m<sup>3</sup> (SAGARPA, 2013) debido a que esta zona está situada en una zona árida (240 mm de precipitación al año) hay una escasez de agua para el uso productivo y doméstico (FAO, 2010). La falta de un manejo eficiente junto al cultivo intensivo de forrajes ha impactado a los nutrientes en el suelo, ocasionando su empobrecimiento.

El exceso de los fertilizantes aplicados termina evaporándose, lixiviándose o infiltrándose en los acuíferos, el flujo de los ríos y mares, afectando la composición del agua y a la flora y fauna nativa (Lougheed, 2011).

El agua residual o agua residual tratada contiene un considerable aporte nutrimental, generalmente de nitrógeno, materia orgánica y otros nutrientes, los cuales incrementan y mejora la producción agrícola (Liqā Raschid-Sally, 2010). De acuerdo a FAO (2010) el reciclaje del agua residual es una alternativa sustentable (Abdelraham, 2011) y su uso en la irrigación agrícola puede ayudar a mitigar los problemas de escasez y al mismo tiempo reducir su contaminación.

La importancia del manejo eficiente y responsable del agua residual puede generar una opción favorable para los productores como la reducción de los costos generados por la extracción del agua subterránea, puesto que el costo del agua residual es menor. Esto es de vital importancia para la generación de una base de información científica válida en el uso del agua residual tratada. Los objetivos de este trabajo fueron: 1) comparar la producción de maíz forrajero irrigado con agua residual tratada y agua de pozo a varias dosis de fertilización, 2) determinar el aporte nutrimental de cada tratamiento en planta.

### **Materiales y métodos**

**Área de estudio.** El experimento fue establecido en el campo experimental del instituto nacional de investigaciones forestales agrícolas y pecuarias (INIFAP) localizado en Gómez Palacio, Durango (103° 26' 54.63" W, 25° 35' 17.19" N). El cultivo establecido fue maíz forrajero, la semilla fue una variedad híbrida de la marca Asgrow variedad Ocelote. La fecha de siembra fue el 25 de julio, se sembró a una distancia de 5 plantas por metro para obtener una población de 62,500 plantas por hectárea. La fecha de cosecha fue en octubre. El tipo de suelo fue litosol, generalmente calcáreo de origen sedimentario (Cervantes, 2007). El agua residual tratada se obtuvo de la planta tratadora Oriente, ubicada en Gómez Palacio.

El agua de pozo usada se obtuvo del pozo propiedad del inifap CENID-RASPA. En el Cuadro 5.2 se muestran los resultados de la caracterización de ambos tipos de agua.

Se aplicó una fertilización a base de nitrógeno y fósforo, los fertilizantes utilizados fueron: MAP y sulfato de amonio, el experimento fue un diseño de bloques al azar con factorial incompleto el cual consto de 7 tratamientos a diferentes dosis de fertilización, como se muestra en el Cuadro 5.1.

Antes del establecimiento del experimento se realizó una caracterización de suelo, este suelo nunca antes había sido irrigado con aguas residuales o agua residual tratada, los resultados de esta caracterización se encuentran en el Cuadro 5.3.

**Diseño experimental.** El diseño experimental que se estableció fue en bloques con arreglo de parcelas divididas en el que las parcelas grandes fueron para los tratamientos (AP, AR) y las parcelas chicas para las dosis de fertilización. El experimento consto de 7 tratamientos a distintas dosis de fertilización, en total cada parcela consto de 4 bloques que representaban las repeticiones de los tratamientos.

**Cuadro 5. 1 Dosis de fertilización aplicadas.**

Tratamiento	N kg ha <sup>-1</sup>	P2O5 kg ha <sup>-1</sup>
1	0	50
2	100	50
3	200	50
4	300	50
5	300	100
6	300	150
7	300	0
8	0	0

**Variables evaluadas.** En ambos tratamientos se evaluaron los siguientes nutrientes dentro de la planta: nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), boro (B), calcio (Ca), magnesio (Mg), cobre (Cu), hierro (Fe) y zinc (Zn).

**Preparación de muestras.** Las muestras fueron divididas en dos partes: tallo y hojas, y grano. Cada muestra paso por un proceso de preparación, primero fueron lavadas con agua para remover impurezas y reposadas en una solución de ácido nítrico al 10%, posteriormente se enjuagaron con agua destilada para quitar los residuos. Se secaron a temperatura ambiente, después se metieron en una estufa de secado a  $60\pm 5^{\circ}\text{C}$  por 48 hr, las muestras se molieron en un molino de acero inoxidable de 2 mm.

**Análisis de muestras.** Los análisis de nitrógeno se realizaron con un macro kjendhal, la determinación de los otros nutrientes se hicieron a partir de digestiones de ácido nítrico perclórico (60:20), fósforo se determinó con una solución de metabanadato, molibdato de amonio y 5 ml de la digestión con ácido perclórico, la determinación se realizó con un espectrómetro de foto colorimetría modelo Genesys 10 UV-S.

Micronutrientes (Zn, Cu y Fe) se analizaron a partir de la digestión de ácido perclórico (60:20) con oxido de lantano y se leyeron en un espectrómetro de absorción atómica. Los cationes (Ca, Mg y K) se determinaron a partir de la digestión de ácido perclórico en un tubo de ensayo con agua destilada, las muestras se leyeron en espectrómetro de absorción atómica modelo Perkin Elmer AAnalyst 700.

**Análisis estadístico.** Se realizaron análisis de medias y pruebas de Tukey. El análisis estadístico se realizó con el programa SAS versión 9.3.

## Resultados

Los Cuadros 5.2 y 5.3 contienen los valores de las muestras de iniciales de suelo y agua tomada antes del establecimiento del experimento, en la caracterización del agua puede apreciarse que el agua residual tiene un mayor aporte de nitrógeno (2.2 %), fósforo (8.41%) y potasio (0.90 mmol<sup>-1</sup>). En suelo no se encontraron diferencias en las concentraciones de nitrógeno, fósforo y cobre se concentraron a los 30 cm, las demás propiedades no variaron en los perfiles estudiados.

**Cuadro 5. 2. Caracterización de agua residual y de pozo utilizada en el experimento.**

Agua	pH	CE (dS m <sup>-1</sup> )	N %	P %	K Mmol L <sup>-1</sup>	Mg mmol L <sup>-1</sup>	Cu mg L <sup>-1</sup>	Fe mg L <sup>-1</sup>	Zn mg L <sup>-1</sup>
Residual tratada	7.57	2.18	12.22	8.41	0.90	0.05	0.24	0.06	0.05
Pozo	8.57	0.37	0.78	0.79	0.09	0.09	0.07	0.20	0

**Cuadro 5. 3. Caracterización del suelo antes del establecimiento del experimento.**

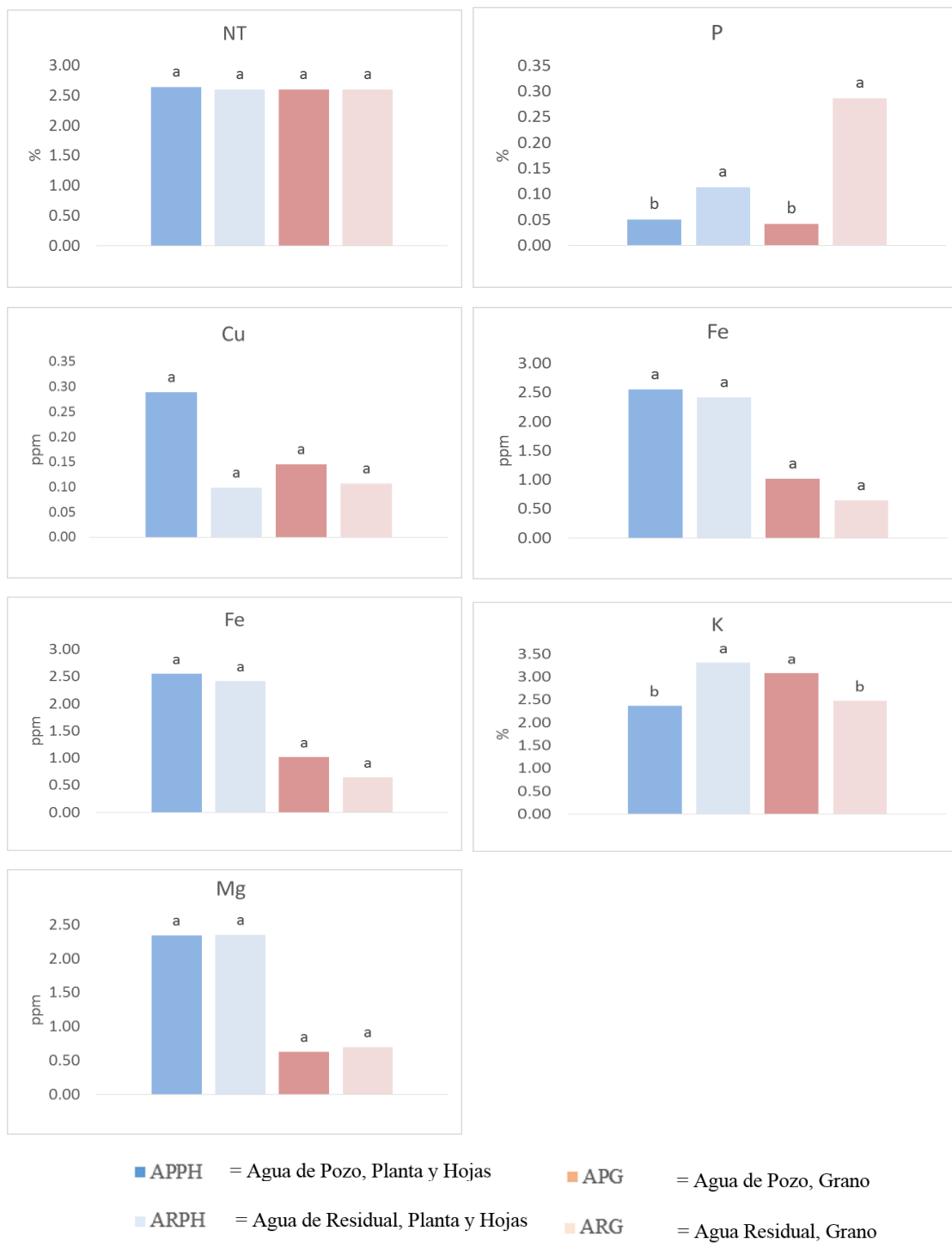
Profundidad (cm)	pH	CE (dS cm <sup>-1</sup> )	N %	P %	Mg mmol L <sup>-1</sup>	K Mmol L <sup>-1</sup>	Cu mg L <sup>-1</sup>	Fe mg L <sup>-1</sup>	Zn mg L <sup>-1</sup>
7.5	7.3	1.3	0.2	3.7	4.2	15.5	0.6	0.4	2
15	7.8	1.2	0.2	3.4	4.1	12.4	0.3	0.3	1.9
30	7.6	1.1	0.2	4.2	3.6	10.3	1	0.4	1.6
60	7.4	1.1	0.2	2.9	3.7	12.9	0.5	0.4	1.4
90	7.2	2.1	0.2	2.3	3.4	12.9	0.4	0.3	1.3

**Nitrógeno variable.** Los resultados de los análisis indican que el tipo de agua aplicada tuvo efectos significativos ( $P < 0.05$ ) en P y K en las dos partes analizadas, en N, Cu, Zn y Mg no se presentaron efectos por el tipo agua, Fe presento efectos ( $P < 0.05$ ) por el tipo de agua solamente en grano.

**Cuadro 5. 4. Probabilidades de significancia de nutrientes analizados en la parte vegetativa y en granos, fertilizados con P 50 kg ha<sup>1</sup> y dosis variables de nitrógeno.**

	Tallo y hojas			Grano		
	Tagua	N	Tagua*N	Tagua	N	Tagua*N
N	---	---	---	---	---	---
P	0.0114	---	---	0.0016	---	---
Cu	---	---	---	---	---	---
Fe	---	---	---	0.017	---	---
Zn	---	---	---	---	---	---
K	0.0045	---	---	0.36	0.012	0.008
Mg	---	0.0281	0.0198	---	---	---

La Figura 5.1 muestra los aportes nutrimentales del tipo de agua aplicada asimilados por el cultivo, al fertilizarse con P 50 k ha<sup>-1</sup> y dosis variables de nitrógeno. Los resultados mostrados en el Cuadro 5.3 indican que el agua residual contiene altas cantidades de nitrógeno, que sin embargo no se ven asimilados por la planta, ya que no hubo diferencias significativas entre el tipo de agua aplicada, para los nutrientes cobre, hierro y zinc no mostraron diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) por el tipo de agua, en fósforo las plantas regadas con agua residual mostraron un mayor aporte ( $P < 0.05$ ) que aquellas regadas con agua de pozo, sin embargo las muestras regadas con agua residual incrementaron las concentraciones de manganeso y potasio en tallo y hojas y grano.



**Figura. 5.1. Efectos por tipo de agua en micronutrientes al aplicar fertilización de P 50 kg ha<sup>-1</sup> y dosis variables de nitrógeno (letras distintas indican diferencias significativas entre tipos de aguas, para un mismo órgano de la planta).**

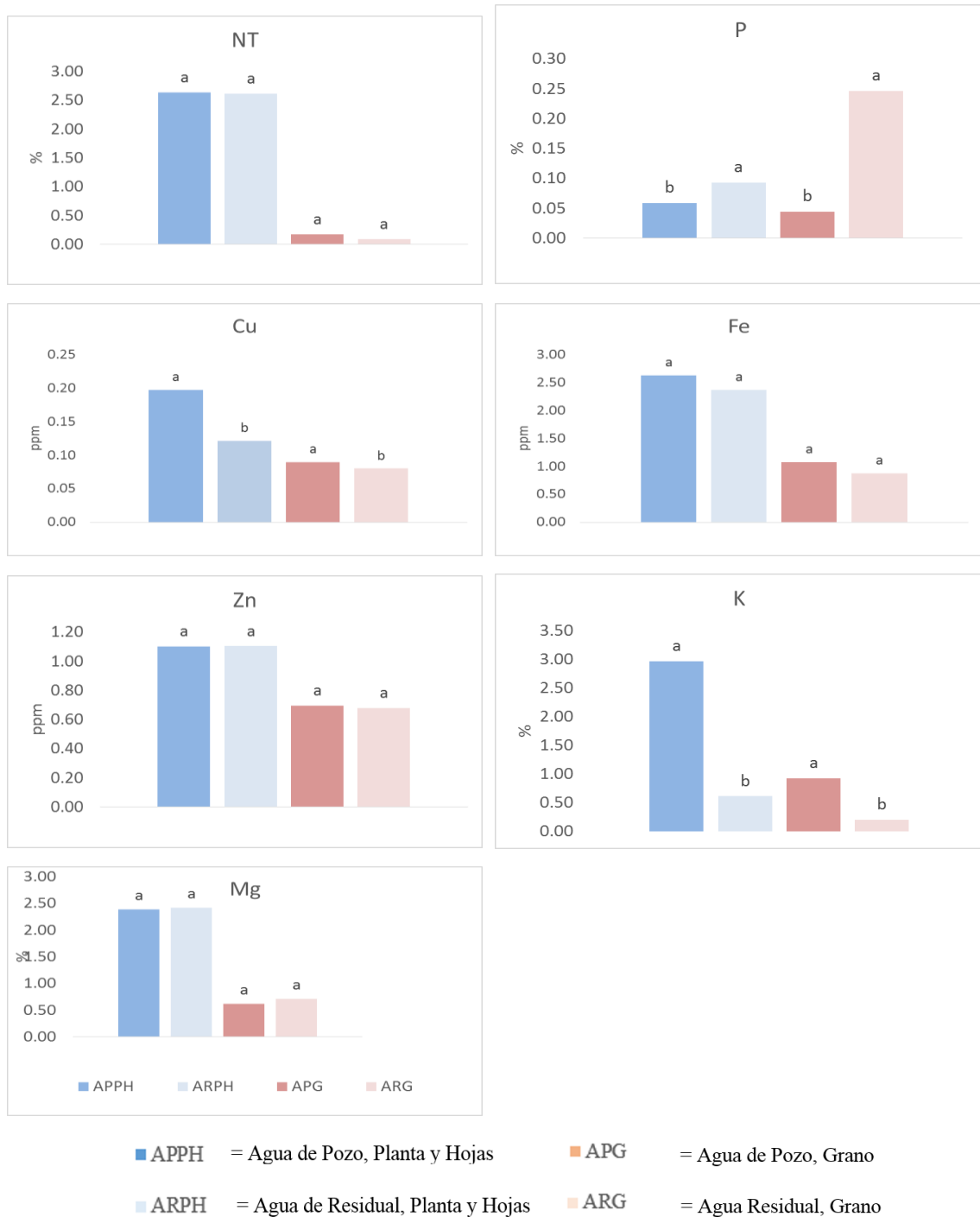


**Nitrógeno 300 kg ha<sup>-1</sup>.** De acuerdo a las probabilidades obtenidas al aplicar una fertilización de nitrógeno a 300 kg ha<sup>-1</sup> y dosis variables de fósforo no hay diferencias en el aporte de nitrógeno, hierro, zinc y magnesio por el tipo de agua aplicada en grano y tallo y hojas, la asimilación de fósforo y potasio en la planta presentaron diferencias por tipo de agua en granos, tallos y hojas. Los tallos y hojas presentaron diferencias significativas (P<0.05) de cobre.

**Cuadro 5.5. Probabilidades de significancia de nutrientes analizados en la parte vegetativa y en granos, fertilizados con N 300 kg ha<sup>-1</sup> y dosis variables de fósforo.**

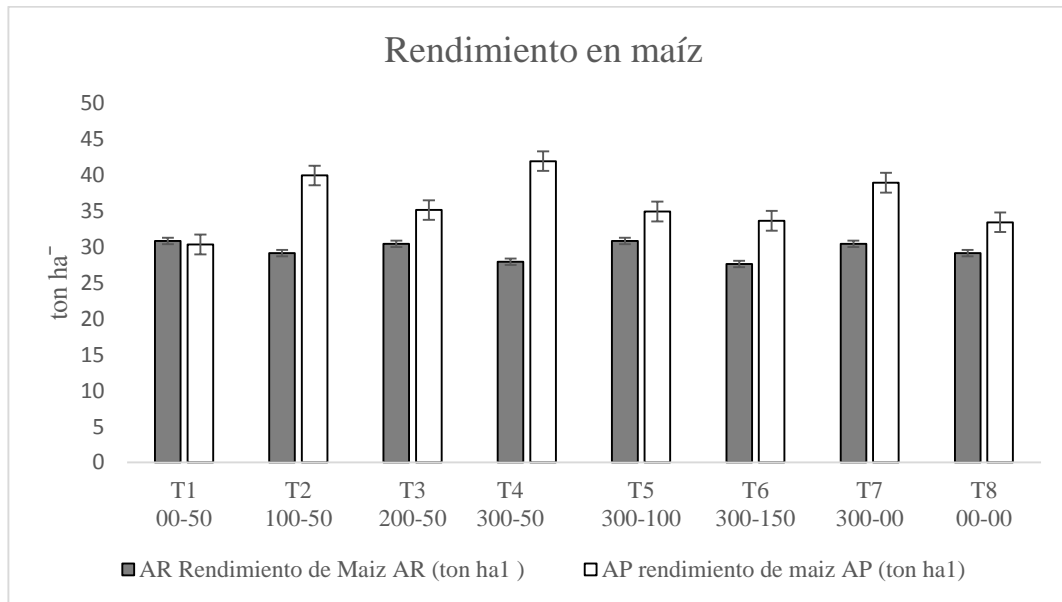
	Tallo y hojas			Grano		
	TAgua	P	TAgua*N	TAgua	N	TAgua*N
N	---	---	0.0004	---	---	---
P	0.0007	0.038	---	0.0001	0.0003	0.0004
Cu	0.00018	---	---	---	---	0.0111
Fe	---	---	---	---	---	0.0369
Zn	---	---	---	---	---	---
Mn	0.0001	---	---	0.0001	---	---
K	0.009	---	---	0.0001	---	---
Mg	---	0.0014	---	---	---	---

Al fertilizar el cultivo con dosis de nitrógeno a 300 kg ha<sup>-1</sup> y dosis variables de fósforo no hay diferencias (P<0.05) en el aporte de nitrógeno, magnesio, zinc y hierro tanto en grano como en tallo y hojas en los dos tipos de agua usada. La asimilación de fosforo en la planta se fue beneficiada al regar con agua residual en ambas partes analizadas. El mayor aporte de potasio (P<0.05) en toda la planta se obtuvo al regar el cultivo con agua de pozo, cobre solamente presentó incremento (P<0.05) en el tallo y hojas al regarse con agua de pozo,



**Figura. 5.2. Efectos por tipo de agua en micronutrientes al aplicar fertilización de N 300 kg ha<sup>-1</sup> y dosis variables de fósforo (letras distintas indican diferencias significativas entre tipos de aguas, para un mismo órgano de la planta).**

**Rendimiento.** De acuerdo a los resultados obtenidos (Figura 5.3) el cultivo irrigado con agua de pozo tuvo un rendimiento mayor ( $P>0.05$ ) que en el que se rego con agua residual, el tratamiento que mostro un aporte mayor fue al aplicar  $300 \text{ kg ha}^{-1}$  de N y  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de P, el tratamiento donde solo se aplicó nitrógeno  $300 \text{ kg ha}^{-1}$ , también mostró un aporte alto, al igual que el tratamiento donde se aplicaron  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de N y  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de P, en contraste con estos resultados al compararlos con el rendimiento de la muestra testigo, si bien el rendimiento de la muestra fue menor respecto a los tratamientos mencionados, fue similar al resto de los tratamientos, sobre todo en los de agua residual en los que el nitrógeno portado por esta agua no tuvo efectos en el rendimiento del cultivo.



**Figura. V 3. Rendimiento en maíz forrajero (peso fresco) irrigado con distintas dosis de fertilización. Tratamientos comparados con una muestra testigo (N 00- P 00).**

**Cuadro 5. 6. Efectos en la asimilación de nutrientes al aplicar distintas dosis de fertilización.**

Nutriente	P 50 kg ha <sup>-1</sup> variable	N 300 kg ha <sup>-1</sup> P variable
N	AP=AR	AP=AR
Mg	AP=AR	AP=AR
Fe	AP=AR	AP=AR
Zn	AP=AR	AP=AR
P	AP>AR	AP>AR
K	AR>AP	AP>AR
Cu	AP=AR	AP>AR

**Discusión**

La asimilación de nutrientes en la planta se altera al variar las dosis de fertilizantes, el Cuadro 5.6 muestra un comparativo de la asimilación nutrimental en los dos tratamientos de fertilización aplicados (P 50 kg ha<sup>-1</sup> N variable y N 300 kg ha<sup>-1</sup> P variable). En general la asimilación de nitrógeno, magnesio, hierro y zinc en la planta no se ve alterada por el tipo de agua aplicada y la dosis de fertilización.

Contrario a lo reportado por diversos autores en el caso del nitrógeno no hubo diferencias ( $P < 0.05$ ) entre los tratamientos, ni en el rendimiento del cultivo sin embargo si tuvo efectos en la asimilación de nutrimentos, tal como reporto Komljenovic (2015) la precipitación, temperatura y distribución son factores que influyen severamente en el rendimiento del cultivo, pues pueden beneficiar o perjudicarlo, en nuestro caso la presencia de precipitación durante el desarrollo del cultivo fue un factor que pudo contribuir a la pérdida y asimilación de nitrógeno. Aunque existe varios factores que pudieron haber contribuido a este comportamiento.

La disponibilidad de cobre por la planta se ve favorecida al regar con agua de pozo y dosis altas de nitrógeno (300 kg ha<sup>-1</sup>) este comportamiento es debido a que el agua residual aporta 12.2% de N más del que se aplica con la fertilización, este exceso de nitrógeno provoca

que la asimilación de cobre disminuya (Amoutsidis, 2009), la asimilación también es influenciada por el pH, ya que su disponibilidad disminuye conforme el pH aumenta de 7.

El potasio en la planta al aplicar dosis variadas de nitrógeno tiene mayor asimilación por el agua residual y al aplicar dosis variadas de fósforo su asimilación se beneficia al regar con agua de pozo, de acuerdo a los rangos de suficiencia los resultados se consideran bajos para el soporte del crecimiento del cultivo (Owino, 2015; Okalebo, 2002), esta situación también puede ser un factor limitante para la respuesta del cultivo al fósforo y a otros factores de crecimiento (Owino, 2015).

La presencia de fósforo en ambos tratamientos es mayor al regar con agua de pozo. Aunque de acuerdo a los análisis las aguas residuales contienen un aporte significativo de fósforo, este no se vio asimilado, lo cual se comprueba al comparar los resultados con los rangos de suficiencia para maíz forrajero de Campbell (2000) el cual debería de ser de 3-5%, esta situación fue ocasionada por los valores de los pH, ya que el rango óptimo para una buena asimilación de fósforo es de 6-7 (HUCK, 2015), rango que se encuentra por debajo de los aportados por ambos tipos de agua. Por otra parte en granos se tuvo una asimilación significativa ( $P < 0.05$ ) cuando se regó con agua de pozo, en general agua de pozo tuvo un aporte de fósforo mayor en el cultivo, el cual se ve reflejado en el rendimiento.

Algunos autores reportan que al regar el cultivo con aguas residuales tratadas el rendimiento, los costos de producción y la calidad del cultivo aumenta conforme la aplicación de fertilizantes químicos disminuye (Esmailian, 2008; Asgari, 2007; Jimenez, 1995) sin embargo en nuestro experimento no se presentó ese comportamiento (Cuadro 6), lo cual es debido a que se requiere de tiempo para que se presenten cambios en la asimilación de los nutrimentos por parte del suelo y cultivo (Alkhamisi, 2011).

## **Conclusión**

El agua residual contiene cantidades altas de nitrógeno y fósforo, sin embargo no toda esta contribución se ve aprovechada por el cultivo. A pesar de que las aguas residuales tratadas son ricas en nutrientes, no todos fueron aprovechados por la planta, lo cual se vio reflejado en el rendimiento. Sin embargo el riego con aguas residuales tratadas resulta beneficioso para el productor, pues al regar sin la aplicación de fertilizantes se obtiene un buen rendimiento.

Para futuros trabajos recomendamos estudios de dos o más ciclos de cultivo, también sugerimos el uso de aguas residuales tratadas y aguas residuales sin tratar.

## VI. LITERATURA CITADA

- Abdelraham, H. A., Alkhamisi, S.A., Ahmed, M. and Ali H. 2011. Effects of treatment wastewater irrigation on element concentration in soil and maize plants. *Soil Science and Plant Analysis*, 2046-2063.
- Aghtape, A.A., Ghanbari, A., Sirousmehr, A., & Siah sar, B. 2011. Effect of irrigation with wastewater and foliar fertilizer application on some forage characteristics of foxtail millet (*Setaria italica*). *Plant physiology and biochemistry*, 3:34-42.
- Alkhamisi, S. A., abdelrahman, H. A., Ahmed, M. & Goosen, M. F. A. 2011 Assessment of reclaimed water irrigation on growth, yield and water use efficiency of forage crops. *Appl Water Sci*, 1: 57-65.
- Altansuvd, J., Nakamaru, Y., Kasajima S. 2014. Effect of long-term Phosphorus fertilization on soil Se and transfer of soil Se to crops in northern Japan. *Chemosphere*, 107, 7-12.
- Amoutsidis, E., Lazaridou M., Papadopoulos I., Spanos, T., Papathanasiou, F., Tamoutsidou, M., Mitlianga, P. & Vasiliou G. 2009. The effect of treated wastewater on soil properties, plant tissue composition and biomass productivity in berseem clover and corn. *Journal of food, agriculture and environment*, 782-786.
- Anjib, K. B., Arvid K. S., Singh, M. V. and Ravi, H W. 2015. Yield and Zinc, Copper, Manganese and Iron concentration in Maize (*Zea mays* L.) grown on vertisol as influenced by Zinc application from various Zinc fertilizers. *Journal of Plant Nutrition*. 1544-1557.
- Asano T., Cotruvo J. 2004. Groundwater with reclaimed municipal wastewater: health and regulatory considerations. *Water Research* (Elsevier) 38: 1941-1951.
- Asano, T., Burton, F. L., Leverenz, H., Tsuchihashi, R y Tchobanoglous, G. 2007. Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications. *McGraw-Hill*.
- Asgari, K., Najafi, O., Soleyman, A. & Larabi, R. 2007. Effects of treated municipal wastewater on growth parameters of corn in different irrigation conditions. *J. Biol. Sci.*, 7, 1430-1435.
- Ashley, K. & Cordell, D. 2011A brief history of phosphorus: from the philosopher's stone to nutrient recovery and reuse. *Chemosphere*, 84, 737-746.
- Bache, B. W., Williams, E. G. 1971. A phosphate sorption index for soils. *Journal of Soils Science*, 289-301.
- Beauchemin, S. RR Simard, Cluis, D. 1998. Form and concentration of phosphorus in drainage waters of twenty-seven tile-drained soils. *Journal Environment Qual.*, 721-728.

Beekman, G., Cruz, S. M., Espinoza, N., Garcia, B. E., Herrera, T. C., Medina, H. D., Williams, D., Garcia-winder, M. 2014. *Agua, alimento para la tierra*. San Jose, Costa Rica: Instituto interamericano de cooperación para la agricultura.

Campbell, C. Ray. 2000. *Reference sufficiency ranges for plants analysis in the southern region of united states*. North Carolina: North Carolina department of agriculture and consumer services agronomic division.

CAST. 2012. *Water and land issues associated with animal agriculture: a U.S. perspective*. U.S.A.

Cervantes, R., M., C., Franco, G., A., M. 2007. *Diagnostico ambiental de la comarca lagunera*. Mexico: Facultad de filosofia y letras UNAM.

Chalkoo, S., Sahay, S., Inam, A. & Iqbal s. 2014. Application of wastewater irrigation on growth and yield of chilli under nitrogen and phosphorus fertilization. *Journal of plant nutrition*, 37: 1139-1147.

CNA. 2004. *Estadísticas del agua en México*. Mexico: Comision nacional del agua.

CONAGUA. 2009. *Actualizacion de la disponibilidad media anual de agua subterranea acuífero (0523) principal-region Lagunera*. México: Comision nacional del agua, subdireccion general técnica.

SEMARNAT. 2011. *Atlas del agua en Mexico*. México. Recuperado el 18 de abril del 2016, de [www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/SGP-18-11.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/SGP-18-11.pdf)

CONAGUA. 2012. *Estadísticas del agua en México*. Mexico: Comision Nacional del Agua.

CONAGUA. 2011. *Estadísticas del agua en México*. Mexico: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA. *Estadísticas del Agua en México*. 2007. Mexico. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAGUA. 2007. *Estadísticas del Agua en México*. Comision Nacional del Agua, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAGUA. 2007. *Inventario nacional de plantas municipales de potabilizacion y tratamiento de aguas residuales en operacion*. Mexico: Coordinacion general de atencion institucional, comunicación y cultura de la agua de la Comision Nacional del Agua.

NOM-014\_CONAGUA 2003, *Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada*. Mexico: CONAGUA, 2003.

CONAGUA. 2008. *Programa Nacional Hidrico 2007-2012*. Mexico: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAGUA. (2014). WWW. [conagua.gob.mx](http://conagua.gob.mx). (conagua, Ed.) Recuperado el 18 de Abril de 2016, de WWW. [conagua.gob.mx](http://conagua.gob.mx): <https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&>



uact=8&ved=0ahUKEwjQiJKp3p7MAhWkm4MKHagFCVsQFgggMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.conagua.gob.mx%2FCONAGUA07%2FNoticias%2FSGP-2-14Web.pdf&usg=AFQjCNFufrT6SMkMWG70CNoo7w0sHNTuDw&sig2=qCxbUVE

Cordell, D. 2009. The history of phosphorus global food security and food for thought. *Global environmental Change*, 292-305.

Cordell, D., Dranget, J.-O. 2009. Global Environmental Change. *Nature*, vol. 130, 1-13.

de la Peña, M. E., Ducci, J., Zamora, V. 2013. *Tratamiento de aguas residuales*. México: Banco Interamericano de Desarrollo.

Díaz C., R.E. , B. P. , L. C., Alatorre C., L.C., Sánchez F., E. 2013. Presión antropogénica sobre el agua subterránea en México: una aproximación geográfica. *Investigaciones Geofráficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, Núm. 82, pp. 93-103.

Djalovic I., Cvijovic M., Milosevic D., Komljenovic I. 2008. Nitrogen and phosphorus impacts on wheat nutritional status. *Alps-Adria Scientific Workshop*, 695-697.

Dudgeon, D., Arthington A.H., Gessner M. O., Kawabata., Nowler D. J., Leveque C, Naiman R. J., Prieur-Richard A., Soto D. 2006. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. *Biology*, 163-182.

Esmailiyan, Y., Heidari, M. & Ghanbari, A. 2008. Effect of municipal wastewater with manure and chemical fertilizer on grain yield and yield components in corn. *J. Agron*, 7, 227-280.

FAO. 2010. *THE WEALTH TO WASTE, The economics of wastewater use in agriculture*. Roma, Italy: FAO.

FAO. 1985. *FAO fertilizar and plant nutrition bulletin* 8. Rome, Italy: FAO.

FAO. 2010. <http://www.fao.org>. septiembre 6, <http://www.fao.org/news/story/es/item/44983/icode/> (accessed febrero 15, 2014).

Figuroa, V.U., Nuñez, H. G., Reta, S.D. G., Flores, L.H.E. 2015. Regional nitrogen balance in the milk-forage production in the system in the Comarca Lagunera. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 6 (4), 377-392.

Galavi, M., Jaalai, A., Mousavi, S.R. & Galavi H. 2009. Effect of treated municipal wastewater on forage yield, quantitative and qualitative properties of sorghum (*S. bicolor* Speed feed). *Asian J. plant Sci.*: vol 8, 89-94.

García, A. C. Espinoza. 2010. *Calidad, una limitante mas para la disponibilidad de agua*. Mexico: UNAM.

García, C. I. (2007). *Sistemas de riego*. Porrúa, México.

Ghambari, A., Abedikoupai, Jy. 2007. Effect of municipal wastewater irrigation on yield and quality of wheat and some soil properties in Sistan zone. *J. Sci. Technol. Agric. Nat. Resour.*, 10, 59-74.

- Good, A. G., J. D. 2007. Engineering nitrogen use efficiency with alanine aminotransferase. *Canadian Journal of botany*, pags. 252--262.
- Guerrero Tanni, Rives Celeste, Rodriguez Alejandra, Saldivar Yolitzi, Cervantes Virginia. 2009. *El agua en la ciudad de Mexico* . Mexico: Revista Ciencias de la UNAM.
- Hammad, H.M.,Khaliq T., Farhad W. and Mubeen M. 2011. Optimizing rate of nitrogen application for higher yield and quality in maize under semiarid enviroment. *Crop tEnviromen*, 38-41.
- HUCK, Y, C., Osamanu H. A. & Nik M. A.M. 2015. Improving phosphorus availability, nutrient uptake and dry matter production of *Zea mays* L. on a tropical acid soil using poultry manure biochar and pineapple leaves compost. *Experimental agriculture* , 1-19.
- Hue, N. V. 1990. Interaction of Ca (H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> applied to an oxisol and previous sludge amendment: soil and crop response. *Cominications in soil science and plant analisys*, 21:61-73.
- Hussain S., PKhaliq A., Huang J., Cui K., Nie L. 2015. Rice management interventions to mitigate greenhouse emissions: a review. *Environ Sci Pollut Res*, 22:3342-3360.
- Vidal, S,E., Franco Lopez J. 2009. Impacto ambiental, una herramienta para el desarrollo sustentable..Mexico: AGT Editor, S.A.
- INEGI. 2011.*Censo de poblacion y vivienda 2011*. México: INEGI.
- Jasinski, SM. 2011. Phosphate rock. *Washington, DC:U.S. Geological survey*. <http://tinyurl.com/4x2fapq>.
- Jimenez, B. y Asano, T. 2008. Water reclamation and reuse around the world. *Water Reuse: An International Survey of Current Practice, Issues and Needs* (IWA publishing), 3-26.
- Jimenez, B., et.al. 2013. *Watewater, sludge and Excreta use in developing countries an overview*. international development research center.
- Jimenez, C. B. 2010. Water management: The Data Gap. *Nature*, 233-234.
- Jimenez, C., B.,. 1995. Wastewater reuse to increase soil productivity. *Water Sci. Technol.*, 32, 173-180.
- Ju, X. 2006. Nitrogen deposition in agroecosystems in the Beijin area. *Agriculture Ecosystems and Enviroment*.
- Khaliq, T.,Ahmad, T. A., Hussain A. and Ali, M. A. 2009. Maize hybrids response to nitrogen rates at multiple locations in semiarid enviroment. *Pakistan Journal Botanical*, 41: 207-224.
- Komljenovic, I., Markovic, M. & Djurasinovic. 2015. Response of maitive phosphorus fertilizationze to liming and ameliora. *Novenyterm*, 64: 35-38.

Lazarova, V y Banri, A. 2015. Water reuse for irrigation: Agriculture, landscape and turf grass. *DRC Press*.

*Ley de aguas nacionales*. 2014. Mexico. Recuperado el 28 de septiembredel 2015 de: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/ver.aspx?grupo=8&articulo=4351>

Liqa Raschid-Sally, M. R. 2010. *Wastewater irrigation and health*. International Water Management Institute Development Centre.

Lougheed, T. 2009. Phosphorus paradojic. *Enviromental Health Perspectives* (Salud pública de México), Vol. 119, pags. A208-A213.

Masciandaro, G., Peruzzi, E.,Doni. S and Macci, C. 2014. Fertigation with wastewater and vermicompost: Soil biochemical and agronomic implications. *Pedosphere*, 24 (5): 625-634.

McDowell, R.W. 2015. Treatment of pasture topsoil with alumn to decrease phosphorus losses in surface drainage. *Agricultute, Ecosystems and Enviroment*, 178-182.

Mejia, M. E., Siebe, C.,Pailles C.A. 2013. *Produccion de aguas servida, tratamiento y uso en Mexico*. Mexico: Proyecto de desarrollo de capacidades para el uso seguro de aguas servidas en agricultura ( FAO,WHO, UNEP, UNU-INWEH,UNW-DPC,IWNI e ICID).

Mohammad, M,J. and Mazahareh N. 2003. Changes in soil fertility parameters in respose to irrigation of forage crops with twicw treated wastewater. *Communications in soil science and plant analysis*, 34 (9-10): 1281-1294.

Mohammad, M. J.- Hinnawi, S. & Rousan L.2007. Long term effect of wastewater irrigation on soil chemical prperties on golf course fairways. *Agronomy journal*, 721, 717-721.

Mosee, S.B., Feil B., Jampatong S., Stamp P. 2006. Effects of pre-anthesis drought, nitrogen fertilizer rate, and variety on grain yield components, and harvest index of tropical maize. *Agricultural water manage*, 81: 41-58.

Muhammad, A. I., Zahoor A.,QAisr M.,SherA.,Miah, A. M. 2015.Optimizing Nitrogen Level to Improve Growth and Grain Yield of Spring Planted Irrigated. *Journal of advanced botany and zoology*, Vol 2.

NOM-001-ECOL-1996. *Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996 QUE ESTABLECE LOS LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN AGUAS Y BIENES NACIONALES*. Mwxico, 1996.

Ohno, T, & Amirbahma, A. 2010.Phosphorus availability in boreal forestsoils: a geothermical and nutrient uptake modeling approach. *Geoderma*, 155: 46-54.

Ohno, T., Fernandez, I. J., Hiradarte, S. & Sherman, J. F. 2007. Effects of soil acidifications and forest type on water soluble soil organicmatter properties. *Geoderma*, 140: 176-187.

- Okalebo, J. R., Gathua, K. W., Woome, P. L. 2002 *Laboratory methods of soil and plants analysis: a working manual*. Africa Nairobi, Kenya: TSBF:CIAT and SACRED.
- Ortiz, H.M.L., Gutierrez R M.E., Sanchez S.E. 1995. Propuesta de manejo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de la ciudad industrial del valle de Cuernavaca, estado de Morelos, Mexico. *Revista Inter. Contam. Amb. 11 (2)*, 105-115.
- Owino, C.O., Owuor, P. O. & Sigungaa D. O. 2005. Elucidating the causes of low phosphorus levels in ferralsols of Siaya County, western Kenya. *Journal of soil science and environmental management*, 2015: 260-267.
- Peng, S. Z. 2007. Nitrogen and phosphorus leaching losses from paddy fields with different water and nitrogen managements. *Paddy and water environment*.
- Qadir M. y Scott A. C. 2012. Non-Pathogenic Trade-Offs of wastewater irrigation. *Wastewater irrigation and health* (International Water management Institute), 101-126.
- Qian, Y. L. & Meham B. 2005. Long-term effects of recycled wastewater irrigation on soil chemical properties on golf course fairways. *Agronomy journal*, 721, 717-721.
- Ramirez, J. Peña. 2004. *El agua, espejo de los pueblos*. Mexico: UNAM.
- Raschid-Sally, L. y Jayakody. P. 2008. Drivers and Characteristics of Wastewater Agriculture in Developing Countries: Results from a Global Assessment, Colombo Sri Lanka. *international Water Management Institute*.
- SAGARPA. 2013. *Anuario estadístico de la producción agropecuaria 2012*. Durango: SAGARPA.
- SAGARPA, 2007. Mexico: *Expectativas de producción y demanda de granos forrajeros*.
- Sánchez, C. I., Delgado R. G., Esquivel, A. G., Bueno, H. P., Roman, L.A. (2014). Huella hídrica en la Comarca Lagunera. En U. A. Metropolitana, Aplicaciones del enfoque de HH para el análisis de impactos en sectores y regiones. (págs. 269-289). México: AAM.
- Sayed, R.M., Mohammad, G and Hamdollah E. 2013. Effects of treated municipal wastewater on fluctuation trend of leaf area index and quality of maize (*Zea mays*). *Water Science & Technology*, 797-801.
- Schipper, L. A., Williamson, J. C., Kettles, H. A., & Apeir, T. W. 1996. Impact of land-applied tertiary-treated effluent on soil biochemical properties. *Journal of environmental quality*, 25, 1073-1077.
- Schröder, J. J. 2010. *Sustainable Use Of phosphorus*. Wageningen Center Investigation: Plant Research International.
- SEMARNAT. 2004. *ESTUDIO TECNICO ACUIFERO PRINCIPAL-REGION-LAGUNERA*.
- SEMARNAT. 2010. *Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Región de la Comarca Lagunera 2010-2015*. Mexico.

Segura, M. L., Contreras, P. J.I., Plaza, B.M., Lao, T. 2012. Assessment of the Nitrogen and Potassium Fertilizer in Green Bean Irrigated with Disinfected Urban Wastewater. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43,426-433

SIAP.2015.infosiap.siap.gob.mx/index.php?option=comwrapper&view=wrapper&Itemid=350 (accessed junio 14, 2015).

Soto, N.P.R., Vázquez Z. J. A., Chávez G.R. y Ordaz A.A. 2012. NORMAS OFICIALES MEXICANAS DE RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS CON AGUAS RESIDUALES Y DE INFILTRACION DE AGUAS PLUVIALES AL SUELO Y SUBSUELO. *XXII Congreso nacional de hidráulica*. Acapulco Guerrero, México, 5.

Stark, C. H., & Richards, K. G. 2008. The continuing challenge of nitrogen loss to the environment: Environmental consequences and mitigation strategies. *Dynamic Soil, Dynamic Plant*, 41-55.

Steinfeld, H., Gerper P., Wassenaar T., Castel V., Rosales M and Haan C. 2006. *Livestock´s long shadow: enviromental Issues and options* . Rome, Italy: Food and Agriculture of yhe United Nations.

Suloma, El-Kady A. y A. 2013. Towards wastewater.aquaculture-agriculture integration in arid and semi-arid regions: utilization of aquaculture effluents in the irrigation of khaya and mahogany seedligs. *Journal of Horticultural Science and Hornamentall Plants*, 227-237.

UNESCO. 2006. *El agua, una responsabilidad compartida*. UNESCO.

Urkiaga, A., de las Fuentes, L., Bis, B., Chiru, E., Balasz, B and Hernández, F. 2008. Development of analisis tools for social, ecoic and ecological effects of water reuse. *Desalination*, 218:81-91.

WQPN, 2008. Water Quality Protection Note. Irrigation with nutrient-rich wastewater. *Departament of Water, Government of Western Australia*, 1-20.

Xu, Y., Wu, L., Chang, A. C., & Zhang , Y. 2010. Impact of long--term reclaimed wastewater irrigation on agricultural soils: A primary assesment. *Journal of Hazardous materials*, 183, 780-786.

Yadav, R. K., Goyal, B., Sharma, R, K., Dubey, S. K y Minhas, P. S. 2002. Post-irrigation impact of domestic sewage effluent on composition of soils, crops and ground water- A case study. *Enviroment International* 28: 481-486.

Zabadil, J. 2009. The effect of municipal wastewater irrigation on the yield and quality of vegetables and crops . *Soil water resources*, 4: 91-103.ni

Ziyad A., & Abdelmajid N. 2014. Impacts of wastewater irrigation on soils and alfalfa crop: Case study from Gaza strip. *Enviromental progress & sustainable energy*.