



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN DEL REÚSO DE AGUA RESIDUAL TRATADA
EN LA AGRICULTURA COMO PARTE DE UNA
ESTRATEGIA PARA REDUCIR EL DÉFICIT EN
ACUÍFEROS: CASO DE ESTUDIO SAN JUAN DEL RÍO**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA

P R E S E N T A :

ING. DIEGO MARTÍNEZ GARCÍA

DIRECTOR DE TESINA: **M. EN C. INÉS NAVARRO GONZÁLEZ**

MÉXICO, D.F.

FEBRERO 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS – DEDICATORIAS

A la Vida por las gran oportunidad que nos otorga

A mis papás por estar PRESENTES siempre

A mis abuelos por todo su esfuerzo, entusiasmo y trabajo

A toda mi familia, porque de cada uno he aprendido algo valioso

A mis a amigos que me han acompañado en cada una de las etapas de este viaje

A la M. en C. Inés Navarro González por su tiempo y comentarios para revisar esta investigación, además de su apoyo durante mi estancia en el Instituto.

A la Universidad Nacional Autónoma de México

A la Facultad de Ingeniería por brindarme la educación para formarme como Ingeniero Civil

A mis profesores de toda la vida por sus enseñanzas

Al Instituto de Ingeniería por el respaldo recibido en esta etapa

A todos mis compañeros del Grupo de Tratamiento y Reúso, a la Dra. Alma Chávez por haberme adentrado al tema de reúso agrícola y sus consejos, al Doctor Jose Antonio Barrios, M. Catalina Maya y Dr. Elías Becerril por su apoyo durante mi estancia en el Instituto.

Al Programa de Especializaciones y al Departamento de Ingeniería Sanitaria, a la M. en I. Alba Vázquez, al Dr. Enrique César y al Ing. Martín Jiménez, por todo su apoyo durante la Especialización

A los integrantes del jurado: M.I. Carlos Menéndez, M.I. Alba Vázquez, Dra. Ana Elisa Silva y M.I. Cristian González por su revisión, tiempo y recomendaciones.

Al personal de JAPAM por su asistencia para la realización de la visita técnica a la PTAR San Pedro Ahuacatlán II, en especial a la Lic. Gabriela Juaristi

Al Ing. Martín Sánchez y José Carlos Bañuelos de la empresa Bioingeniería Sustentable por su recibimiento y el tiempo dedicado a la visita de la PTAR San Pedro Ahuacatlán II

A todos los contribuyentes responsables

G R A C I A S



Índice

1.	Capítulo I - Introducción.....	11
1.1	Objetivos y Alcances	11
	Objetivo General.....	11
	Objetivos particulares	11
	Alcances 12	
	Hipótesis 12	
	Región de estudio.....	12
1.2	Antecedentes de la región de estudio.....	12
	Dinámica de la población.....	14
2.	Capítulo II Reúso de agua residual tratada en la agricultura	15
2.1	Calidad del Agua.....	16
2.1.1	Patógenos	17
2.1.2	Componentes Inorgánicos.....	17
2.1.3	Componentes Químicos Orgánicos.....	18
2.2	Efectos negativos directos de los componentes del agua residual sin tratamiento en los sistemas agrícolas de riego y posibles riesgos a la salud humana	19
2.2.1	Efectos en el agua subterránea	21
2.3	Tratamiento de agua residual	21
2.3.1	Sistemas de baja carga	22
2.3.2	Sistemas de alta carga	22
2.4	Lodo residual	23
2.5	Efectos benéficos del reúso agrícola de agua residual tratada	24
2.5.1	Aplicación de Nutrientes.....	24
2.5.2	Aplicación de agua y lodo residual	24
3.	Capítulo III Experiencias de reúso agrícola y Legislación	25
3.1	Reúso agrícola en el mundo	25
3.1.1	Caso California	25
3.1.2	Caso Israel.....	29
3.1.3	Caso Irán	29
3.1.4	Caso Egipto.....	29
3.1.5	Caso Arabia Saudita.....	30
3.2	Reúso agrícola en México.....	30
3.2.1	Caso San Luis Potosí	31
3.2.2	Reúso agrícola en Querétaro.....	32
3.3	Legislación, directrices y criterios sobre el reúso agrícola	32
3.3.1	Legislación, restricciones y directrices	32
3.3.2	Legislación en México.....	35
4.	Capítulo IV Método.....	37
4.1	Análisis de la situación actual del acuífero	37
4.2	Estimación de la demanda potencial de agua para la agricultura (Huella Hídrica)	37
4.3	Estimación de la oferta potencial de agua residual tratada	38
4.4	Evaluación del potencial existente – estrategias – costos	38
5.	Capítulo V Situación del agua subterránea	41
5.1	Situación del agua subterránea en México.....	41
5.3	Usos del agua subterránea proveniente del acuífero Valle de San Juan del Río.....	43
5.4	Usuarios de agua subterránea.....	43
5.5	Principales Usuarios.....	44
5.5.1	Distrito de Riego 023	45
5.5.2	Sector industrial	45
6.	Capítulo VI - Panorama del sector agrícola en el estado de Querétaro.....	47
6.1	Ciclo agrícola, superficie y cultivo	47
6.2	Distrito de Riego 023	47

6.2.1	Análisis del volumen de abastecimiento para el Distrito de Riego 023.....	50
6.3	Unidades de Riego.....	52
6.4	Sequía en México 2011.....	53
7.	Capítulo VII Determinación de la demanda potencial de agua para el sector agrícola en la zona de estudio.....	55
7.1	Concepto de Huella Hídrica.....	55
7.2	Estimación de la Huella Hídrica para la región de estudio.....	57
7.3	Análisis de la huella hídrica potencial para el Distrito de Riego 023.....	58
7.4	Efecto de la Eficiencia de Riego en la Huella Hídrica de Distritos de Riego.....	59
7.5	Análisis de la huella hídrica potencial para las Unidades de Riego.....	60
7.6	Demanda potencial de agua por cultivo en la zona de estudio.....	62
7.7	Demanda potencial de agua por municipio en la zona de estudio.....	63
8.	Capítulo VIII Determinación de la oferta potencial de agua para el sector agrícola en la zona de estudio. 65	
8.1	Sector Agua Potable.....	65
8.1.1	Fuentes de abastecimiento para uso público.....	65
8.1.2	Población atendida por municipio.....	65
8.1.3	Volumen estimado para abastecimiento público.....	66
8.2	Sector Alcantarillado.....	67
8.3	Sector Tratamiento de Agua Residual.....	68
8.3.1	Plantas de Tratamiento Existentes.....	68
8.3.2	PTAR San Pedro Ahuacatlán II.....	70
8.3.3	Ubicación de las Plantas de Tratamiento de Agua Residual en la región.....	74
8.3.4	Volumen estimado de generación de agua residual tratada en la región.....	75
8.3.5	Tendencia reciente en la cobertura de tratamiento.....	76
8.3.6	Escenarios 2030 de generación de agua residual tratada en la región.....	77
8.4	Resumen de escenarios.....	79
9.	Capítulo IX Evaluación del Potencial de Reúso de Agua Residual Tratada.....	81
9.1	Localización de los usuarios potenciales respecto a las Plantas de Tratamiento de Agua Residual.....	81
9.2	Volumen potencial de reúso – Demanda/Oferata.....	84
9.2.1	PTAR San Pedro Ahuacatlán II.....	86
9.2.2	PTAR San Pedro Ahuacatlán I.....	89
9.2.3	PTAR Tequisquiapan.....	92
9.2.4	PTAR Amealco.....	92
9.2.5	PTAR Saldarriaga – PTAR Pedro Escobedo – PTAR Huimilpan – PTAR La Estancia – PTAR la Fuente.....	93
9.2.6	Propuesta para el potencial de reúso actual.....	93
9.3	Volumen potencial de reúso – Escenarios futuros.....	94
9.4	Consideraciones técnicas para su aplicación.....	96
9.5.1	Prefactibilidad.....	98
9.6	Consideraciones finales.....	100
10.	Conclusiones - Recomendaciones.....	101
	Recomendaciones.....	102
	Referencias.....	104
	Anexo 1 – Huella Hídrica Potencial en Unidades de Riego.....	109
	Anexo 2 – Plantas de Tratamiento de Agua Residual ubicadas en la región de estudios.....	111
	Anexo 3 - Superficie irrigable por PTAR.....	112

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Área y población estimada de cada municipio en la región de estudio.....	12
Tabla 1.2 Volúmenes de extracción por bombeo (hm ³).....	13
Tabla 1.3 Balance de Agua Subterránea Acuífero 2203 Valle de San Juan del Río (hm ³).....	13
Tabla 1.4 Normales climatológicas (1950 -2010) en algunas estaciones localizadas en la región de estudio	13
Tabla 1.5 Estimación de la población en la región de estudio 2010 - 2030.....	14
Tabla 2.1 Parámetros de calidad del agua relevantes para riego.....	17
Tabla 2.2 Agentes Microbiológicos presentes en Agua Residual.....	17
Tabla 2.3 Principales componentes químicos orgánicos presentes en agua residual	19
Tabla 2.4 Efectos directos de los componentes del agua residual en los sistemas de riego y salud humana	19
Tabla 3.1 Ejemplos de experiencias de reúso agrícola en el mundo.....	27
Tabla 3.2 Ejemplos de experiencias de reúso agrícola en México.....	30
Tabla 3.3 Plan Integral de Saneamiento San Luis Potosí.....	31
Tabla 3.4 Algunas experiencias de reúso agrícola en Querétaro	32
Tabla 3.5 Resumen de las restricciones y criterios para reúso agrícola	32
Tabla 3.6 Directrices recomendadas sobre calidad biológica de agua residual para reúso agrícola.....	34
Tabla 3.7 Directrices recomendadas por la EPA para el reúso agrícola	35
Tabla 3.8 Restricciones indicadas para reúso agrícola según la NOM-001-SEMARNAT-1996.....	35
Tabla 3.9 Límites Máximos Permisibles de Contaminantes.....	36
Tabla 3.10 Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos.....	36
Tabla 3.11 Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos.....	36
Tabla 5.1 Acuíferos con el mayor déficit anual en México (CONAGUA, 2014).....	41
Tabla 5.2 Principales características de los acuíferos del estado de Querétaro (hm ³).....	42
Tabla 5.3 Principales usuarios de agua subterránea del acuífero Valle de San Juan del Río.....	44
Tabla 6.1 Datos Agricultura SEDEA Querétaro, SAGARPA, Unidades de Riego/ Distrito de Riego CONAGUA 2011-2012	48
Tabla 6.2 Volumen de abastecimiento por fuente de abastecimiento de agua Distrito 023 (m ³).....	51
Tabla 6.3 Superficie sembrada en las unidades de riego por municipio	52
Tabla 6.4 Áreas afectadas por la sequía de 2011 en el estado de Querétaro	53
Tabla 7.1 Huella Hídrica por cultivo a nivel mundial.....	56
Tabla 7.2 Huella Hídrica para los cultivos sembrados en el estado	57
Tabla 7.3 Huella Hídrica Potencial DR023 2011-2012	58
Tabla 7.4 Huella Hídrica DR023 2011-2012.....	60
Tabla 7.5 Huella Hídrica Unidades de Riego estado de Querétaro.....	60
Tabla 8.1 Población estimada y cobertura de agua potable por municipio	66
Tabla 8.2 Producción de agua potable en las principales localidades del estado.....	66
Tabla 8.3 Estimación del volumen de agua potable producida por municipio	67
Tabla 8.4 Estimación del volumen de agua potable consumido	67
Tabla 8.5 Estimación del volumen captado en el sistema de alcantarillado en los municipios de la región	68
Tabla 8.6 Plantas de Tratamiento de Agua Residual en funcionamiento ubicadas en la región	69
Tabla 8.7 Datos del proyecto PTAR San Pedro Ahuacatlán II.....	71
Tabla 8.8 Datos sobre unidades del tren de tratamiento PTAR Pedro Ahuacatlán II	73
Tabla 8.9 Estimación del volumen producido de agua residual tratada.....	76
Tabla 8.10 Estimación del volumen de agua potable, volumen en alcantarillado y volumen tratado para el Escenario 1	78
Tabla 8.11 Estimación del volumen de agua potable, volumen en alcantarillado y volumen tratado para el Escenario 2	78
Tabla 8.12 Estimación del volumen de agua potable, volumen en alcantarillado y volumen tratado para el Escenario 3.....	79
Tabla 8.13 Resumen de Escenarios de Tratamiento (Volumen Tratado Anual).....	79
Tabla 9.1 Principales datos para la evaluación de un programa de reúso agrícola	81
Tabla 9.2 Superficie potencial a irrigar con el volumen de ART generado	85
Tabla 9.3 Superficie irrigable con efluente tratado PTAR San Pedro Ahuacatlán II	87
Tabla 9.4 Superficie irrigable con efluente tratado PTAR San Pedro Ahuacatlán I	89
Tabla 9.5 Superficie irrigable con efluente tratado PTAR Tequisquiapan	92
Tabla 9.6 Superficie irrigable con efluente tratado PTAR Amealco	93
Tabla 9.7 Superficie irrigable con efluente tratado Superficie irrigable con efluente tratado.....	93
Tabla 9.8 Superficie potencial a irrigar con el volumen de ART generado.....	94
Tabla 9.9 Capacidad Instalada y Faltante para cubrir el 100% de cobertura en 2015 y 2030 por municipio (L/s).....	96
Tabla 9.10 Criterios básicos de prefactibilidad.....	99

Índice de Figuras

Figura 2.1 Diagrama que muestra la importancia del lodo residual en el reúso agrícola, el cual debe ser tratada y puede ser aprovechado por los cultivos o tener otras aplicaciones.....	23
Figura 3.1 Gasto de reúso agrícola en diversos países del mundo en 2004 -2005	26
Figura 4.1 Análisis de la situación actual del acuífero.....	37
Figura 4.2 Procedimiento para la estimación de la demanda potencial de agua en la agricultura.	38
Figura 4.3 Procedimiento para la estimación de la oferta potencial de agua en la agricultura	38
Figura 4.4 Procedimiento para el desarrollo de la evaluación del potencial existente.	39
Figura 5.1 Usos del agua subterránea proveniente del acuífero Valle de San Juan del Río bajo las dos clasificaciones que CONAGUA propone.....	43
Figura 6.2 Ubicación del Distrito de Riego 023 en Querétaro	47
Figura 7.3 Gráfica Área cultivada – volumen cada hectárea – volumen requerido	59
Figura 7.4 Área cultivada – volumen cada hectárea – volumen requerido (unidades de riego).....	61
Figura 7.5 Porcentaje de la demanda teórica por cultivo	63
Figura 8.1 - Figura 8.2 Caudal Instalado – Caudal Tratado y Tipo de Tratamiento	70
Figura 8.3 Localización de la PTAR San Pedro Ahuacatlán II.....	70
Figura 8.4 Esquema general de las unidades de tratamiento de la planta	71
Figura 8.5 Caudal de llegada a la planta	72
Figura 8.6 Reactor Aerobio.....	72
Figura 8.7 Sedimentador Secundario	73
Figura 8.8 Ubicación de las PTARs en la región de estudio	74
Figura 8.9 Ubicación de las PTARs en la zona de San Juan del Río	75
Figura 8.10 Tendencia en la cobertura de tratamiento	77
Figura 9.1 Pozos de extracción del acuífero Valle de San Juan del Río y volumen concesionado (m ³).....	82
Figura 9.2 Localización de grandes usuarios y plantas de tratamiento de agua residual	83
Figura 9.3 Zonas agrícolas en un radio menor que 2.5km alrededor de las PTAR de la región	84
Figura 9.4 Volumen de Oferta y Demanda por municipio.....	85
Figura 9.5 Superficie irrigable aprovechando el agua residual generada en las plantas de tratamiento de la región bajo los tres escenarios actuales (2015).....	86
Figura 9.6 PTAR San Pedro Ahuacatlán II.....	89
Figura 9.7 PTAR San Pedro Ahuacatlán I.....	91
Figura 9.8 PTAR Tequisquiapan	92
Figura 9.9 PTAR Amealco	92
Figura 9.10 Superficie total a irrigar	93
Figura 9.11 Núcleos agrarios irrigables en la zona del DR 023.....	94
Figura 9.12 Escenarios a - b - c.....	95
Figura 9.13 Red de canales y red de drenaje del DR 023 (Fuente CONAGUA)	97
Figura 9.14 Bordo la Llave ubicado al norte de San Juan del Río	98

RESUMEN

En la región de estudio ubicada en el estado de Querétaro, se localiza el acuífero 2203 Valle de San Juan del Río que ocupa el noveno lugar entre los acuíferos más sobreexplotados de México, con un déficit anual en aumento, pasando de 118 hm³ en 2009 a 133.3 hm³ para 2015. La situación anterior corresponde a un desarrollo agrícola importante y una tasa de crecimiento poblacional elevada, además de un clima árido con niveles de evaporación muy superiores a los correspondientes por precipitación.

Una de las estrategias que se pueden emplear para revertir esta tendencia es el reúso agrícola. Como parte de la solución al problema de escasez de agua, esta práctica se ha llevado a cabo durante muchos años en diversas partes del mundo, por lo que se tienen los lineamientos y recomendaciones necesarios para su aplicación. En vista de lo anterior, el propósito de este trabajo es evaluar en qué medida el reúso agrícola de agua residual tratada puede tener un impacto positivo en la disponibilidad de agua en la región de estudio, analizando la situación actual y futura del acuífero, identificando estrategias para su puesta en marcha y revisando de manera preliminar los costos asociados al uso de agua residual tratada.

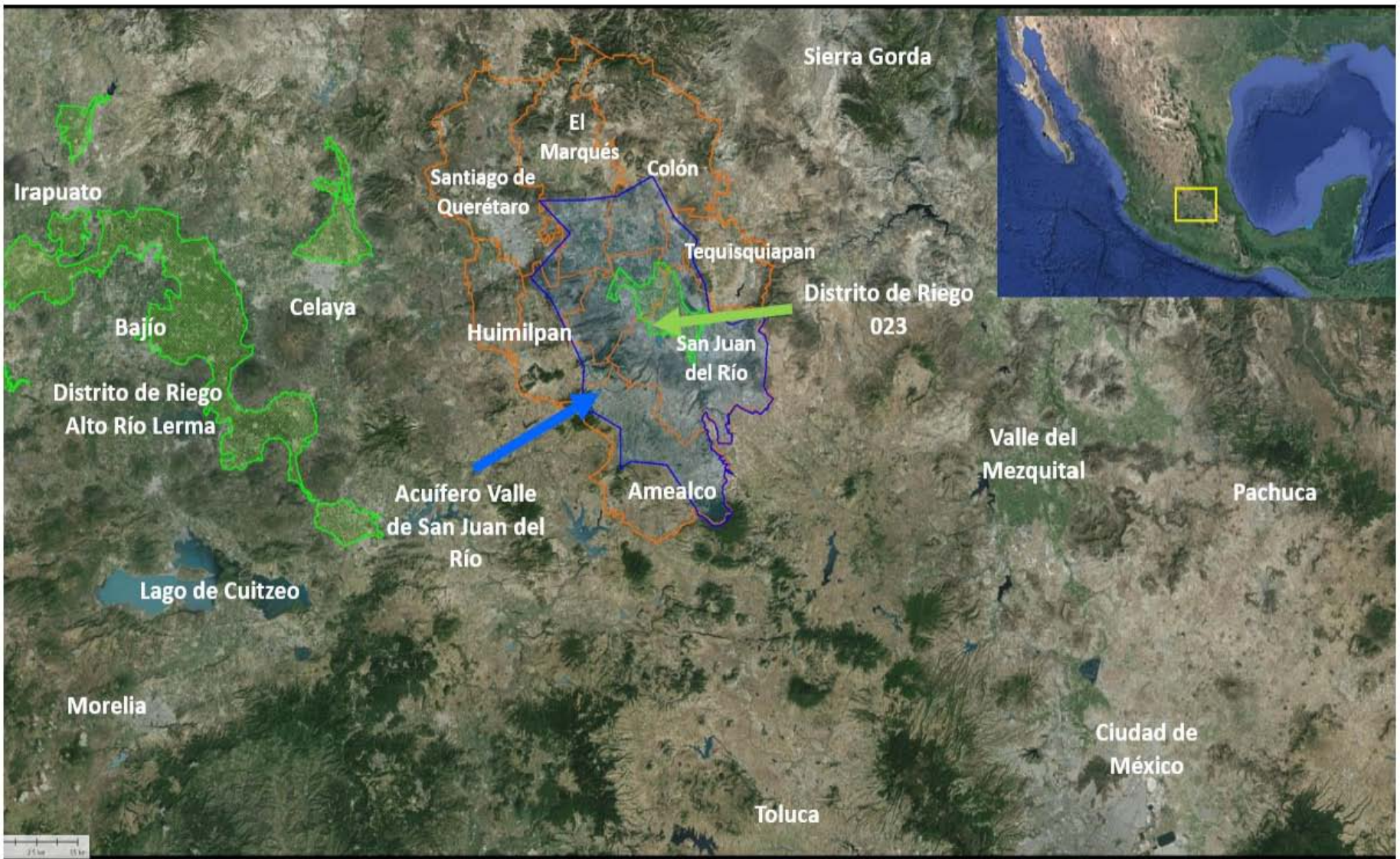
Para lograr el cumplimiento de los objetivos propuestos, primeramente se identifican a los usuarios principales del agua subterránea cuyo volumen concesionado asciende a 114 hm³, entre los cuales destacan el Distrito de Riego 023 e industrias como Kimberly-Clark de México y Kaltex. Del volumen total concesionado anualmente (327 hm³), el uso predominante es en el sector agropecuario que abarca el 76.7%.

Por otro lado y en vista de que el mayor usuario de agua subterránea en la región es el sector agropecuario, se realiza la estimación de la demanda potencial de agua para riego, así como de la oferta de agua residual tratada, para conocer la relación entre ambos volúmenes y el impacto que el reúso agrícola tendría en la disminución del déficit. Al respecto se calcula una demanda potencial de 367.3 hm³, 44 hm³ para el Distrito de Riego 023 y el restante en Unidades de Riego, donde los principales cultivos irrigados son maíz, alfalfa, avena, cebada y sorgo.

Respecto a la oferta de agua residual tratada, se definen seis escenarios. Para el año 2015, se tiene el escenario actual con un volumen de 14.8 hm³ que producen 52 plantas de tratamiento de agua residual (PTARs). Si las plantas existentes trabajaran al 100% de su capacidad la oferta se eleva a un volumen de 20.1 hm³ y si la cobertura de tratamiento actual fuera 100% sería posible obtener un volumen de 28.3 hm³, volúmenes que representan el 11%, 15% y 21% del déficit respectivamente. Mientras que para 2030, si la tendencia de construcción de PTARs se mantiene, el volumen tratado sería de 32.55 hm³, pero si se tratara el 100% del volumen que generará la población proyectada para ese año, se producirían 56.53 hm³ anuales, que representa el 42.4% del déficit, considerando un caudal de agua residual tratado de 1792.2 L/s, contra el caudal actual de 468.5 L/s.

Adicionalmente a la disminución en el déficit del acuífero, existen otros beneficios potenciales derivados de la aplicación de un programa de reúso en la región, por ejemplo: liberación de agua de primer uso para el suministro de agua potable a la creciente población de la región, un menor costo asociado al tratamiento de agua residual y ahorros en el sector agrícola por concepto de fertilizantes. Aunque se estima que el consumo eléctrico para reúso es menor que para extracción de agua subterránea, al incorporar el costo asociado a infraestructura de saneamiento y operación, resulta ser menos competitivo. Por ello, se propone una optimización de cultivos con aquellos cuya comercialización implica mayores ganancias. Sin duda, la opción de reúso agrícola implica una mejoría, no solo en el aspecto de disponibilidad de agua, pero también en el aspecto económico.

Finalmente, es necesario indicar que para estudios posteriores sobre el tema, será necesario incluir otras variables, como la precipitación y su comportamiento mensual, estudios de riesgo relacionados con el uso de agua residual tratada y sin tratamiento, estudios de carácter social, además de estudios económicos/financieros a detalle. También será necesario evaluar en qué medida la mejora en las eficiencias de riego agrícola impactan en el uso y disponibilidad del recurso hídrico, ya que 66% del volumen para riego se pierde antes de llegar al cultivo y aunque un porcentaje de dichas pérdidas regresa al acuífero, se tiene un costo de extracción adicional por agua que no se aprovecha.



1. Capítulo I - Introducción

La República Mexicana enfrenta serios problemas de disponibilidad de agua, tanto por la escasez del recurso como por su mala calidad. Algunas regiones del país enfrentan situaciones de estrés hídrico que tienen impactos negativos en el desarrollo económico y social de la población. Particularmente, un alto porcentaje de las reservas subterráneas de agua en el país son sobreexplotadas (CONAGUA, 2014), por lo que es urgente aplicar medidas que permitan revertir esta tendencia.

Dentro de las regiones del país que enfrentan situaciones de estrés hídrico, se ubica la zona agrícola del Valle de San Juan del Río en el estado de Querétaro (CONAGUA 2014). El crecimiento poblacional en la región ha desempeñado un papel importante en el desarrollo de esta problemática. Por ejemplo, el Consejo Nacional de Población estima que, en el período 2010 – 2030, la población del municipio de San Juan del Río habrá aumentado de 241 699 habitantes a 318 000, con una tasa de crecimiento entre el 2% y 3% (INEGI, 2012).

Otro factor a considerar es la baja disponibilidad del recurso hídrico (SEMARNAT, 2012), ya que la región se ubica en una zona semiárida, con una precipitación media anual promedio inferior a los 600 mm que, en conjunto con la recarga inducida, únicamente permite la entrada de 191.5 Mm³ de agua por año al acuífero 2203 del Valle de San Juan del Río (CONAGUA, 2009), mientras que las descargas (naturales e inducidas) se han calculado en 310.2 Mm³ al año (CONAGUA, 2009). Lo anterior representa una sobreexplotación de 118.7 Mm³, es decir 38% respecto a la recarga (CONAGUA, 2009).

Para 2013 el déficit había aumentado a 129.6 Mm³ y en 2015 se calculó un valor de 133.35 Mm³. Considerando que la extracción con fines agrícolas representa entre 70% y 80% del total de la extracción (CONAGUA, 2014), atender este sector resulta de vital importancia, no solo por el porcentaje que representa, sino por la influencia que tiene en la población (alimento, desarrollo económico, bienestar social, etc.).

Esta problemática se ve acentuada por otros factores, entre los cuales se destaca:

- La deforestación de casi el 92% de los bosques de encino que existían en el municipio (Centro Queretano del Medio Ambiente, 2011) que conlleva a la pérdida en la capacidad de retención de agua en el suelo por erosión.
- La mala calidad del agua que implica falta de tratamiento adecuado del agua residual municipal e industrial.

En vista del escenario actual y futuro, la tendencia del intercambio de agua residual tratada por agua de primer uso para cubrir la demanda de agua para riego, es una opción necesaria como parte de una estrategia para la preservación futura de acuíferos y del medio ambiente. Por ello, esta investigación abordará el estudio de las condiciones actuales y los escenarios futuros en la región de San Juan del Río, para evaluar la viabilidad del reúso de agua residual tratada en los campos agrícolas de la zona.

1.1 Objetivos y Alcances

Objetivo General

Evaluar el potencial existente del reúso agrícola de agua residual tratada en la zona de estudio

Objetivos particulares

- a) Analizar la situación existente en la explotación del acuífero en la zona de estudio relacionada con las extracciones de agua para riego
- b) Identificar estrategias para implementar un programa de reúso agrícola en la región
- c) Revisar el impacto de la propuesta en la situación actual y futura del acuífero.

Alcances

- Enfoque a las PTARs (influyente municipal) más importantes en términos de caudal y localización
- Enfoque a los principales cultivos en el distrito de riego
- Revisar el impacto de la propuesta en la situación actual y futura del acuífero

Hipótesis

Es posible disminuir tanto el déficit de los acuíferos como liberar un caudal significativo de agua de primer uso a través de la práctica **programada y supervisada** del reúso de agua residual tratada

Región de estudio

El área de estudio se ubica dentro de la Región Hidrológica 26 Cuenca del Pánuco y comprende el área equivalente al acuífero 2203 del Valle de San Juan del Río, localizado al sur del estado de Querétaro de Arteaga con una superficie de 2057.61 km² (CONAGUA, 2009); incluye parte de los siguientes municipios (Tabla 1.1): Amealco de Bonfil, Colón, el Marqués, Huimilpan y Santiago de Querétaro, así como la totalidad de los municipios Pedro Escobedo y San Juan del Río. Dentro de la zona, destacan las poblaciones de San Juan del Río, Pedro Escobedo, El Colorado, El Sauz y Galindo.

Tabla 1.1 Área y población estimada de cada municipio en la región de estudio			
Municipio	Área dentro de la región Geohidrológica (km²)	Población 2010 (CONAPO)	Población Estimada 2030 (CONAPO)
Amealco de Bonfil	414.38	62916	80976
Colón	178.47	58863	76478
El Marqués	175.82	117872	181097
Huimilpan	114.29	36003	46918
Pedro Escobedo	306.77	64713	84288
Santiago de Querétaro*	25.20	0	0
San Juan del Río	770.53	244413	318902
Tequisquiapan	72.16	64118	82801
Región Geohidrológica Valle de San Juan del Río	2057.61	648898	871460

* El área del municipio de Santiago de Querétaro que se incluye en la Región Geohidrológica Valle de San Juan del Río corresponde al Parque Nacional el Cimatarío.

1.2 Antecedentes de la región de estudio

El área de estudio se ubica dentro de la Región Hidrológica 26 Cuenca del Pánuco. Entre los ríos principales en la región, se destacan el Río San Juan, el Río Galindo y el Río Amealco, todos ellos afluentes del Río Moctezuma.

Dentro de la región de estudio se tenían censados 698 pozos en total, de los cuales 546 estaban destinados para uso agrícola, 128 pozos para uso público urbano y 24 para uso industrial (CONAGUA, 1996). De estos pozos se extrajeron para ese mismo año 335.63 hm³ para uso agrícola, 37.45 hm³ para uso industrial y 22.93 hm³ para abastecimiento público, con un total de 396.00 hm³ (Tabla 1.2).

Tabla 1.2 Volúmenes de extracción por bombeo (hm³)				
Rubro	1996		2015	
Agrícola	335.63	84.76%	203.81	71.74%
Industrial	37.45	9.46%	45.29	15.94%
Abastecimiento Público	22.92	5.79%	35.00	12.32%
Total	396.00	100%	284.1	100%

Para 1996, 2009 y 2015, la CONAGUA calculó la recarga media anual como la suma de entradas subterráneas, retornos por riego y recarga natural. Lo anterior implica que durante 1996, se tuvo un déficit de 113 hm³, el cual ha aumentado y para el año 2009 fue de 118.68 hm³ (Tabla 1.3). Para el año 2015, el déficit aumentó a 133.34 millones de metros cúbicos, es decir un aumento aproximado de 15%.

Tabla 1.3 Balance de Agua Subterránea Acuífero 2203 Valle de San Juan del Río (hm³)			
Año	1996	2009	2015
Entradas Subterráneas	91.00	191.5	25
Retornos por riego y fugas	95.00		134.8
Recarga Vertical	123.00		31.7
Salidas Subterráneas	26.04	310.18	324.85
Bombeo	396.00		
Déficit	113.00 *	118.68	133.34

*37% de la recarga total y abatimiento de 0.99 m al año, fuente CONAGUA

El acuífero Valle de San Juan del Río se ubica en una región cuyo clima se clasifica como semi-seco semicálido en la zona central y hacia el sur como templado subhúmedo, ambos con régimen de lluvias de verano (Tabla 1.4). En tanto que la precipitación media anual oscila entre 450 y 680 mm y la temperatura media anual entre los 14°C y 16°C (JAPAM, 2010).

Tabla 1.4 Normales climatológicas (1950 -2010) en algunas estaciones localizadas en la región de estudio													
Estación San Juan del Río – Elevación 1933 msnm – Latitud 20°22'27"N – Longitud 099°59'54" W													
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Tmáx	23	24.8	27.7	29.3	29.9	28	26	26.2	25.2	24.6	24.3	23.3	26
Tmín	5.3	6.1	8.5	10.7	12.7	13.4	12.9	12.8	12.4	10.1	7.7	6.1	18
Tmed	14.1	15.5	18.1	20	21.3	20.7	19.4	19.5	18.8	17.3	16	14.7	9.9
Prec. (mm)	11.6	11.4	7	18.4	38.4	79.9	107.7	91.3	83	46.7	7.7	5.3	508
Evap.(mm)	119.1	146	218.8	221.1	216.5	195.2	163.1	162.7	142.1	130.2	118.9	112.4	1946
Estación Ejido la Palma – Elevación 1910 msnm – Latitud 20°31'00"N – Longitud 100°11'00" W													
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Tmáx	22.7	24.5	27.3	29.3	30.1	27.8	26	26.1	25.4	24.8	24.2	22.9	25.9
Tmín	3	3.4	5.8	8.5	10.6	12.2	12.2	12.1	11.7	8.5	5.3	3.8	17
Tmed	12.8	13.9	16.5	18.9	20.3	20	19.1	19.1	18.6	16.7	14.8	13.3	8.1
Prec. (mm)	16.5	3.8	7.1	20	44.5	115.5	131.6	121.6	96.4	46.2	11.3	9.5	624
Evap.(mm)	127	148.6	214.9	228.5	228.1	192.2	178.8	168.7	149	144.7	125.9	118.8	2025.2

Estación Amealco – Elevación 2629 msnm – Latitud 20°11'05"N – Longitud 100°08'44" W													
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Tmáx	21.1	22	24.1	25.3	25.7	24.4	22.2	22.5	21.8	21.6	21.6	21.9	22.8
Tmín	4.8	5.4	7.3	8.5	9.4	9.2	9	8.9	8.8	7.3	6.3	5.3	7.5
Tmed	12.9	13.7	15.7	16.9	17.5	16.6	15.6	15.7	15.3	14.5	14.1	13.4	15.2
Prec. (mm)	18.6	14.5	10.7	20.9	59.9	141.9	181.3	150.5	154	57.1	11.6	12.4	833.4
Evap.(mm)	122	145.1	207.2	219.4	211.7	166.4	146.4	141	124.7	118.1	117.4	114.4	1833.8

En la Tabla 1.4 se puede observar que la a precipitación se concentra en los meses de verano (tal y como sucede en la mayor parte de la República Mexicana), mientras que los meses de primavera corresponden a las mayores temperaturas y también a los mayores valores de evapotranspiración.

Los valores anuales de precipitación son muy inferiores a los valores anuales de evapotranspiración, por lo que la zona es semidesértica y con problemas naturales de escasez de agua. En la región donde se asienta el Distrito de Riego 023, la evapotranspiración es 380 a 400% mayor, mientras que hacia el sur en la zona más húmeda el valor de evapotranspiración es aproximadamente 200% mayor.

Dinámica de la población

Como se ha mencionado previamente, la población de la región Valle de San Juan del Río ha experimentado un crecimiento sostenido. En 2010, el número de habitantes en los siete municipios mencionados era de 648 896 (Tabla 1.5), mientras que para el año 2030 se estima una población total de 871 459 habitantes (CONAPO, 2013) con una tasa de crecimiento promedio anual de 1.49%.

Tabla 1.5 Estimación de la población en la región de estudio 2010 - 2030		
Año	Total Municipios	% Crecimiento
2010	648896	--
2011	663391	2.23
2012	676937	2.04
2013	689873	1.91
2014	702317	1.80
2015	714356	1.71
2016	726044	1.64
2017	737505	1.58
2018	748711	1.52
2019	759707	1.47
2020	770403	1.41
2021	781082	1.39
2022	791695	1.36
2023	802127	1.32
2024	812446	1.29
2025	822591	1.25
2026	832719	1.23
2027	842636	1.19
2028	852402	1.16
2029	862013	1.13
2030	871459	1.10

2. Capítulo II Reúso de agua residual tratada en la agricultura

El **reúso agrícola** es una práctica que mediante el uso de agua residual tratada o cruda y lodo en la agricultura, ofrece una opción de ahorro del recurso hídrico utilizando los constituyentes aprovechables de cada uno en la producción de cultivos (NRC, 1996). Adicionalmente, provee una alternativa de disposición para el agua residual tratada o cruda, donde los cuerpos superficiales no tienen la capacidad de asimilar componentes como nitrógeno o fósforo. Mientras que el lodo resultante de los procesos de tratamiento (que contiene materia orgánica y nutrientes) puede mejorar las propiedades del suelo y su productividad, además de evitar la utilización de métodos tradicionales como la incineración o envío a relleno sanitario (NRC, 1996).

La agricultura es la actividad humana que consume la mayor cantidad de agua en el mundo con un 60% - 70% del total (UNESCO, 2009), por lo que a medida que la disponibilidad de agua de primer uso disminuye por el aumento de la demanda y cambios en los patrones de precipitación, el uso de agua residual tratada en la agricultura se incrementará en los próximos años (UNESCO, 2009).

En México, donde se siembran 6.5 millones de hectáreas de riego agrupadas en 85 distritos de riego y 39 500 unidades de riego, la extracción de agua para riego representa el 75% del volumen consumido anualmente (CONAGUA, 2014). Adicionalmente, se aprovecha agua residual para riego. Esta práctica se realiza de forma descontrolada y ha sido forzada ante una situación de escasez y conflictos por el uso del agua en regiones donde se registra un gran crecimiento urbano, industrial y agrícola, además de una mala distribución del recurso hídrico (CONAGUA, 2010), por lo que en un futuro cercano es posible que existan conflictos directos entre las grandes zonas agrícolas y los centros urbanos por el agua de primer uso. Ante este panorama, el aprovechamiento de agua residual se plantea como una solución viable (CONAGUA, 2010), que debe considerar los siguientes aspectos:

- 1) Existe un riesgo de afectación a la salud humana que podría provocar problemas en el ámbito regional como epidemias, por lo que resulta indispensable la realización de estudios para determinar el nivel de riesgo sobre el uso de agua residual tratada y efectos nocivos en la salud (EPA, 2012).
- 2) Considerar a los proyectos de reúso como globales, es decir, independientemente del beneficio ambiental, se debe considerar el aspecto económico, por ejemplo: tener una oferta de agua en zonas de escasez (intercambio de agua de primer uso), disminución de balance hídrico negativo, mantener o aumentar la productividad agrícola reduciendo la cantidad de fertilizantes industriales empleados, acondicionar suelos con alta erosión o baja productividad, sistemas de tratamiento económicos y cuidadosa planeación del tipo de cultivo más adecuado y rentable (CONAGUA, 2010).

Por otro lado, entre las principales preocupaciones que implica el reúso agrícola se encuentran:

- a) Presencia de sales, nutrientes y contaminantes que disminuyen la calidad del agua para riego.
- b) Efectos del agua residual tratada en las propiedades físicas y químicas del suelo.
- c) Falta de control en la cantidad de nutrientes aplicados al cultivo, ya que los fertilizantes industriales son elaborados con fórmulas controladas para satisfacer ciertos requerimientos nutricionales en función del cultivo, mientras que la cantidad de nutrientes contenidos en el agua y lodo residuales no se pueden controlar.
- d) Toxicidad debida al contenido en exceso de algún componente en el agua o lodo residuales, que puede ser absorbido por el cultivo e ingerido por el consumidor, además de la posibilidad de infiltración de contaminantes hacia el acuífero.
- e) Efectos en la salud pública por la presencia potencial de patógenos (virus, bacterias, helmintos, etc..)

Además de que el agua residual tratada es una fuente de abastecimiento para la irrigación, también provee nutrientes que los cultivos necesitan, especialmente nitrógeno (NRC, 1996). La concentración de nutrientes en el agua residual es función de la fuente de donde proviene, calidad del agua residual, tipo y nivel de tratamiento, ya que cada etapa del proceso de tratamiento de agua residual reduce la concentración de nitrógeno y fósforo.

Adicionalmente a la implementación del reúso agrícola, existen otras estrategias de reúso que en conjunto permiten disminuir el balance hídrico negativo de una región, entre las cuales podemos destacar:

- a) *Reúso urbano*: Ocurre en las zonas urbanas, por lo que se requieren dosis importantes de desinfectantes debido al posible contacto humano con el agua en función de la actividad y el lugar donde se desarrolle: riego de jardines, usos decorativos del agua (lagos o estanques), riego de campos de golf, parques, cementerios, escuelas, camellones, uso en inodoros, sistemas de protección contra incendios, agua para enfriamiento de sistemas de aire acondicionado, usos comerciales (lavado de autos), control de polvo en obras y lavado de calles y banquetas, entre otros.
- b) *Reúso industrial*: El tipo de reúso más común es agua para enfriamiento en procesos, sin embargo existen algunos inconvenientes para ello: formación de incrustaciones, crecimiento de microorganismos en instalaciones y corrosión. En algunas ocasiones se requiere la adición de algún compuesto químico o de tratamiento adicional. Otro tipo de reúso es como agua de proceso donde se deben tomar en cuenta las restricciones y requerimientos específicos sobre calidad de la misma.
- c) *Reúso como estrategia para evitar la intrusión salina* en acuíferos localizados cerca de la costa y cuya extracción supera a la recarga provocando la entrada de agua de mar y aumentando la concentración de sales, por lo que el agua extraída del acuífero no puede ser utilizada o almacenada.
- d) *Reúso como almacenamiento y restauración del hábitat*: El almacenamiento de agua residual tratada puede formar parte de una estrategia para la creación de espacios estéticos y recreacionales. El tipo de tratamiento que debe recibir el agua residual estará en función del objetivo del cuerpo de agua, es decir, si habrá contacto humano directo o no. En cuanto a la restauración del hábitat, la estrategia más común es la creación de humedales para el tratamiento de agua, los cuales pueden ayudar a mejorar la calidad del agua y propiciar el desarrollo de flora y fauna (NAS, 2012).
- e) *Reúso potable*: Puede clasificarse como directo o indirecto y ambos implican un tratamiento convencional seguido de un tratamiento avanzado dependiendo de diversos factores como la calidad del agua residual, el tipo de reúso y el destino final de la misma:
 - *Reúso potable directo*: Puede definirse como la inyección de agua residual tratada directamente a la red de distribución de agua potable o al tanque de almacenamiento (previo a la distribución). Por lo tanto, se trata de agua residual tratada no diluida (como ocurre en el reúso potable indirecto), ya que no existe una separación física ni temporal entre su producción en las plantas de tratamiento y su distribución al usuario. (NAS, 2012)
 - *Reúso potable indirecto*: A diferencia del reúso potable directo, donde el agua residual tratada es enviada directamente a los usuarios, en el caso de reúso indirecto existe un buffer (cuerpo de agua superficial o acuífero) entre el efluente y la fuente de abastecimiento. La presencia del buffer ayuda a disminuir la concentración de carga contaminante mediante procesos de degradación, mediante la dilución de agua reciclada o bien, incrementando el tiempo de retención hidráulico (NAS, 2012). El agua residual tratada puede enviarse a cuerpos de agua superficiales o utilizarse como método para la recarga de acuíferos.

2.1 Calidad del Agua

La composición típica del agua residual municipal incluye entre otros componentes: materia orgánica, microorganismos causantes de enfermedades (patógenos), nutrientes (fósforo y nitrógeno), contaminantes orgánicos, minerales disueltos, además de sustancias inorgánicas y elementos tóxicos como arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo y mercurio (FAO, 1992), sin embargo, desde el punto de vista de salud en el riego agrícola, los patógenos representan la mayor inquietud. En la Tabla 2.1 se incluyen algunos de los parámetros que son relevantes para asegurar la calidad del cultivo regado con agua residual tratada, para mantener la productividad del suelo y la protección al ambiente.

Tabla 2.1 Parámetros de calidad del agua relevantes para riego			
Tipo de Parámetro	Parámetro	Símbolo	Unidad
Físico	Sólidos Disueltos Totales	SDT	mg/l
	Conductividad eléctrica	Ec _w	dS/m
	Temperatura	T	°C
	Color/Turbiedad		NTU/JTU
	Dureza	-	mg equivalentes CaCO ₃ /l
	Acidez/Basicidad	pH	
Químico	Calcio	Ca ⁺⁺	me/l
	Magnesio	Mg ⁺⁺	me/l
	Sodio	Na ⁺	me/l
	Carbonatos	CO ₃ ⁻	me/l
	Bicarbonatos	HCO ₃ ⁻	me/l
	Cloro	Cl-	me/l
	Sulfatos	SO ₄ ⁻	me/l
	Relación de Adsorción de Sodio	SAR	
	Boro	B	mg/l
	Elementos traza	-	mg/l
	Metales pesados	-	mg/l
	Nitratos - Nitrógeno	NO ₃ -N	mg/l
	Fosfatos - Fósforo	PO ₄ -P	mg/l
	Potasio	K	mg/l

Kandiah (1990), FAO (1992)

2.1.1 Patógenos

Aunque el agua residual contiene microorganismos, únicamente una fracción de ellos representa un riesgo para la salud humana, entre ellos podemos mencionar: helmintos, protozoarios, bacterias y virus. En la Tabla 2.2 se muestran los principales agentes microbiológicos presentes en el agua residual y las enfermedades que podrían causar en los seres humanos:

Tabla 2.2 Agentes Microbiológicos presentes en Agua Residual		
Grupo	Agente	Enfermedades Relacionadas
Virus	Norovirus	Gastroenteritis
	Adenovirus	Conjuntivitis, gastroenteritis, enfermedades respiratorias
	Coxsackievirus	Meningitis, faringitis, conjuntivitis
	Echovirus	Gastroenteritis, meningitis
	Hepatitis A	Hepatitis
	Astrovirus	Gastroenteritis
Bacteria	<i>E. coli</i>	Diarrea Hemorrágica
	<i>Campylobacter jejuni</i>	Campylobacteriosis
	<i>Salmonella</i>	Salmonelosis
	<i>Shigella</i>	Shigelosis
	<i>Vibrio</i>	Gastroenteritis
	<i>Legionella</i>	Legionelosis
Protozoarios	<i>Cryptosporidium</i>	Cryptosporidiosis
	<i>Giardia</i>	Giardiasis
	<i>Microsporidia</i>	Microsporidiosis

Fuente: Asano et al., 2007

2.1.2 Componentes Inorgánicos

Metales y Metaloides

Los metales y metaloides como plomo, mercurio, cromo, arsénico y boro, cuando son ingeridos en exceso causan efectos adversos en la salud humana y problemas de toxicidad en las plantas, incluyendo la muerte de las mismas. La magnitud del daño a los cultivos está en función de la etapa de crecimiento, la concentración del ion y las condiciones particulares del suelo (FAO, 1992). En el siguiente capítulo, en la Tabla 3.5, se muestran las

concentraciones máximas recomendadas de microelementos presentes en el agua residual tratada para evitar problemas de riego y de crecimiento en los cultivos.

Sales

Otro aspecto importante a considerar es el efecto que tienen en el crecimiento de los cultivos los sólidos disueltos en el agua para riego ya que aumentan la cantidad de energía necesaria para que las plantas transporten el agua del suelo a los tejidos, la respiración aumenta y el crecimiento se ve afectado (FAO, 1992). Podemos destacar tres parámetros importantes relacionados con los sólidos disueltos:

- a) *Concentración total de sólidos disueltos*: La salinidad del suelo tiene su origen en la salinidad del agua de riego y se puede medir en mg/L o partes por millón. El crecimiento del cultivo y la producción agrícola están afectados directamente por la cantidad de sales disueltas en el agua.
- b) *Conductividad eléctrica*: Se utiliza para indicar la totalidad de constituyentes ionizados en el agua y está directamente relacionada con la concentración total de sales (FAO, 1992).
- c) *Relación de Adsorción de Sodio*: Es un parámetro que refleja la posible influencia del ion sodio en el suelo, ya que éste produce una serie de cambios físico-químicos en el mismo, especialmente en su estructura. La presencia de sodio disminuye la capacidad de infiltración de agua y aire en el suelo, además de formar una corteza que inhibe los procesos de germinación.

Nutrientes

El nitrógeno en agua residual puede estar presente como amoníaco, nitritos, nitratos y nitrógeno orgánico, mientras que el fósforo se encuentra principalmente de manera inorgánica. Ambos nutrientes pueden ser benéficos o no, en función del tipo de reúso. En el caso de reúso potable la presencia de estos componentes puede ser perjudicial para la salud humana, por lo que su remoción es indispensable en los procesos de tratamiento (NAS, 1992). Además, el exceso de nutrientes en cuerpos de agua superficiales lénticos puede dar lugar al crecimiento excesivo de algas produciendo eutrofización.

Las necesidades de cada cultivo son diferentes tanto en cantidad de agua y nutrientes requeridos, como en las etapas de aplicación de ambos, por lo que el riego con agua residual tratada con gran cantidad de nutrientes cuando el cultivo no los requiere puede:

- Desencadenar procesos de arrastre e infiltración de nutrientes contaminando el agua subterránea (NRC, 1996).
- El exceso en la aplicación de nitrógeno a los cultivos puede provocar un crecimiento excesivo de follaje reduciendo la calidad y tamaño del fruto, por ejemplo en el cultivo de tomate, papa, cítricos y uva.

Para controlar los efectos de una aplicación excesiva de nutrientes, el tratamiento del agua residual debe llevarse a cabo de manera supervisada, monitoreando los parámetros en el efluente de la planta, además de una cuidadosa selección del tipo de cultivo cuyos requerimientos de nutrientes sean óptimos. Otra medida, que además da protección al agua subterránea, es el monitoreo y el desvío de agua residual tratada con exceso de nitrógeno y fósforo.

2.1.3 Componentes Químicos Orgánicos

La presencia de compuestos orgánicos en agua residual se origina por el uso de productos domésticos e industriales (plaguicidas, productos para el cuidado personal), así como por las excretas humanas (residuos de medicamentos y hormonas); también pueden ser subproductos del tratamiento de agua residual y de plantas potabilizadoras.

El riesgo más importante de la presencia de estos componentes en el agua para riego agrícola se asocia a la contaminación de los cultivos o del agua subterránea (FAO, 1992). En la Tabla 2.3 podemos observar los

principales grupos de componentes orgánicos, sus características principales y algunos ejemplos de uso cotidiano.

Tabla 2.3 Principales componentes químicos orgánicos presentes en agua residual	
Categoría	Descripción
Químicos Industriales	Incluyen solventes, detergentes, derivados del petróleo. Algunos de ellos no se remueven con tratamiento convencional. Su importancia radica cuando existen descargas industriales en el alcantarillado municipal que no reciben pretratamiento.
Pesticidas	Ampliamente utilizados en zonas agrícola y usualmente son transportados por escurrimiento a cuerpos de agua. Entre los más importantes se encuentran: lindano, atrazina y diazinon.
Químicos naturales	Incluyen a las hormonas, de las cuales podemos destacar a los estrógenos presentes en excretas de animales de crianza, principalmente.
Fármacos	Procedentes de las excretas humanas y animales, incluyen antibióticos, analgésicos y anticonceptivos, entre otros.
Productos de cuidado personal	Entre los más utilizados se encuentran: triclosán, bloqueadores solares, fragancias y productos de aseo. Algunos compuestos que los conforman no se eliminan con tratamiento convencional.
Productos del hogar	Utilizados en la limpieza, desinfectantes, solventes

2.2 Efectos negativos directos de los componentes del agua residual sin tratamiento en los sistemas agrícolas de riego y posibles riesgos a la salud humana

Como mencionamos anteriormente, el reúso agrícola puede implicar una serie de afectaciones a los cultivos, a los sistemas de riego, al ambiente y al ser humano. En la Tabla 2.4 se resumen los impactos en la agricultura y en la salud humana del uso de agua residual para riego. De manera particular, las vías de exposición como el contacto o el consumo pueden ocurrir de la siguiente forma:

- Contacto humano (agricultores, vendedores, comunidades locales) directo con el agua residual o los cultivos antes, durante o después de la irrigación.
- Inhalación de aerosoles provenientes del agua residual (en el caso de riego por aspersión).
- Consumo de productos contaminados.
- Consumo de agua contaminada como resultado del reúso agrícola no controlado (infiltración al acuífero).
- Consumo de productos animales contaminados por exposición al agua residual.
- Enfermedades relacionadas directamente a la implementación de riego agrícola (por ejemplo crecimiento de mosquitos en estanques de almacenamiento).

Tabla 2.4 Efectos directos de los componentes del agua residual en los sistemas de riego y salud humana			
Constituyente	Parámetro	Impacto en los cultivos	Vía de exposición e impacto en seres humanos
Nutrientes	N, P, K, etc...	Exceso de nitrógeno produce lesiones, crecimiento, retardo para alcanzar la madurez física, disminución en la producción de frutos, pérdidas económicas.	Consumo Ocurre cuando el agua subterránea es contaminada por infiltración de agua residual producto de un riego excesivo de los cultivos.
Sólidos Suspendedos		Taponamiento en sistemas de irrigación	-
Patógenos	Virus, bacterias, helmintos, coliformes	Agentes causantes de diversas enfermedades en cultivo: como el virus del mosaico del tomate, infecciones por nematodos, virus del mosaico de tabaco, afectando los rendimientos y la producción.	Contacto y consumo Pueden sobrevivir en el ambiente por largos períodos. El riesgo disminuye cuando los alimentos se someten a cocción y desinfección. Se desarrollan en condiciones de mala higiene. Su presencia en el agua residual tratada depende del tipo de tratamiento recibido.

Componentes Orgánicos Biodegradables	DBO DQO	Disminución en la concentración de oxígeno provocando cambios adversos en el hábitat acuático. Cuando se integran al suelo se pueden volatilizar, descomponer o ser absorbidos, por lo que las concentraciones encontradas en suelos son muy bajas, además de que casi no son absorbidas por cultivos (O'Connor et al., 1991)	-
Metales pesados	Cd, Pb, N, Zn, As, Hg	En general, los cultivos requieren cantidades muy pequeñas para su crecimiento, por lo que se suelen acumular en el suelo.	Consumo Dada su baja concentración rara vez se consideran inseguros.
Sólidos inorgánicos disueltos	Na, Ca, Mg, Cl, B	Su presencia en el agua la convierte en no apta para riego. Provocan problemas relacionados con fitotoxicidad y salinidad, además de que afectan la permeabilidad del suelo y su estructura. Aunque son necesarias para el crecimiento adecuado de los cultivos, altas concentraciones detienen el crecimiento. Durante la época de lluvias se disuelven, sin embargo, en períodos de estiaje o en zonas áridas es necesario realizar lavados de suelo constantes	-
Ion hidrógeno	pH	La mayor preocupación ocurre en el agua procedente de la industria. Provoca problemas de crecimiento de cultivos por acidez o alcalinidad	-
Cloro Residual		Provoca quemadura en las hojas.	Consumo Su presencia en agua potable puede producir compuestos carcinogénicos en presencia de ciertos compuestos orgánicos

Fuentes: OMS (2006), Blumenthal et al. (2000)

Para reducir los riesgos a la salud asociados al uso de agua residual tratada en la agricultura para productores y consumidores, existen diversas medidas que se pueden aplicar. En el caso de los consumidores:

- a) Tratamiento de agua residual previo a la irrigación
- b) Restricción en el tipo de cultivo a sembrar
- c) Implementación de patrones de riego para permitir la disminución en la cantidad de patógenos presentes en el suelo (intercalar períodos de riego con agua residual tratada y riego con agua de primer uso)
- d) Adecuada higiene en el manejo y preparación de cultivos regados con agua residual tratada
- e) Promoción de la salud e higiene
- f) Lavado, desinfección y cocción de los alimentos cultivados
- g) Aplicación de técnicas de riego que minimicen la contaminación (preferir riego por goteo o por aspersión en vez de riego por inundación)

Adicionalmente a las medidas anteriores, para el caso de los productores y trabajadores es conveniente:

- a) Utilizar de equipo de seguridad personal
- b) Acceso al agua potable e instalaciones sanitarias en zonas de riego
- c) Promoción de la salud e higiene

Las comunidades aledañas a las zonas de riego con agua residual también son vulnerables, especialmente si no cuentan con agua potable y sus fuentes de abastecimiento están contaminadas con subproductos del riego, por lo que resulta conveniente poner en operación las siguientes estrategias:

- a) Tratamiento de agua residual
- b) Acceso restringido a las zonas de riego con agua residual
- c) Acceso al agua potable
- d) Promoción de la salud e higiene
- e) Acceso a zonas seguras de recreación

2.2.1 Efectos en el agua subterránea

La totalidad de la superficie que abarca el Distrito de Riego 023 y un importante porcentaje de la superficie sembrada en Unidades de Riego se ubican sobre el acuífero Valle de San Juan del Río, por lo que es de vital importancia conocer los efectos del reúso agrícola en el agua subterránea, especialmente porque la fuente de abastecimiento público principal en la región de estudio es el acuífero mencionado. La aplicación directa de plaguicidas en los cultivos representa un mayor riesgo para el agua subterránea que el reúso de agua residual tratada y aplicación de lodos residuales, ya que el agua residual tratada contiene únicamente trazas de plaguicidas (O'Connor et al., 1991). Entre los agentes que pueden ocasionar problemas de contaminación en agua subterránea podemos destacar:

- a) *Microorganismos patógenos*: En general, es poco probable que las bacterias y virus que se encuentran en el lodo residual sean transportadas hacia un acuífero, en especial los helmintos, cuyo tamaño impide su transporte (Gerba, 1983). Por otro lado, debido a su tamaño, los virus representan un problema para el reúso agrícola. La Agencia de Protección al Ambiente recomienda tratamiento secundario y desinfección para emplear el agua residual tratada en el riego agrícola, ya que el tratamiento primario y secundario ayudan a remover aproximadamente el 90% de virus y la desinfección entre el 99.9 y el 99.999% (Asano, 2002). Por lo que un tratamiento adecuado y suelos con baja permeabilidad logran minimizar de manera importante los riesgos asociados a la contaminación por virus y bacterias.
- b) *Metales pesados*: Los procesos de tratamiento avanzado de agua residual y lodos permiten remover iones metálicos. Adicionalmente, las partículas de suelo ayudan a la remoción de la mayoría de metales pesados, por lo que es poco probable que percolen por debajo de suelos no saturados hacia algún acuífero. (NRC, 1996).
- c) *Compuestos Orgánicos Tóxicos*: En el agua residual municipal podemos destacar a los detergentes, cuya concentración es mayor que la presente en el agua de riego. En plantas de tratamiento municipales, estos compuestos son concentrados en lodos residuales (NRC, 1996) y pueden ser biodegradables, por lo que representan poco riesgo para el agua subterránea.

2.3 Tratamiento de agua residual

Aunque en muchas ocasiones el tratamiento de agua residual es visto como la única opción de control, una óptima combinación entre medidas de protección a la salud, restricciones de cultivos y procesos de tratamiento, así como adaptación a las condiciones socioculturales y económicas de la región, permiten conformar una estrategia con mayor probabilidad de éxito, menor riesgo a la salud y al medio ambiente.

En esta sección, abordaremos de manera breve los diversos procesos de tratamiento de agua residual, sus ventajas y desventajas en relación al reúso agrícola y las implicaciones ambientales y económicas de cada uno, ya que los costos de tratamiento aumentan en función de la mejora realizada a la calidad del agua, por lo que se deberá evaluar si el valor del cultivo y la escasez de agua justifica mayores niveles de tratamiento para el agua residual antes de su aplicación.

El grado de tratamiento requerido para la utilización de agua residual en el riego agrícola depende del tipo de cultivo, condiciones particulares de la región y legislación vigente, pero también se deben considerar medidas de protección al ambiental, calidad del agua requerida por los cultivos y restricciones de los sistemas de riego para su aplicación (EPA, 2012).

Se pueden distinguir dos grandes familias de procesos de tratamiento:

- a) Sistemas de baja carga : basados en sistemas lagunares con tiempos de retención hidráulicos altos
- b) Sistemas de alta carga: basados en infraestructura, operaciones y procesos unitarios diseñados para reducir los tiempos de retención hidráulicos.

2.3.1 Sistemas de baja carga

En esta categoría se incluyen a los procesos de depuración natural, la cual ocurre a través de procesos físicos, químicos y biológicos naturales que se desarrollan en un sistema plantas-suelo-agua-matriz rocosa (Moreno, Fernández *et al*, 2003) y se pueden clasificar de la siguiente forma:

Tratamiento en el terreno: Se utilizan para mejorar la calidad del agua y proveer de almacenamiento natural para el agua de reúso. Incluyen procesos de infiltración lenta e infiltración rápida, así como flujo superficial mediante lagunas de infiltración, pozos de infiltración, etc. Requieren poco mantenimiento y el consumo de energía es bajo, sin embargo, aún no existen parámetros de diseño claros y estandarizados que permitan operarlos de manera óptima (NRC, 1996).

Sistemas acuáticos: Incluyen la creación de espacios de recreación y restauración de flora y fauna. Entre los más importantes podemos destacar: humedales, lagunas, cultivos acuáticos.

Lagunas de estabilización

Son depósitos de agua de poca profundidad que aprovechan factores naturales como luz solar, temperatura, sedimentación y biodegradación para lograr el tratamiento de agua residual (Mara, 2004). Las lagunas pueden ser aerobias, anaerobias o facultativas y usualmente se emplean combinaciones para lograr un mejor tratamiento. En regiones con climas templados o fríos, el tiempo de retención hidráulico es mayor, mientras que en regiones cálidas el proceso se realiza de forma más efectiva.

Las lagunas de estabilización son uno de los sistemas de tratamiento menos costosos siempre y cuando el precio del terreno sea bajo, ya que requieren grandes extensiones para su funcionamiento. El mantenimiento que requieren es prácticamente nulo así como los costos de operación derivados del uso de electricidad.

Humedales

Son sistemas de fitodepuración de agua residual, basado en el desarrollo de macrófitas que se desarrollan en un lecho de arena o grava (Delgadillo *et al.*, 2010). Existen tres tipos de humedales artificiales para el tratamiento de agua residual: flujo superficial, de flujo subsuperficial y de flujo vertical. En general se utilizan como parte de procesos de tratamiento secundario y terciario con algún tratamiento primario previo, como lagunas de estabilización o plantas de tratamiento convencionales (OMS, 2006).

2.3.2 Sistemas de alta carga

De manera general se suelen dividir en tres etapas: tratamiento primario, secundario y avanzado, permiten reducir de manera notable el tiempo de retención hidráulico. Suelen ser más costosos, en especial cuando se requiere tratamiento avanzado para remover algún contaminante en específico.

Tratamiento Primario

Su propósito principal es remover materiales sólidos del influente de la planta (Vázquez & Cesar, 2003). Los grandes residuos se pueden retirar mediante rejillas, mientras que los sólidos inorgánicos de mayor tamaño pueden retirarse mediante el uso de un canal desarenador. Finalmente, mediante sedimentación se puede remover hasta el 50% de los sólidos suspendidos orgánicos.

Tratamiento Secundario

Es la conversión biológica de compuestos orgánicos en biomasa, la cual puede removerse fácilmente mediante sedimentación (Vázquez & Cesar, 2003). Gracias a estos procesos se pueden remover sólidos suspendidos totales, materia orgánica disuelta y en parte, nutrientes (NAS, 2012).

Existen dos mecanismos para lograr el contacto entre microorganismos y compuestos orgánicos: mezclando para lograr la suspensión de la biomasa (lodos activados) o permitiendo la formación de una película en una superficie sólida (filtros percoladores, biodiscos y biorreactores). En ambos casos, la separación de los sólidos ocurre por sedimentación (donde ocurre la generación de lodo secundario) y finalmente una etapa de desinfección.

Los procesos de desinfección son aquellos diseñados para reducir la cantidad de patógenos presentes en el agua residual tratada (NAS, 2012). De manera general, los patógenos que se desean eliminar son bacterias, virus y protozoarios (NAS, 2012). Puede utilizarse cloro en fase gaseosa, hipoclorito de sodio, desinfección con rayos UV u ozono. El nivel de la desinfección estará en función de la cantidad de agente desinfectante utilizado, del tiempo de contacto y de la calidad del agua (Vázquez & Cesar, 2003).

Tratamiento avanzado o terciario

El tratamiento avanzado es utilizado en plantas municipales cuando se requiere una mayor calidad que la proporcionada por el tratamiento secundario. El tipo de tratamiento avanzando estará en función del tipo de reúso, fuente de agua de primer uso, costos, consumo de energía, entre otros, y considera la remoción adicional de nutrientes y componentes orgánicos, reducción de los sólidos disueltos totales y salinidad, así como la implementación de barreras adicionales contra agentes patógenos. Entre los principales procesos que se pueden aplicar en función del elemento objetivo a remover se encuentran: remoción de nutrientes (nitrificación – desnitrificación, precipitación química), remoción de sólidos (filtración con membranas), adsorción en carbón activado y procesos de oxidación química. Generalmente estos procesos se utilizan para reúso potable y no son necesarios para el caso de reúso agrícola.

2.4 Lodo residual

Dada la experiencia previa de la utilización de excretas humanas y estiércol en la producción de cultivos, el uso de lodos en la agricultura (Figura 2.1) ocurre desde que su producción comienza, ya que contiene la mayoría de los elementos esenciales para el crecimiento de plantas, en específico nitrógeno y fósforo, que son los nutrientes más abundantes y que se utilizan como suplemento de los fertilizantes químicos (Metcalf & Eddy, 1991).

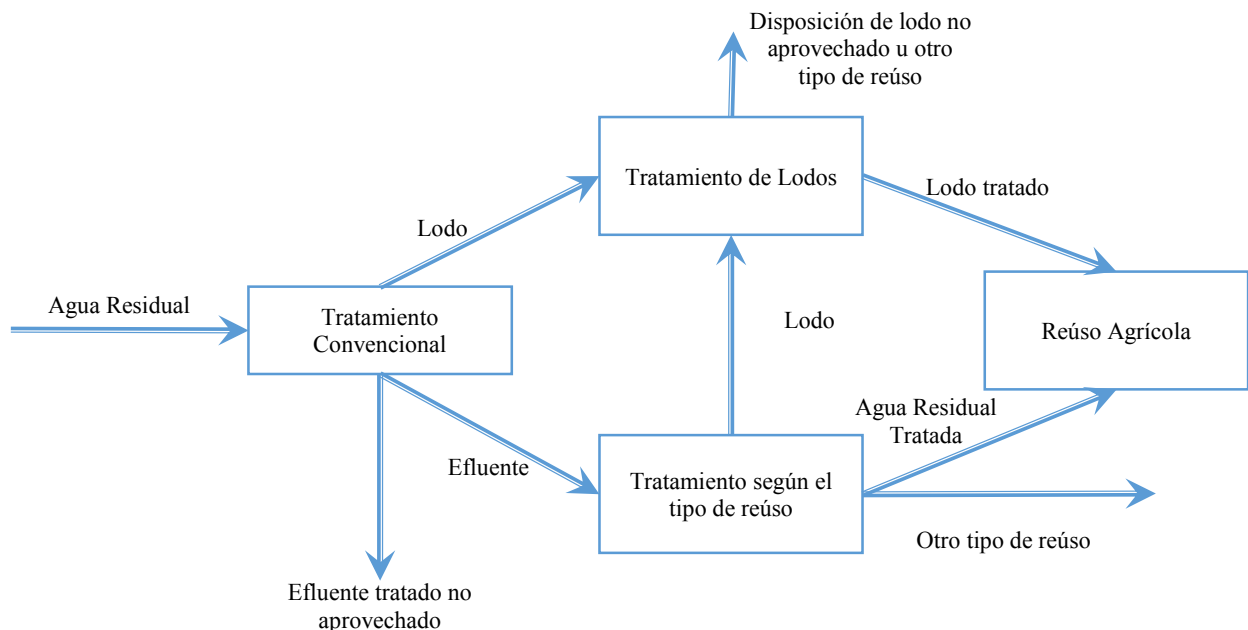


Figura 2.1 Diagrama que muestra la importancia del lodo residual en el reúso agrícola, el cual debe ser tratada y puede ser aprovechado por los cultivos o tener otras aplicaciones

El lodo residual es el producto final del tratamiento de agua residual y contiene la mayoría de contaminantes removidos del influente, por lo que la composición de sólidos suspendidos, materia orgánica y nutrientes es alta y variable en función del proceso de tratamiento empleado. (NRC, 1996). Pero también contiene elementos esenciales para el crecimiento de cultivos como zinc y cobre, ayudando a reducir carencias naturales del suelo (Martens & Westermann, 1991).

2.5 Efectos benéficos del reúso agrícola de agua residual tratada

La práctica supervisada y planeada del reúso agrícola provee una alternativa para disponer el agua tratada utilizando los nutrientes que contiene para la producción de cultivos, así como el uso del lodo residual tratado como abono orgánico ya que contiene materia orgánica y mejora las características físicas del suelo. Entre los principales beneficios que ofrece la práctica del reúso agrícola podemos destacar:

- a) Valor del agua de reúso para otras actividades
- b) Liberación de agua de primer uso para la población
- c) Valor de los nutrientes contenidos en el agua de reúso
- d) Mayor seguridad alimentaria para la población
- e) Se reducen los costos de tratamiento ya que se puede prescindir de los procesos para la remoción de nutrientes
- f) Mejora en las propiedades físicas y químicas del suelo
- g) Menor consumo de energía asociado a la extracción de agua por bombeo
- h) Ahorro en el consumo de energía relacionado con el tratamiento
- i) Disminución en el uso de fertilizantes químicos

2.5.1 Aplicación de Nutrientes

El agua residual tratada es fuente de nutrientes, especialmente fósforo y nitrógeno. La concentración de dichos nutrientes estará en función del origen del agua, su uso y el grado de tratamiento recibido, ya que en cada etapa del tren de tratamiento se remueve un cierto porcentaje de la misma. De manera general, el agua residual tratada tiene una concentración de nitrógeno de entre 20 mg/l y de fósforo alrededor de los 10 mg/l. Por lo que si en promedio la lámina de riego anual en el Distrito de Riego es de 800 mm (CONAGUA, 2014), la práctica de reúso agrícola permitiría la adición de 160 kg/ha de nitrógeno al año y de 80 kg/ha de fósforo al año.

2.5.2 Aplicación de agua y lodo residual

La materia orgánica conserva y mejora las propiedades benéficas del suelo (porosidad, presencia de aire y agua, bajo grado de compactación, retención de humedad); ya que a medida que un suelo es cultivado y la materia orgánica consumida no es repuesta, las propiedades físicas del suelo se deterioran, la porosidad y el contenido de aire-agua disminuyen, aumentando la densidad del mismo.

La aplicación de lodo residual, en general, aumenta la capacidad del suelo para retener agua, mientras que ayuda a disminuir la densidad del mismo. Sin embargo, se requieren grandes cantidades para lograr modificar sustancialmente las propiedades físicas del suelo. A largo plazo, la aplicación de agua residual tratada y lodo residual ayudan a mejorar la estructura del suelo, aumentando la tasa de infiltración de agua y en ciertos casos disminuyendo la tasa de erosión (NRC, 1996).

3. Capítulo III Experiencias de reúso agrícola y Legislación

3.1 Reúso agrícola en el mundo

En regiones con alta demanda del recurso hídrico, baja disponibilidad y donde la producción de cultivos resulta indispensable para su desarrollo, el reúso agrícola ha formado parte fundamental de este proceso durante décadas, permitiendo generar una serie de conocimientos y experiencia aplicable a nuevos proyectos en desarrollo. El reúso agrícola ha sido utilizado en diversos lugares y momentos en el mundo. En la Figura 3.1 se muestra el volumen de agua residual tratada o sin tratamiento empleado en diversos países para la agricultura. Cabe destacar que la mayoría de estos países se encuentran en zonas de baja disponibilidad de agua, con altas tasas de crecimiento poblacional y con sistemas desarrollados de agricultura cuya importancia económica ha ocasionado la implementación del reúso agrícola.

A lo largo del tiempo, la práctica del reúso de agua se ha complementado con estudios científicos y normatividad que ha permitido evitar riesgos a la salud de la población y a su vez aumentar la productividad de los cultivos, reduciendo costos de producción. En la Tabla 3.1 se resumen algunas de estas experiencias enlistando tipo de cultivo, volumen de agua residual tratado y de reúso y que pueden apoyar a la implementación de esta práctica.

3.1.1 Caso California

La agricultura en el estado es diversa e incluye una gran variedad de cultivos (más de 400 *commodities* o materias primas) donde se produce más de la mitad de frutas, semillas y vegetales de los Estado Unidos, los cuales también se exportan otros países (SWRCB, 2015). Dada la importancia de esta actividad, el estado de California es una de las regiones donde el tratamiento de agua residual y el reúso ha sido practicado durante décadas, ya que se ha considerado que constituye una estrategia confiable, económicamente viable y ambientalmente adecuada para maximizar la disponibilidad del recurso hídrico.

Existen 250 plantas de tratamiento de agua residual con un volumen de reúso anual de entre 555 y 715 millones de metros cúbicos al año (ACWA, 2015) (1.50 a 1.95 millones de metros cúbicos al día). Aproximadamente 67% del agua residual tratada se utiliza para irrigación donde el 46% se destina a usos agrícolas y 21% para riego de parques y jardines, del volumen restante, el 14% se utiliza para recarga del acuífero y el 19% restante para otros usos como reúso industrial, construcción, abastecimiento público, etc... En el futuro, hacia el año 2030, California requerirá aumentar el volumen de reúso hasta 1 800 millones de metros cúbicos al año para satisfacer la demanda de los 17 millones de habitantes adicionales que llegarán a ese estado (ACWA, 2015).

Según cifras del Departamento de Recursos Hidráulicos del estado, la agricultura utiliza aproximadamente 308 millones de metros cúbicos al año de agua residual tratada (844 000 m³ al día) donde se cultivan más de 50 especies diferentes (CDWR, 2004).

Entre los principales beneficios de aplicar este tipo de programas en el estado podemos destacar: control de la contaminación de agua, restauración de humedales, prevención de escasez de agua conservando el recurso de primer uso, provee fuentes adicionales de abastecimiento además de nutrientes y materia orgánica para restauración de suelos, provee protección contra sequías, aumenta las ganancias de proyectos de infraestructura y agrícolas, además de beneficios sociales como; creación de empleos y mejoramiento en las condiciones de salud humana y del ambiente.

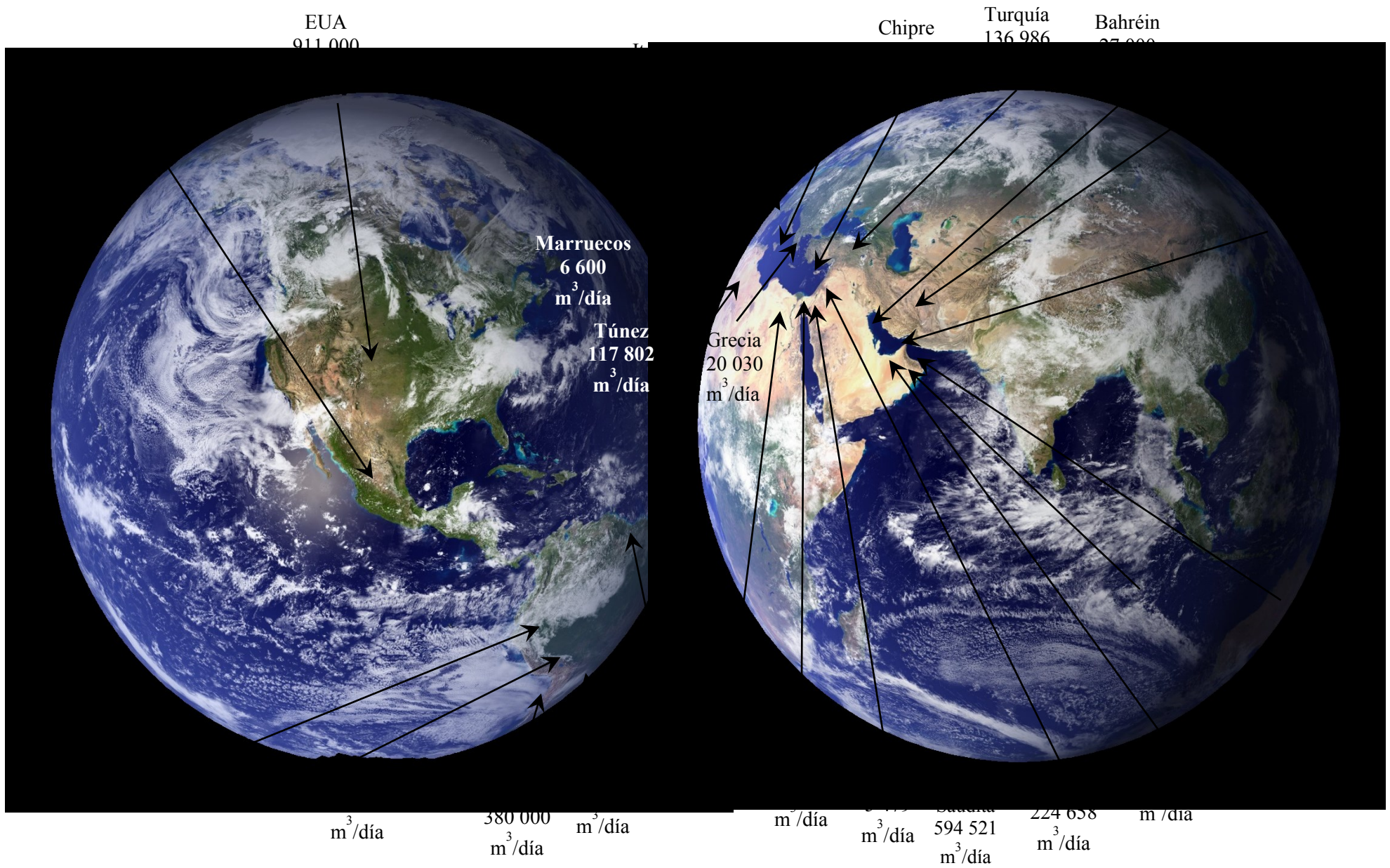


Figura 3.1 Gasto de reúso agrícola en diversos países del mundo en 2004 -2005

Adaptado de: Takashi Asano & Blanca Jiménez Water Reuse: An International Survey of Current Practice, Issues and Needs

Tabla 3.1 Ejemplos de experiencias de reúso agrícola en el mundo

Lugar	Descripción	Agua residual tratada	Agua residual tratada reúso	Tipo de Tratamiento	Cultivos irrigados	Experiencias a destacar
Mendoza, Argentina (EPA 2012)	Se localiza al pie de la cordillera de los Andes al oeste de Argentina. Población 700 000 habitantes.	147 000 m ³ /día	147 000 m ³ /día	Lagunas de estabilización facultativa, aeróbica y de maduración	2 700 ha Uva, jitomate, calabaza, principalmente Lavado de suelo	Fuente de abastecimiento continua y confiable Reducción en costos de tratamiento Manejo adecuado del riesgo Reducción en la contaminación del acuífero y del suelo. Fertilización natural del suelo Disminución en el nivel de explotación del acuífero.
Ontario, Canadá (EPA 2012)	El lago Simcoe es uno de los cuerpos de agua más grandes de la provincia y ofrece servicios de pesca y turismo para la población. Existen 14 plantas de tratamiento que descargan cantidades excesivas de nutrientes provocando eutroficación.	Únicamente se realiza aprovechamiento de nutrientes		Tratamiento Secundario	Principalmente forrajeros	Se calculó el costo de remover fósforo para diversos reúsos y se determinó que el reúso agrícola era el más económico en comparación con tratamientos avanzados para su remoción.
Bogotá, Colombia (EPA 2012)	Población: 10 millones de habitantes. Gran parte de la ciudad cuenta con alcantarillado pluvial y sanitario por separado.	Planta el Salitre 4 m ³ /s Planta Canoas (2016) 14 m ³ /s	Distrito la Ramada 1.7 m ³ /s con incremento a 5 m ³ /s	Tratamiento Primario Avanzado	Distrito de Riego la Ramada	Aunque el reúso agrícola se asocia a regiones con baja disponibilidad de agua, existen excepciones donde la escasez de agua no es el principal motivo para implementar programas de reúso.
Jordania (FAO 1992)	Con una disponibilidad de 150 m ³ /hab/año, el manejo del agua ha sido uno de los principales retos para el país, aunado al crecimiento poblacional y al aumento en la demanda per cápita.	220 000 m ³ /día	220 000 m ³ /día	Lodos activados Tratamiento Secundario	Cultivos forrajeros: principalmente alfalfa. Palma y olivo	Beneficios económicos indirectos al reducir costo de insumos. Reúso industrial en diversas ciudades del país como torres de enfriamiento. Mejoramiento de la calidad del ambiente al reducir descargas de agua residual. Mejora en la calidad de vida de la población.
Faisalabad Pakistán (FAO 1992)	La región cuenta con 2 500 hectáreas que se riegan con agua residual doméstica. Aunque existe tratamiento mediante lagunas de estabilización, los agricultores prefieren utilizar agua sin tratamiento.	90 000 m ³ /día	90 000 m ³ /día	Lagunas de estabilización. (anaerobia, facultativa y de maduración) THR 16.5 días	Forrajeros, trigo y vegetales (espinaca, berenjena, coliflor, chile y jitomate).	Los cultivos irrigados con agua residual tratada tuvieron mayor peso y calidad, además se incrementó el índice tonelada/hectárea cosechada. Se redujo la cantidad de fertilizantes químicos utilizados. El reúso agrícola promueve el desarrollo económico de la población rural, provee seguridad alimentaria y ayuda a prevenir la contaminación de otros cuerpos de agua.
As Samra, Jordania (FAO 1992)	El sistema de tratamiento comenzó a operar en 1986 recibiendo 57 000 m ³ /día de agua residual proveniente de la ciudad de Amman. El Sistema comprende tuberías e instalaciones hidráulicas para transportar el agua hasta la planta localizada a 40 km de la ciudad.	57 000 m ³ /día en 1992 268 000 m ³ /día en 2012	57 000 m ³ /día en 1992	Lagunas de estabilización con 3 trenes de tratamiento cada uno con dos lagunas anaerobias, cuatro facultativas y cuatro de maduración	Forrajeros y frutales, principalmente	Obtención de energía a partir de digestión anaerobia de lodos para propio consumo de la planta. Se demuestra que el reúso agrícola puede ser confiable, viable económicamente, socialmente aceptado, sustentable y seguro. Aumento notable en la productividad (ton/ha) y aumento en los ingresos de los agricultores, reduciendo desempleo, delincuencia y pobreza.

Tabla 3.1 Ejemplos de experiencias de reúso agrícola en el mundo

Lugar	Descripción	Agua residual tratada	Agua residual tratada reúso	Tipo de Tratamiento	Cultivos irrigados	Experiencias a destacar
Túnez (FAO 1992)	El reúso agrícola ha sido practicado durante décadas y ahora forma parte vital del plan hídrico de ese país. En 1988 el volumen de agua residual tratada disponible fue de 78 millones de metros cúbicos. En 1988 el sistema contaba con 26 plantas de tratamiento	342 000 m ³ /día en el año 2000	325 000 m ³ /día en el año 2000	26 plantas de tratamiento de las cuales: 16 con sistema lodos activados, 2 con sistema filtros percoladores, 5 con sistema lagunar y 3 con sistema zanjas de oxidación.	Limón, olivo, forrajeros, algodón y riego de campos de golf.	La disponibilidad de agua residual tratada permitirá aumentar el área irrigada a 6 700 hectáreas. El reúso agrícola induce a una mayor disponibilidad de agua de primer uso que asegura el crecimiento y el desarrollo económico de la ciudad. La calidad del agua es absolutamente indispensable además de las instalaciones de almacenamiento para mantener un balance constante de agua. Al implementar reúso agrícola, únicamente debe existir una opción de abastecimiento (no ofrecer agua potable y residual tratada).
Kuwait (FAO 1992)	Durante años se utiliza agua residual para crecimiento de árboles para madera y papel en zonas deshabitadas del país. Luego de estudios sobre salud y medio ambiente se decide implementar un programa de reúso con agua residual tratada. En 1987 había cuatro plantas de tratamiento en funcionamiento. 6445 ha 1980 a 12288 ha en 2010	150 000 m ³ /día PTAR Ardiyah 96 000 m ³ /día PTAR's en costas 65 000 m ³ /día PTAR Jahra 10 000 m ³ /día en planta con lagunas de estabilización.		Lodos activados y lagunas de estabilización. En 1990 se adapta tratamiento terciario con cloración y filtración rápida con arena.	Forrajeros: alfalfa, pasto, maíz, trigo, avena. Frutales: Palma, olivo, vid. Vegetales que se consumen crudos o cocidos.	Gracias al reúso agrícola se incrementó la superficie regada y cosechada, además del rendimiento por hectárea lo cual ha permitido satisfacer de manera adecuada al mercado. El agua residual tratada no se aplica para riego de parques ni otras áreas verdes y se evita el contacto de la población con el agua. El sistema cuenta con un sistema de monitoreo del suelo y cultivos que permite controlar el volumen aplicado y la calidad del agua de reúso. Vegetales: papa, cebolla y ajo se riegan con cualquier método. Vegetales que se consumen cocidos se riegan con cualquier método menos aspersión. Vegetales que se consumen crudos se regaban con agua proveniente de tratamiento terciario y riego por goteo
Phoenix, Arizona (EPA 2012)	Respecto al reúso agrícola, el agua residual tratada se destina a irrigación para la compañía Buckeye Irrigation Company localizada a 32km al oeste de la planta con una capacidad de 68 000 m ³ /día.	535 000 m ³ /día	229 000 m ³ /día como agua de enfriamiento 96 000 m ³ /día para reúso agrícola	Lodos activados y reactor SBR (biológico secuencial)	Principalmente forrajeros: avena, arroz, trigo, sorgo, maíz y pastos	Reducción en el volumen de extracción del acuífero. El reúso agrícola ha permitido que las actividades del sector continúen desarrollándose a pesar de la poca disponibilidad de agua. Seguridad económica y alimentaria.
Chipre (Papaiacovou, I., Achileos, C., 2012)	Chipre es una de las islas más grandes del Mediterráneo con 240 km de largo por 100 km de ancho y es el país miembro de la UE con menor disponibilidad de agua con una sobreexplotación del 45%. Como resultado el nivel estático de los acuíferos ha disminuido y se ha presentado el fenómeno de intrusión salina. Los nuevos proyectos que se incorporan al sistema comienzan a incluir tecnologías avanzadas como membranas	90% del agua residual tratada es utilizada en riego agrícola	38 000 m ³ /día	El proceso más común es lodos activados convencional, seguido de filtración con arena y desinfección.	Frutales, cítricos, olivo y forrajeros.	10% de la demanda total de agua se sustituye con el reúso agrícola, especialmente en periodos de sequía cuando se puede seguir con parte de la producción. Se planea incrementar la capacidad del sistema hasta 160 000 m ³ /día de tratamiento y 142 000 m ³ /día para reúso agrícola. Los costos de construcción y operación han sido absorbidos mediante tarifas y aquellos derivados de la implementación de tratamiento terciario han sido absorbidos por el gobierno.

3.1.2 Caso Israel

Israel se localiza en la región árida del Medio Oriente, donde la disponibilidad de agua es baja y donde la alta densidad poblacional obliga a implementar zonas de riego agrícola con agua residual tratada. Una de las principales políticas de dicho país ha sido el tratamiento y reúso del agua residual. Entre 1992 y 2003 el volumen de agua residual tratada aumentó de 126 a 332 millones de metros cúbicos (ONU, 2004), mientras que el volumen de reúso agrícola se ubicó en 300 millones de metros cúbicos (820 000 metros cúbicos al día) aportando el 30% del volumen total requerido por esa actividad (alrededor de 1 000 millones de metros cúbicos al año) (ONU, 2004).

Los principales objetivos que se buscan con la aplicación del reúso agrícola en Israel son:

- 1) Aumentar la disponibilidad de agua de primer uso para abastecimiento público,
- 2) Incrementar el volumen disponible para riego agrícola para asegurar la producción.
- 3) Proteger al ambiente de los daños que el agua sin tratamiento podría causar.

3.1.3 Caso Irán

Irán se localiza en el Medio Oriente en un territorio donde el 90% de la superficie es montañosa y desértica. La precipitación media anual es de 230 mm mientras que la evapotranspiración media anual supera los 2 000 mm por lo que existe un déficit en materia de agua. El periodo de estiaje supera los 8 meses al año.

El volumen anual tratado de agua residual en el país era de 650 mil metros cúbicos al año (1995), para 2001, dicho volumen se había incrementado a 712 000 m³/día. En 2010, gracias a la construcción de nuevas plantas de tratamiento, el volumen anual tratado fue de 2.4 millones de metros cúbicos.

A su vez, el volumen de agua residual tratada utilizada en la agricultura se ha incrementado al pasar de 650 000 m³ por día en 1995 a 898 000 metros cúbicos por día en 2010. Los objetivos del programa de reúso se centran en satisfacer y garantizar la demanda de agua potable para la población actual y futura reemplazando la demanda de agua de primer uso para la agricultura e industria por agua residual tratada.

Respecto al tipo de tratamiento, destacan lodos activados y lagunas de estabilización, gracias a ello se han mejorado las condiciones de salud e higiene de la población. Los programas de reúso agrícola se han complementado con otras medidas como la imposición de límites en el abastecimiento de agua potable (de primer uso) a industrias que no han tomado medidas respecto al tratamiento y reúso de agua.

3.1.4 Caso Egipto

Al igual que en otras zonas con escasez del recurso hídrico, en Egipto las actividades agrícolas representan entre el 80% y 85% del total de la demanda de agua en el país. Dicha demanda aunada al crecimiento poblacional y desarrollo industrial del país, han provocado un aumento en la extracción de agua de los acuíferos del país al pasar de 900 millones de metros cúbicos en 1997 a más de 4 000 Mm³ estimados para 2017.

Para el año 2000, el volumen anual tratado en plantas de tratamiento en el país fue de 570 000 metros cúbicos por día, de los cuales se reporta que 548 000 metros cúbicos se destinan para reúso agrícola.

Al igual que en otros casos, respecto al tipo de tratamiento destacan lodos activados, lagunas de estabilización y filtros percoladores. El reúso agrícola se desarrolla con agua residual tratada y con los retornos agrícolas. De manera paralela, se han realizado modificaciones en la legislación y se han aplicado regulaciones sobre la descarga de agua residual, planes de rotación de cultivos, medidas de protección a salud humana y especificaciones sobre tipo de riego y tipo de cultivo a sembrar.

Gracias a la aplicación de estos programas se ha podido combatir la desertificación al crear nuevas áreas de cultivo donde también se mejora la calidad del aire y absorción de dióxido de carbono. La aforestación ha permitido el cultivo de árboles para la producción de madera, papel y biodiesel.

3.1.5 Caso Arabia Saudita

En la ciudad de El Riyadh existen 5 plantas de tratamiento centralizadas con una capacidad de 634 000 m³/día y más de 77 plantas de tratamiento descentralizadas con una capacidad total de 178 000 m³/día. La construcción de nueva infraestructura de saneamiento aunada a la publicación de nuevos lineamientos para el reúso agrícola en 2006 ha incentivado esta práctica en dicho país.

El volumen anual tratado se ha incrementado en los últimos años al pasar de 40 000 m³/día en 1976 a 812 000 m³/día en 2012. Respecto al volumen de agua tratada de reúso, entre 170 000 y 200 000 m³/día se destinan para reúso agrícola y riego de áreas verdes. Las zonas de riego de Dirab y Dariyah utilizan 92 000 y 70 400 metros cúbicos al día respectivamente. Por otro lado, entre 15 000 y 20 000 metros cúbicos al día se destinan al reúso industrial. El tipo de tratamiento se compone de pretratamiento, tratamiento primario y lodos activados o filtros percoladores, también predominan lagunas de estabilización y cloración. Respecto a los cultivos irrigados destacan: trigo, forrajeros, frutales, vegetales y palmas.

La práctica de reúso agrícola ha permitido duplicar el área de cultivo en ambas regiones agrícolas, donde además se ha reducido la cantidad de fertilizantes químicos, reduciendo costos y utilizando lodo residual tratada como mejorador de suelo luego de su tratamiento (digestión anaerobia).

3.2 Reúso agrícola en México

México es uno de los países donde la práctica del reúso agrícola se ha desarrollado de manera extensa utilizando agua residual sin tratamiento, aunque exista legislación al respecto (ver sección 3.3.2). Por otra parte, en la Tabla 3.2 se muestran algunas de las experiencias de reúso más importantes del país con agua residual tratada.

Tabla 3.2 Ejemplos de experiencias de reúso agrícola en México

Lugar	Descripción	Agua residual tratada	Agua residual al tratada a reúso	Tipo de Tratamiento	Cultivos irrigados	Experiencias a destacar
Valle del Mezquital, México (Kazner, C., et al, 2012)	El reúso se ha practicado durante décadas sin ningún tipo de tratamiento. La irrigación de más de 90 000 hectáreas con un gasto superior a los 52 m ³ /s ha provocado el aprovechamiento de nuevas de fuentes de abastecimiento. Se construye la PTAR Atotonilco para dar tratamiento al agua residual previa aplicación al suelo.	23 m ³ /s y 12 m ³ /s adicionales en temporada de lluvia		Lodos Activados y Físico Químico	Maíz, alfalfa, hortalizas y forrajeros.	Se considera al reúso agrícola como una experiencia positiva ejercida por la falta de agua. Producción científica respecto a efectos en el ambiente y en la salud de la aplicación de agua residual sin tratamiento en el suelo (como la salinización)
Tulancingo, Hidalgo (Hernández, E., et al, 2014)	Distrito de Riego 028 ubicado en los municipios de Tulancingo, Santiago Tulantepec y Cuauhtepic de Hinojosa al sureste del estado a una elevación de 2 140 msnm. Se riegan 300 hectáreas (54% de la demanda del recurso)	8 L/s		RAFA y filtro biológico	Avena, maíz y alfalfa	La aplicación e agua residual sin tratamiento provoca alta contaminación por coliformes fecales y huevos de helminto que sobrepasan los límites máximos permisibles de las normas mexicanas.
Ciudad Juárez, Chihuahua (CONAGUA – IMTA, 2010)	Riego de 3 000 hectáreas. Región clima árido con una precipitación media anual de 234 mm y una evaporación que excede los 2 000 mm anuales.	Planta Norte 1 500 L/s Planta Sur 1 000 L/s	2.5 m ³ /s	Lodos Activados	Diversos	Desarrollo notable de literatura e investigación al respecto. Importancia de los programas piloto previo a la implementación.

Tabla 3.2 Ejemplos de experiencias de reúso agrícola en México

Lugar	Descripción	Agua residual tratada	Agua residual tratada a reúso	Tipo de Tratamiento	Cultivos irrigados	Experiencias a destacar
Aguascalientes, Aguascalientes (CONAGUA, 2011)	El estado enfrenta una grave situación respecto a la disponibilidad de agua subterránea. Existen 103 plantas de tratamiento con una cobertura del 88.9%. Del agua residual tratada, el 46.1% se destina para riego agrícola.	216 000 m ³ /d en promedio	110 000 m ³ /d	Lodos activados en general, sistema dual	Diversos	Aumento en la disponibilidad de agua de primer uso para la población. Disminución de costos por concepto de agua para agricultores.
Mexicali, Baja California (CESPM, 2015)	La región de Mexicali cuenta con un clima, una precipitación menor a los 100 mm y temperaturas calurosas durante gran parte del año. Dado el entorno mencionado, se promueve el reúso agrícola e intercambio por agua de primer uso.	PTAR Zaragoza o Mexicali I 123 460 m ³ /d aunque según fuente consultada		Lagunas de estab.	Algodón, sorgo, alfalfa y otros forrajeros	Aumento en la productividad por hectárea. Seguridad económica y alimentaria.

3.2.1 Caso San Luis Potosí

La zona metropolitana de San Luis Potosí cuenta con una población de 1 040 445 habitantes (INEGI, 2010) y una precipitación media de 380 mm, lo cual hace que sea considerada como un región semiárida. La principal fuente de abastecimiento (92%) es el acuífero Valle de San Luis Potosí que se encuentra sobreexplotado y fue declarado zona de veda en 1961. En 2011 se tenía una cobertura de saneamiento del 70% con un caudal tratado de 1 795 L/s (CEA-SLP, 2011). Con la construcción de la PTAR “El Morro”, se llegará a una cobertura del 100% con un caudal tratado de 2 545 L/s. En la Tabla 3.3 se muestran los detalles de operación de cada una de las plantas de tratamiento del sistema.

Tabla 3.3 Plan Integral de Saneamiento San Luis Potosí

Planta	Inicio de Operación	Capacidad Instalada (L/s)	Tipo de Tratamiento	% Acumulado de cobertura
Club de Golf	1998	40	Lodos activados	1.57
San Luis Potosí	1998	35	N.D.	2.95
Tangamanga I - II	1999	150	Lodos Activados	8.84
Norte	2002	400	Lagunas de estabilización	25.56
CIMA	2005	80	N.D.	27.70
Tenorio	2006	1 050	TPA y Lodos Activados	68.96
IMMSA	2010	40	N.D.	70.53
El Morro	N.D.	750	N.D.	100

El agua residual tratada en las plantas mencionadas tiene como principales destinos el reúso industrial y agrícola. Como parte de la estrategia de reúso industrial se maneja: agua producida en la PTAR Tenorio para sistemas de enfriamiento en la Central Termoeléctrica CFE Villa de Reyes y otras empresas con un caudal de 525 L/s. Entre los principales beneficios obtenidos han sido el ahorro en un 34% del costo del agua utilizada por CFE (CEA-SLP, 2011) y reducción en el acuífero Villa de Reyes por 40 millones de metros cúbicos en los últimos 5 años (CEA-SLP, 2011).

Respecto al reúso para irrigación, éste se realiza en campos de golf (Campestre y la Loma con 82 hectáreas), parques públicos (Tangamanga I y II con 310 hectáreas). El reúso agrícola permite la irrigación de 2 060 hectáreas con agua proveniente de 4 plantas de las mencionadas en la Tabla 3.3 y gracias a este se han obtenido los siguientes beneficios:

- Reducción de enfermedades gastrointestinales en la población
- Mejora en las condiciones de trabajo de agricultores.
- Mejora en el entorno ecológico
- Trabajo social para dar a conocer el valor agregado del reúso agrícola.
- Aplicación exitosa de una cadena de reúso donde el agua utilizada en la Central Termoeléctrica es utilizada para riego de 200 hectáreas (CEA-SLP, 2011).

3.2.2 Reúso agrícola en Querétaro

En el caso particular de esta entidad, en la Tabla 3.4 se resumen algunas de las experiencias de reúso en el estado, cabe destacar que se menciona a la ciudad de San Juan del Río, sin embargo el análisis particular de esta área se incluye en el capítulo VIII. La entidad presenta atrasos en la cobertura de tratamiento con una cobertura de tan sólo 39% (CONAGUA, 2011)

Planta - Municipio	Agua residual tratada	Agua residual tratada reúso	Tipo de Tratamiento
Planta Centro, Querétaro	Capacidad instalada 120 L/s, caudal tratado 101 L/s	40 L/s	Lodos activados
Planta Sur, Corregidora	Capacidad instalada 500 L/s, caudal tratado 349 L/s	300 a 500 L/s en función de la demanda, el restante a Río Querétaro	Filtros percoladores
Planta Santa Rosa Jáuregui, Querétaro	Capacidad instalada 30 L/s, caudal tratado 13.2 L/s	No se especifica	Lodos activados

3.3 Legislación, directrices y criterios sobre el reúso agrícola

El reúso del agua residual en el mundo ha tomado mucha importancia en los últimos años, esto ha provocado que cada país deba crear una legislación que controle la calidad del agua que se utiliza para evitar posibles daños a la salud y al medio ambiente. Debido a las distintas características geográficas, económicas y sociales, el desarrollo de la normatividad se ha dado de forma diferente y en niveles diferentes.

3.3.1 Legislación, restricciones y directrices

Con el fin de proporcionar información concreta sobre legislación en el tema, en la Tabla 3.5 se han integrado las principales restricciones y criterios sobre los principales parámetros a considerar para implementar programas de reúso agrícola basados en las recomendaciones de la FAO, OMS y EPA.

Parámetro	Unidad	Grado de restricción en el uso			Posible problema de riego	
		Ninguno	Débil a Moderada	Elevada		
Salinidad ¹	CE	dS/m	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0	Salinidad: afecta la disponibilidad de agua para el cultivo.
	SDT	mg/L	< 450	450 – 2,000	> 2,000	Posibles problemas de taponamiento en sistemas de riego.
	Sodio ³	mg/L	<70	70-180	>180	Puede provocar también una afectación en su estructura, disminuyendo la permeabilidad y la capacidad de aeración, se forman costras, crecimiento excesivo de hierba, deficiencia de oxígeno, encharcamientos, etc. Si este proceso continúa, el cultivo será incapaz de satisfacer su demanda de agua.
Toxicidad de iones específicos: afectan a cultivos sensibles						

Tabla 3.5 Resumen de las restricciones y criterios para reúso agrícola

Parámetro		Unidad	Grado de restricción en el uso			Posible problema de riego
			Ninguno	Débil a Moderada	Elevada	
RAS	riego superficial	mg/L	< 3	3 – 9	> 9	Refleja la posible influencia del ion sodio sobre las propiedades del suelo, tiene efectos dispersantes sobre los coloides del suelo y afecta a la permeabilidad. Sus efectos no dependen sólo de la concentración en sodio sino también del resto de cationes. Si en el agua predomina el ion sodio, inducirá cambios de calcio y magnesio por sodio en el suelo, lo que podría llevar a la degradación de éste, con la consiguiente pérdida de estructura y permeabilidad.
	riego por aspersión	mg/L	< 3	> 3		
Cloruros ⁴	riego superficial	mg/L	< 4	4 – 10	> 10	Los problemas causados por la presencia de los iones Cl y Na se incrementan cuando las temperaturas son elevadas.
	riego por aspersión	mg/L	< 3	> 3		
Boro (B) ²		mg/L	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0	El boro contenido en el agua residual proviene del uso de detergentes y descargas provenientes de industrias. El daño se puede generalizar a todo el cultivo.
Efectos diversos: afectan a cultivos susceptibles						
Nitrógeno total (N-total)		mg/L	< 5	5 – 30	> 30	Deficiencia de nitrógeno: Provoca un cambio de color en el follaje hacia el amarillo, caída de hojas y una nodulación pobre, reduciendo el crecimiento del cultivo.
Bicarbonatos (HCO ₃)		mg/L	< 1.5	1.5 – 8.5	> 8.5	Solamente aplicable para aspersión elevada
pH			5.5-7.0	<5.5 ó > 8.0	<4.5 ó >8.0	
Cloro residual		mg/L	< 1.0	1.0 - 5.0	> 5.0	Solamente aplicable para aspersión elevada
Micro elementos		Concentración máx. recomendada (mg/L)		Posible problema de riego		
Aluminio		5		Puede provocar falta de productividad en suelos ácidos con pH< 5.5, en suelos alcalinos, el ion se precipitará y cualquier toxicidad será eliminada.		
Arsénico		0.1		Su fitotoxicidad varía ampliamente entre 12 mg/L para la hierba de Sudán hasta menos de 0.5 mg/L para el arroz.		
Berilio		0.1		Su fitotoxicidad varía ampliamente entre 5 mg/L para la col rizada hasta 0.5 mg/l para las judías verdes.		
Cadmio		0.01		Tóxico para las judías, remolacha y los nabos a concentración tan bajas como 0.1 mg/l en disolución. Los límites recomendados son conservadores debido a su capacidad para acumularse en el suelo y en las plantas hasta en concentraciones que podrían ser perjudiciales para las personas.		
Cobalto		0.05		Tóxico para la planta de tomate (jitomate) a una concentración de 0.1 mg/L. En disolución. suele ser inactivado por suelos neutros o alcalinos.		
Cromo		0.1		No se considera como elemento esencial para el crecimiento. Los límites que se recomiendan son conservadores debido a los escasos conocimientos sobre su fitotoxicidad.		
Cobre		0.2		Tóxico para diversas plantas a concentraciones entre 0.1 mg/L y 1.0 mg/L en disolución.		
Flúor		1		Es inactivado por suelos neutros o alcalinos.		
Hierro		5		No es tóxico para plantas en suelos aireados, pero puede contribuir al proceso de acidificación del suelo y a la disminución de fósforo y molibdeno, elementos especiales para las plantas. Si se utiliza riego por aspersión se pueden acumular depósitos desagradables en las plantas, equipos y edificios.		
Litio		2.5		Tolerado por la mayoría de cultivos hasta 5 mg/L; es un elemento móvil en el suelo y tóxico para los cítricos a concentraciones mayores a 0.075 mg/L. Actúa de forma similar al boro.		
Manganeso		0.2		Tóxico para diversas plantas a concentraciones pequeñas, aunque principalmente en suelos ácidos.		
Molibdeno		0.01		No es tóxico para plantas en concentraciones normales, se encuentra presente en la matriz suelo agua. Puede ser tóxico para el ganado cuando el forraje se cultiva en suelos con elevadas concentraciones de molibdeno disponible.		
Níquel		0.2		Tóxico para diversas plantas a concentraciones entre 0.5 y 1.0 mg/L; su toxicidad disminuye cuando se presenta un pH neutro o alcalino.		

Tabla 3.5 Resumen de las restricciones y criterios para reúso agrícola

Parámetro	Unidad	Grado de restricción en el uso			Posible problema de riego
		Ninguno	Débil a Moderada	Elevada	
Plomo	5				Puede inhibir el crecimiento de células vegetales cuando se presentan concentraciones muy elevadas.
Selenio	0.02				Tóxico para plantas a concentraciones pequeñas como 0.025 mg/L, y para el ganado cuando el forraje se cultiva con niveles relativamente altos de selenio añadido. Elemento esencial para el crecimiento de animales pero en concentraciones muy bajas.
Vanadio	0.1				Tóxico para muchas plantas a concentraciones bajas
Zinc	2				Tóxico para muchas plantas a concentraciones muy variables; su toxicidad disminuye cuando el pH es mayor que 6.0 y en suelos de textura fina o carácter orgánico

1 Sensible (fresa, limón, mango, manzana, naranja y nuez); moderadamente sensible (alfalfa, arroz, cacahuate, chile, caña de azúcar, haba, maíz, melón, papa, sandía, tomate (jitomate), uva o vid; moderadamente tolerante (avena, calabacín, sorgo, pastizal, trébol, trigo) y tolerante (cebada, algodón, espárrago y zacate).

2 Muy sensible (limón); sensible (cacahuate, cebada, fresa, haba, naranja, nuez, trigo, uva o vid); moderadamente sensible (chile, papa, avena, calabacín, maíz, melón, sandía, trébol); tolerante (alfalfa, sorgo, tomate (jitomate)); muy tolerante (algodón).

3 Concentración de Na en el agua (mg/L) que causa daño a los cultivos regados por aspersión: limón, (< 115); chile, papa, tomate (jitomate), uva o vid;(115 a 230); alfalfa, cebada, maíz, sorgo (230 a 460); algodón, caña de azúcar (> 460).

4 Concentración de Cl en el agua (mg/L) que causa daño a los cultivos regados aspersión: Limón (< 177.5); Chile, papa, tomate (jitomate), uva o vid (177.5 a 355); alfalfa, cebada, maíz, sorgo (355 a 710); algodón y caña de azúcar (> 710).

Cabe destacar que el agua residual municipal suele contener una cierta cantidad de elementos tóxicos, incluyendo metales pesados debido a que algunas industrias están conectadas de manera directa al alcantarillado municipal. En función del tratamiento recibido, cierta proporción de estos elementos puede ser removida, sin embargo, trazas de estos elementos pueden estar contenidos en el agua residual tratada para reúso, por ello en la Tabla 3.5 también se mencionan restricciones en la concentraciones de estos elementos (EPA, 2004)

En el capítulo II se mencionaron los posibles efectos que la presencia de patógenos podría ocasionar a los trabajadores del campo y consumidores de los productos agrícolas. La FAO y la OMS limitan la presencia de estos organismos en función del tipo de reúso agrícola (Tabla 3.6).

Tabla 3.6 Directrices recomendadas sobre calidad biológica de agua residual para reúso agrícola

Categoría	Condiciones de Aprovechamiento	Grupo Expuesto	Nematodos Intestinales ² (No. de huevos por litro)	Coliformes Fecales (No. por 100 ml ³)	Tratamientos para lograr una calidad adecuada
A	Para irrigación de cultivos que se consumen crudos, campos deportivos y parques públicos ⁴ .	Trabajadores agrícolas, consumidores, usuarios de espacios públicos	<1	<1000 ⁴	Serie de lagunas de estabilización diseñadas para alcanzar la calidad microbiológica indicada o un tratamiento equivalente
B	Riego de cultivos de cereales industriales y forrajeros, praderas y árboles ⁵	Trabajadores	<1	No se recomienda ninguna norma	Tiempo de retención en las lagunas de estabilización de 8 a 10 días o una remoción equivalente de helmintos y coliformes fecales

Fuente: Organización Mundial de Salud, 1989.

2. *Ascaris, trichuris* y anquilostomas., 3. Durante el riego., 4. Sería adecuado establecer una directriz más estricta para jardines públicos, como en zonas de recreo y hoteles, donde ocurre el contacto directo., 5. En el caso de frutales, el riego se debe suspender dos semanas antes de la cosecha. Los frutos no se deben recoger del suelo. Tampoco se recomienda realizar riego por aspersión.

La Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos también ha propuesto directrices para el reúso del agua. En la Tabla 3.7 se muestran las directrices sugeridas para llevar a cabo la práctica del reúso agrícola en ese país, sin embargo, la propia Agencia indica que pueden ser empleadas en otros países. También se menciona que las directrices son aplicables al agua residual de origen municipal con una aportación limitada de agua residual industrial (aunque no se especifica la proporción).

Tabla 3.7 Directrices recomendadas por la EPA para el reúso agrícola

Tipo de cultivo	Tratamiento	Calidad del agua residual	Distancia de seguridad
Cultivos para consumo humano: Uso de agua para riego por inundación o aspersión en cultivos que se consumen crudos.	Secundario Filtración Desinfección	pH = 6 - 9 < 10 mg/L DBO < 2 NTU Coliformes fecales no detectables/100 ml 1 mg/L ClO ₂	15 m a fuentes o pozos de agua potable o 30 m si el suelo es poroso.
Cultivos donde el producto se procesa de manera industrial. Cultivos que no se destinan al consumo humano: forrajeros, fibras, viveros, etc...	Secundario Desinfección	pH = 6 - 9 < 30 mg/L DBO < 30 mg/L SST 200 CF/100 mL 1 mg/L ClO ₂	A 90 m de fuentes o pozos de agua potable. A 30 m de zonas permitidas al público.

Fuente: EPA (2012)

3.3.2 Legislación en México

En el caso de la República Mexicana, el reúso de agua está reglamentado actualmente por la norma NOM-003-SEMARNAT-1997 y el reúso agrícola por la NOM-001-SEMARNAT-1996 en las Tablas 2 “Límites máximos permisibles para contaminantes básicos” y en la Tabla 3 “Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros” (ver Tabla 3.8)

Tabla 3.8 Restricciones indicadas para reúso agrícola según la NOM-001-SEMARNAT-1996

Límites máximos permisibles para contaminantes básicos							Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros						
Parámetros (mg/L a menos que se indique otra unidad)	Ríos – Uso en riego agrícola (A)		Embalses naturales y artificiales – Uso en riego agrícola (B)		Suelos – Uso en riego agrícola (A)		Parámetros (mg/L a menos que se indique otra unidad)	Ríos – Uso en riego agrícola (A)		Embalses naturales y artificiales – Uso en riego agrícola (B)		Suelos – Uso en riego agrícola (A)	
	PM	PD	PM	PD	PM	PD		PM	PD	PM	PD	PM	PD
Temperatura °C	NA	NA	40	40	NA	NA	Arsénico	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	0.4
Grasas y Aceites	15	25	15	25	15	25	Cadmio	0.2	0.4	0.2	0.4	0.05	0.1
Materia Flotante	Ausente		Ausente		Ausente		Cianuro	1.0	3.0	2.0	3.0	2.0	3.0
Sólidos Sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	NA	NA	Cobre	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0
SDT	150	200	75	125	NA	NA	Cromo	1	1.5	1.0	1.5	0.5	1.0
DBO5	150	200	75	150	NA	NA	Mercurio	0.01	0.02	0.01	0.02	0.005	0.01
Nitrógeno Total	40	60	40	60	NA	NA	Níquel	2.0	4.0	2.0	4.0	2.0	4.0
Fósforo Total	20	30	20	30	NA	NA	Plomo	0.5	1.0	0.5	1.0	5.0	10
PM- Promedio Mensual, PD Promedio Diario, A B y C corresponde a clasificación de cuerpo receptor según la Ley Federal de Derechos							Zinc	10	20	10	20	10	20

Respecto al potencial de hidrógeno (pH), se establece un rango de entre 5 y 10 unidades, mientras que se utilizará como organismo indicador para determinar la contaminación por patógenos a los coliformes fecales, cuyo límite máximo permisible para descargas vertidas al suelo (reúso agrícola) debe ser 1 000 y 2 000 NPM/100ml para promedio mensual y diario respectivamente.

También existe una restricción sobre contaminación por parásitos, donde el indicador serán los huevos de helminto, cuyo límite máximo permisible para reúso agrícola es 1 huevo de helminto por litro para riego no restringido y 5 huevos por litro para riego restringido. El riego no restringido se refiere al uso de agua residual

para la siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas en forma ilimitada: forrajes, granos, frutas, legumbres y verduras. El riego restringido se refiere al uso de agua para la siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas, con excepción de legumbres y verduras que se consumen crudas.

Como mencionamos anteriormente, la NOM-003-SEMARNAT-1997 también regula la práctica del reúso cuando se utilice en servicios con contacto directo u ocasional con el agua. La Norma define el reúso en servicios al público con contacto directo en: lagos y canales con paseos en lancha, remo, canotaje, esquí, fuentes de ornato, lavado de vehículos y riego de parques y jardines. Por otro lado, también se define el reúso con contacto indirecto u ocasional en zonas donde el contacto físico sea incidental o el acceso restringido, por ejemplo: riego de jardines y camellones en autopistas, camellones de avenidas, fuentes de ornato campos de golf, hidrantes, lagos no recreativos, panteones y barreras hidráulicas de seguridad. En la Tabla 3.9 se muestran los límites máximos permisibles establecidos por dicha norma para los tipos de reúso mencionados.

Tabla 3.9 Límites Máximos Permisibles de Contaminantes					
Tipo de Reúso	Coliformes Fecales NMP/100 ml	Huevos de Helminto (h/l)	Grasas y Aceites (mg/L)	DBO5 (mg/L)	SST (mg/L)
Contacto Directo	240	<= 1	15	20	20
Contacto Indirecto	1 000	<= 5	15	30	30

La Norma 003 también establece que en el agua de reúso, la materia flotante debe estar ausente y que las concentraciones de metales pesados y cianuros deben ser menores a lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-1996, en su Tabla 3 correspondiente a embalses naturales y artificiales.

Cabe destacar que al igual que en otros países, México cuenta con normatividad relacionada con el aprovechamiento de biosólidos. La Norma NOM-004-SEMARNAT-2002 indica que en el caso de aprovechamiento en la agricultura se deben cumplir con requisitos de lodo excelente o bueno respecto a límites máximos permisibles para metales pesados (arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel y zinc, expresados en mg/kg de lodo en base seca) (Tabla 3.10). Y como clase “C” respecto a límites máximos permisibles para patógenos y parásitos (coliformes fecales y *Salmonella* como número más probable por gramo en base seca, huevos de helminto como número de huevos por gramo de lodo en base seca) (Tabla 3.11).

Tabla 3.10 Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos		
Contaminante (en forma total)	Excelentes mg/kg en base seca	Buenos mg/kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1 200	3 000
Cobre	1 500	4 300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2 800	7 500

Tabla 3.11 Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos			
Clase	Indicador Bacteriológico de Contaminación	Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales NMP/g en base seca	Salmonella spp. NMP/g en base seca	Huevos de helminto/g en base seca
A	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de (1) Viable
B	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35

4. Capítulo IV Método

En los capítulos anteriores hemos mostrado un panorama general sobre el reúso agrícola y experiencias que se han desarrollado en diversos lugares del mundo y la República Mexicana. En esta sección describiremos la metodología que se desarrolló con el fin de evaluar el potencial de reúso agrícola existente. Para ello, se analizó la situación actual respecto a la explotación del acuífero en la zona de estudio, particularmente la relacionada con extracciones de agua para riego, en segundo lugar se estimó la demanda - oferta de agua residual tratada y finalmente se identificaron estrategias para la implementación de un programa de reúso en la región analizando de manera general los costos asociados y la superficie potencial para sembrar.

4.1 Análisis de la situación actual del acuífero

Para la primer parte de la metodología se siguió el procedimiento establecido en la Figura 4.1, donde los datos para definir la región de estudio fue ubicar con la herramienta de Google Earth y Global Mapper, los acuíferos con mayor déficit y con zonas agrícolas desarrolladas (Distritos de Riego), así como zonas urbanas con una tasa de crecimiento mayor a la media nacional y que cuenten con plantas de tratamiento de agua residual.

Una vez ubicada la región de estudio, se analizaron los usuarios del agua subterránea y principales usuarios, información que se incluye en el capítulo V. En la Figura 4.1 y en las siguientes, se muestra en color amarillo los resultados que se obtuvieron del análisis realizado.

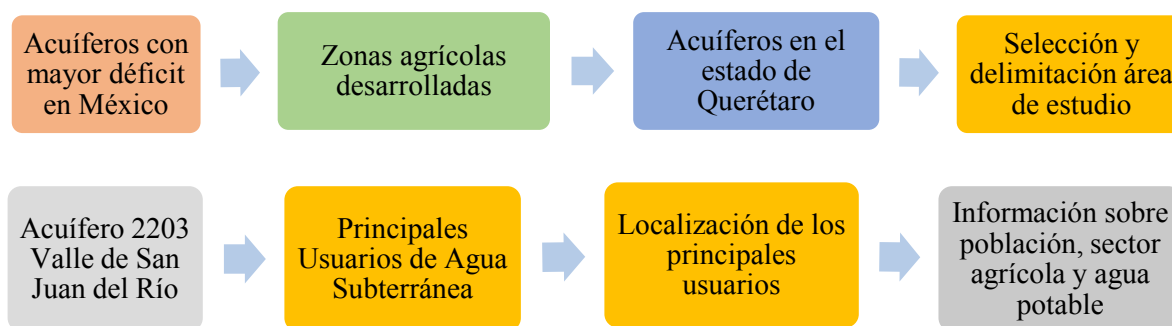
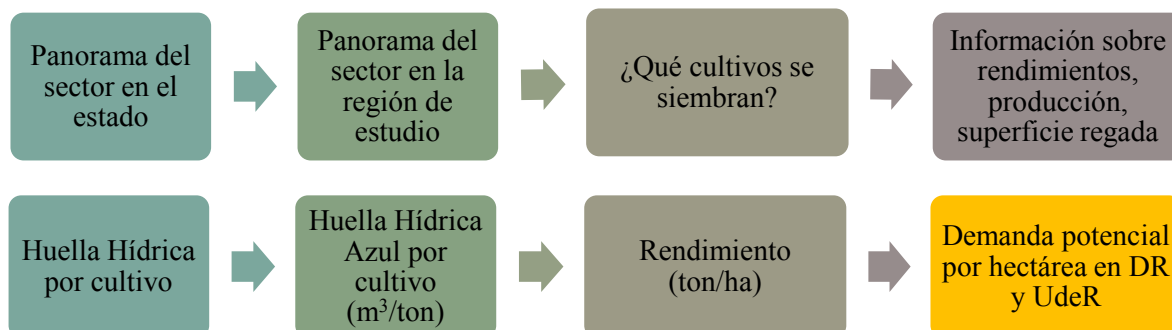


Figura 4.1 Análisis de la situación actual del acuífero

4.2 Estimación de la demanda potencial de agua para la agricultura (Huella Hídrica)

Para el desarrollo de esta etapa, se obtuvieron datos sobre zonas de riego, cultivos, tipo de riego, rendimientos, producción, superficie irrigada. Lo anterior se desarrolla en el capítulo VI. Posteriormente se realizó la estimación de la demanda potencial de agua para el sector agrícola mediante el procedimiento indicado en la Figura 4.2, obteniendo como resultados la demanda potencial por hectárea en zonas de riego y el volumen requerido por municipio. El desarrollo del procedimiento anterior se realiza en el capítulo VII.



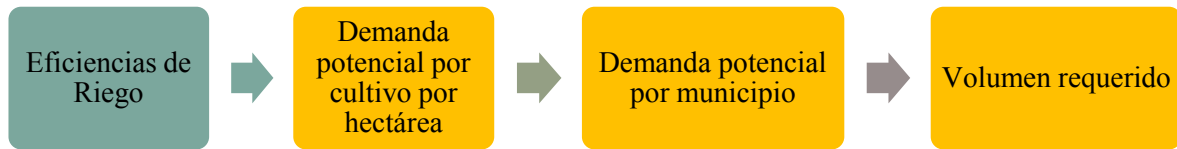


Figura 4.2 Procedimiento para la estimación de la demanda potencial de agua en la agricultura.

4.3 Estimación de la oferta potencial de agua residual tratada

Para estimar la oferta de agua residual tratada se utilizaron datos sobre el sector como cobertura de agua potable y alcantarillado, dotación media, población y coeficiente de retorno. Con ello se logró calcular la producción de agua potable y el volumen de agua residual generado (color amarillo Figura 4.3).

Por otro lado se utilizaron datos anuales de caudal instalado y tratado, obtenidos del Inventario de Plantas de Tratamiento en México, con lo cual se pudo comparar el volumen de agua residual generado con el volumen tratado.

Finalmente se realizó el mismo procedimiento para calcular el volumen tratado bajo las condiciones particulares de seis escenarios, dos de ellos para el año 2015 y tres para 2030 (horizonte de planeación Organismo de Cuenca Golfo Norte) que se explican a detalle en el capítulo VIII.



Figura 4.3 Procedimiento para la estimación de la oferta potencial de agua en la agricultura

4.4 Evaluación del potencial existente – estrategias – costos

Para realizar la evaluación preliminar del potencial existente se retomaron los datos obtenidos en las secciones anteriores. La evaluación inicia con la localización de grandes usuarios y plantas de tratamiento para determinar la distancia entre ambos, identificando plantas cercanas a zonas de riego o a otros usuarios potenciales de reúso (Figura 4.4) Posteriormente, se realizó la comparación entre el volumen de oferta y demanda, calculando la superficie potencial a irrigar bajo los diversos escenarios planteados en el capítulo VIII, y realizando el análisis por planta de tratamiento (únicamente las principales en función del caudal tratado).

La segunda parte de la evaluación incluye el análisis de beneficios, el cálculo de costos preliminares para reúso agrícola, extracción del acuífero y uso de agua superficial. Para ello se utilizan costos unitarios reportados en literatura para bombeo y otros obtenidos de la visita realizada a la PTAR San Pedro Ahuacatlán II. Finalmente se elabora una matriz de prefactibilidad identificando áreas de oportunidad para la región de estudio (Figura 4.4) y

se proponen medidas, como la optimización de cultivos que permita la siembra de especies que tengan un mayor precio por tonelada y aumentar los ingresos a los agricultores.

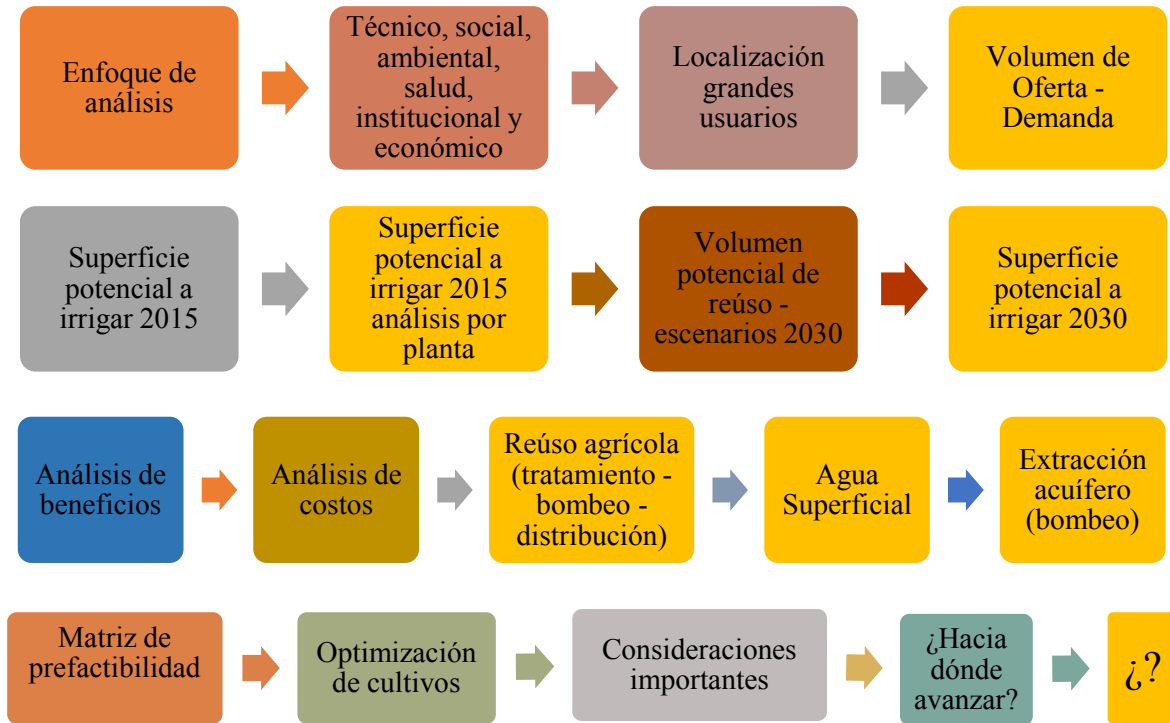


Figura 4.4 Procedimiento para el desarrollo de la evaluación del potencial existente.

5. Capítulo V Situación del agua subterránea

5.1 Situación del agua subterránea en México

En la República Mexicana, la CONAGUA ha dividido al país en 653 acuíferos con el fin de realizar la gestión del agua subterránea. Del total, el número de acuíferos sobreexplotados se ha incrementado significativamente y para el 2011, existían 101 acuíferos sobreexplotados de donde se extraía el 49% del volumen total de agua subterránea utilizado en el país (CONAGUA, 2012). Por otro lado, el fenómeno de intrusión salina se ha presentado en 17 acuíferos en zonas costeras del país comprometiendo también el abastecimiento de agua potable.

La declaratoria de sobreexplotación de un acuífero ocurre de acuerdo al resultado de estudios realizados en función del volumen de extracción y recarga. Al respecto, el acuífero 2203 Valle de San Juan del Río ocupa el noveno lugar a nivel nacional por el volumen de agua sobreexplotado tal y como se muestra en la Tabla 5.1 Cabe destacar que los acuíferos con el mayor déficit (incluyendo el acuífero Valle de San Juan del Río) comparten la mayor parte de las siguientes características:

- Crecimiento demográfico acelerado
- Zonas urbanas importantes
- Precipitación media anual cercana o menor a los 500 mm
- Desarrollo agrícola en la región
- Existencia de zonas industriales
- Escasez de fuentes de abastecimiento superficiales

Tabla 5.1 Acuíferos con el mayor déficit anual en México (CONAGUA, 2014)

Acuífero	Déficit (millones de metros cúbicos)
Zona metropolitana de la Ciudad de México	591.2
Mexicali	456.0
Ciudad Cuauhtémoc	197.0
León	177.7
Delicias	172.2
Irapuato	163.3
Toluca	136.7
Celaya	136.7
San Juan del Río	133.3

5.2 Situación del agua subterránea en el Estado de Querétaro

A nivel estatal, la Comisión Nacional del Agua tiene identificados 11 acuíferos, 6 de los cuales se encuentran sobreexplotados, entre los cuales podemos destacar los acuíferos Valle de Querétaro (2201) y Valle de San Juan del Río (2203). En la Tabla 5.2 se muestran las principales características de los 11 acuíferos del estado como área, disponibilidad y déficit.

Cabe destacar que este acuífero es el que presenta el mayor déficit con 133.35 Mm³/año (CONAGUA, 2015) y funge como fuente de abastecimiento agrícola para distintas unidades de riego y el distrito de riego 023, principalmente. Por otro lado, el segundo acuífero con mayor déficit en el estado es el 2201 Valle de Querétaro que representa la principal fuente de abastecimiento público de la Zona Metropolitana de Querétaro, cuya población asciende a 1 097 025 habitantes (INEGI, 2009). Adicionalmente, podemos observar que en ambos casos el déficit en la disponibilidad de agua subterránea ha aumentado en los últimos años. Entre 1996 y 2009, el déficit en el acuífero Valle de Querétaro se duplicó al pasar de 34 hm³ a 74 hm³. Mientras que para el acuífero Valle de San Juan del Río el incremento en el déficit para el mismo período fue de 5 hm³ al pasar de 113 hm³ a poco más de 118 hm³ durante ese mismo período y a 133.3 hm³ para 2015.

Tabla 5.2 Principales características de los acuíferos del estado de Querétaro (hm³)

Acuífero	Localización	Municipios	Área km ²	Volumen extracción Agrícola	Volumen extracción Industrial	Volumen extracción abastecimiento	Déficit (1996)	Déficit (2009)
2201 Valle de Querétaro	Al oeste del estado	Querétaro, Corregidora y parte de el Marques	484	28.8	8	67	37	74.75
2202 Valle de Amazcala	Al suroccidente del estado	El Marques	217	48	0.8	62	23.8	40.75
2203 Valle de San Juan del Río	Al sureste del estado	San Juan del Río, Tequisquiapan, Pedro Escobedo, El Marques, Huimilpan	2264	335.63	37.45	22.92	113	118.69
2204 Valle de Buenavista	Noroeste del estado	El Marques	311.8	ND	ND	ND	ND	9.06
2205 Valle de Tequisquiapan	Porción central del estado	Tequisquiapan, Ezequiel Montes y Colon	640.4	107.3	3.9	6.8	12.5	0
2206 Valle de Cadereyta	Al oriente del estado	Cadereyta y Ezequiel Montes	462	0	0	3.9	-0.074	0
2207 Toliman	Porción Central del Estado	Toliman, Cadereyta, San Joaquín, Pinal de Amoles, Penamiller y Colon	89	1.73	0.021	0.67	0	-0.079
2208 Valle de Huimilpan	Al sur del estado	Corregidora, Huimilpan y Pedro Escobedo	211	19.67	0.36	2.29	-4.31	0
2209 Valle de Amealco	Al sur del estado	Amealco	304	9	0.1	1.7	0	2.01
2210 Moctezuma	Al nor-oriente del estado	Cadereyta y San Joaquín	239	ND	ND	ND	0	43.43
2211 Tropaon-Zona de Sierra	Al nor-oriente del estado	Arroyo Seco, Pinal de Amoles, Jalpan y Penamiller	1299	0	0	0.2	0	34.22

Cabe destacar que este acuífero es el que presenta el mayor déficit con 133.35 Mm³/año (CONAGUA, 2015) y funge como fuente de abastecimiento agrícola para distintas unidades de riego y el distrito de riego 023, principalmente. Por otro lado, el segundo acuífero con mayor déficit en el estado es el 2201 Valle de Querétaro que representa la principal fuente de abastecimiento público de la Zona Metropolitana de Querétaro, cuya población asciende a 1 097 025 habitantes (INEGI, 2009). Adicionalmente, podemos observar que en ambos casos el déficit en la disponibilidad de agua subterránea ha aumentado en los últimos años. Entre 1996 y 2009, el déficit en el acuífero Valle de Querétaro se duplicó al pasar de 34 hm³ a 74 hm³. Mientras que para el acuífero Valle de San Juan del Río el incremento en el déficit para el mismo período fue de 5 hm³ al pasar de 113 hm³ a poco más de 118 hm³ durante ese mismo período y a 133.3 hm³ para 2015.

Con respecto al uso agrícola del agua subterránea, podemos destacar al acuífero Valle de Amazcala (2202) con un volumen de extracción agrícola de 48 hm³ (87% del total), que es mayor al déficit anual de 40 hm³. En el caso del acuífero Valle de Tequisquiapan el volumen de extracción agrícola es de 107.3 hm³ al año, lo que representa el 91% del volumen extraído total. Por la importancia de la actividad agrícola en la región de San Juan del Río, el volumen de extracción de dicho acuífero (2203) es el mayor del estado con 335.6 hm³ anualmente, lo que representa el 85% del total (CONAGUA, 1996). Lo anterior implica que para lograr una reducción en el volumen extraído del acuífero mencionado, se requiere realizar mejoras en la gestión del agua en el sector agrícola.

Por otro lado, los acuíferos 2210 Moctezuma y 2211 Tropaon-Zona de Sierra, son los que presentan la mayor disponibilidad a nivel estatal. Ambos acuíferos se localizan en la zona norte del estado abarcando parte de la Sierra Gorda, donde los núcleos de población son escasos y los valores de precipitación media anual son mayores.

La CONAGUA ha considerado, como parte de su estrategia hacia el año 2030, la construcción de pozos de extracción en los acuíferos Valle de Tequisquiapan y de la zona serrana para satisfacer la demanda en las regiones de la zona metropolitana de Querétaro y San Juan del Río (CONAGUA, 2012). En el capítulo IX abordaremos más a detalle la estrategia de la CONAGUA en el horizonte 2030.

5.3 Usos del agua subterránea proveniente del acuífero Valle de San Juan del Río

De acuerdo con el Registro Público de Derechos del Agua, existen 701 títulos de concesión para la explotación del recurso hídrico en el acuífero con un volumen concesionado total de 329.62 millones de metros cúbicos. Del total de títulos registrados, 425 pertenecen al ramo agrícola con un volumen concesionado de 210.3 millones de metros cúbicos (63.80%). Respecto al ramo industrial, se tienen registrados 49 títulos con un volumen concesionado de 39.74 millones de metros cúbicos (12.06%). En tercer lugar, para el ramo de abastecimiento público existen 58 títulos de concesión con un volumen de 35.66 millones de metros cúbicos (10.82%). Finalmente, los sectores de servicios, pecuario y el uso múltiple representan el 13.32% del volumen concesionado con 43.91 millones de metros cúbicos.

La CONAGUA a través de sus Estadísticas del Agua publicadas año con año agrupa dentro del ramo agrícola a los usos pecuario y múltiple y dentro del uso público al sector de servicios, tal y como se muestra en la Figura 5.1. Cabe destacar que el uso múltiple se aplica a títulos de concesión cuyo uso puede incluir cualquiera de los mencionados anteriormente.

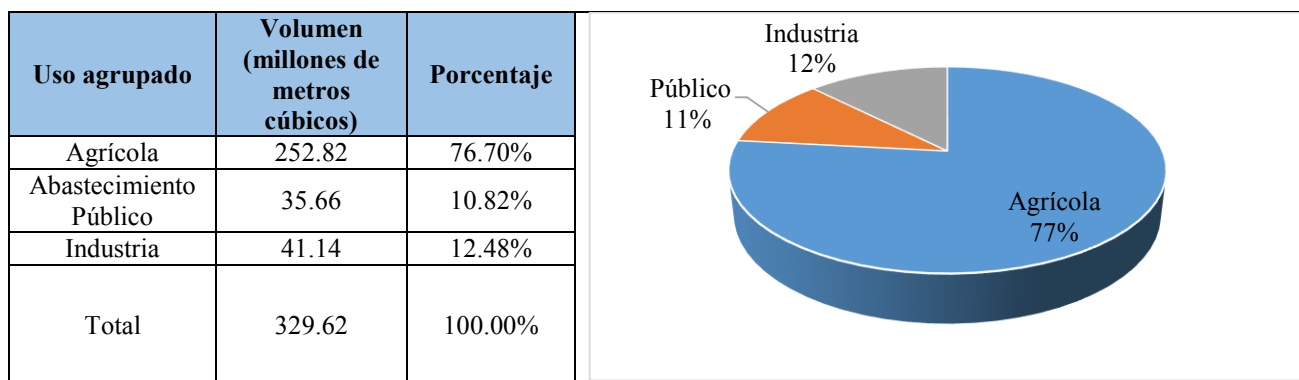
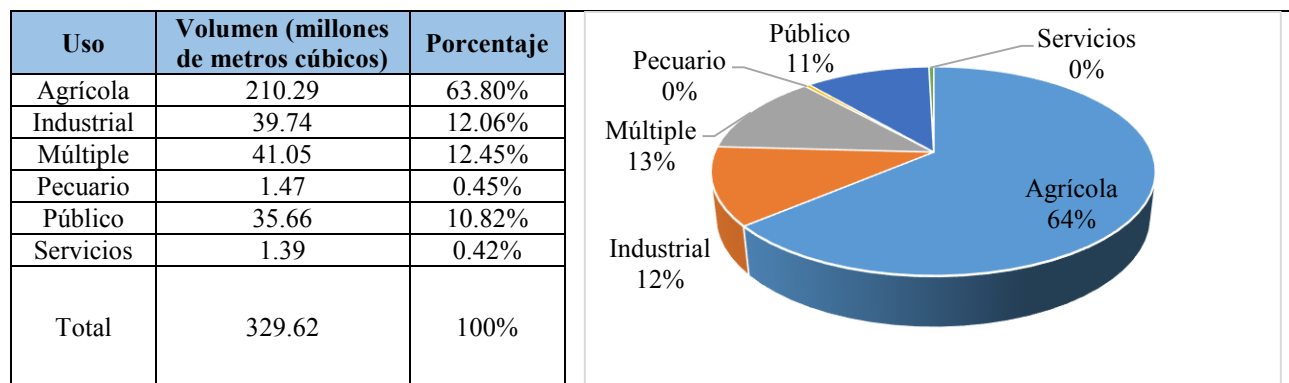


Figura 5.1 Usos del agua subterránea proveniente del acuífero Valle de San Juan del Río bajo las dos clasificaciones que CONAGUA propone

5.4 Usuarios de agua subterránea

En la Tabla 5.3 se enlistan los usuarios con el mayor volumen concesionado para cada uso (mayor que 1 millón de metros cúbicos). Dichos títulos de concesión representan el 41.32% del total del volumen concesionado.

Tabla 5.3 Principales usuarios de agua subterránea del acuífero Valle de San Juan del Río			
Titular	Título	Uso	Volumen (m³/año)
ASOCIACIÓN DE USUARIOS DE LA PRIMERA UNIDAD MÓDULO 1 DEL DISTRITO DE RIEGO 023 DE SAN JUAN DEL RÍO QUERÉTARO, A.C.	09QRO402301/26ATGC00	AGRICOLA	32 988 000
ASOCIACIÓN DE USUARIOS DE LA SEGUNDA UNIDAD MODULOS DEL DISTRITO DE RIEGO NO. 023 SAN JUAN DEL RÍO, QRO., A.C.	09QRO402302/26ATGC00	AGRICOLA	22 512 000
EJIDO LA PALMA, A.C	09QRO402303/26ATGC00	AGRICOLA	6 792 000
ASOCIACION DE USUARIOS POZO NO. 3. (EJIDO DE SAN ISIDRO)	4QRO102652/12AMGR96	AGRICOLA	2 520 000
MA. ELISA CISNEROS BARRON VDA. DE LARRONDO, LIDIA, SERGIO SEBASTIAN Y GERARDO LARRONDO CISNEROS	08QRO101168/12AMD10	AGRICOLA	1 399 680
POZO NO. 1, QUINTANARES, S.P.R. DE R.I.	09QRO102313/26AMD108	AGRICOLA	1 200 000
PRODUCTOS VEGETALES FRESCOS, S. A. DE C. V.	09QRO105216/26AMD10	AGRICOLA	1 200 000
NURIA AMELIA ISIDRA COLEA Y ROCA	09QRO105359/26AMD11	AGRICOLA	1 194 000
SAN FRANCISCO POZO NO. 1 Y 2, S.P.R. DE R.I.	09QRO102321/26AMD107	AGRICOLA	1 176 000
EL BATAN 1, S.P.R. DE R.I.	09QRO105191/26AMD109	AGRICOLA	1 070 000
ALEXANDRA RUIZ NORIEGA	09QRO104050/26AMD109	AGRICOLA	1 033 200
KIMBERLY CLARK DE MEXICO, S.A.B. DE C.V.	09QRO100304/26FMD12	INDUSTRIAL	14 191 200
MANUFACTURAS KALTEX, S.A. DE C.V.	09QRO100308/26FMD11	INDUSTRIAL	5 774 191
COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, CENTRAL TERMOELÉCTRICA CICLO COMBINADO EL SAUZ	09QRO100307/26FMSG97	INDUSTRIAL	3 628 180
COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD (PLANTA CICLO COMBINADO "EL SAUZ")	4QRO101022/26FMGR96	INDUSTRIAL	2 073 600
CARTONES PONDEROSA, S.A. DE C.V.	09QRO102159/26FMD108	INDUSTRIAL	1 750 000
INGREDION MEXICO, S.A. DE C.V.	09QRO100853/26FMGC14	INDUSTRIAL	1 294 288
INGREDION MEXICO, S.A. DE C.V.	09QRO100854/26FMD13	INDUSTRIAL	1 084 288
ELSA ALICIA BRAÑA MUÑOZ	09QRO106337/26GMD11	PECUARIO	488 960
PILGRIM'S PRIDE, S. DE R.L. DE C.V.	08QRO103526/12GMD10	PECUARIO	365 051
JESUS FIDEL TEODORO RUBIN CASO	08QRO100034/12GMD13	PECUARIO	100 000
COMISION ESTATAL DE AGUAS	09QRO105179/26IMGE00	MULTIPLE	2 476 890
SECRETARIA DE LA DEFENSA NACIONAL	09QRO103968/26IMDL09	MULTIPLE	1 813 320
EMETERIO GOMEZ SOTRES	09QRO104317/12IMDL12	MULTIPLE	1 584 000
ARMANDO PAREDES ARROYO LOZA	08QRO104356/12IMGE99	MULTIPLE	1 168 800
JUAN ANTONIO ROSALES SALAZAR	09QRO105572/26IMDL13	MULTIPLE	1 032 000
JUNTA DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO MUNICIPAL	09QRO103879/26HMD108	PUBLICO URBANO	15 646 535
JUNTA DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO MUNICIPAL	09QRO103911/26HMD11	PUBLICO URBANO	2 735 229
COMISIÓN ESTATAL DE AGUAS	08QRO103875/12HMD11	PUBLICO URBANO	2 390 246
COMISIÓN ESTATAL DE AGUAS	09QRO103873/26HMGE98	PUBLICO URBANO	2 350 614
NIPPO DESARROLLOS, S.A. DE C.V.	08QRO106139/12EMDL14	SERVICIOS	600 000
SORZACATECAS, S.A. DE C.V.	09QRO100140/26EMDL14	SERVICIOS	216 000
MARÍA HERNÁNDEZ LOYOLA	09QRO102818/26EMDL08	SERVICIOS	131 043
FLOR DE MARIA GUTIERREZ LOPEZ	09QRO103914/26EMGE98	SERVICIOS	121 180
CENTRO NACIONAL DE METROLOGIA	08QRO106303/12EMDL10	SERVICIOS	100 000
		Total	136 200 496
		Porcentaje del Total	41.32%

5.5 Principales Usuarios

Dentro de la lista de los principales usuarios del REPDA, describiremos a continuación a los 8 principales usuarios del agua subterránea, los cuales en conjunto poseen un volumen concesionado de 114.03 millones de metros cúbicos, lo cual representa el 34.35% del volumen total concesionado. Si se comparan los datos de disponibilidad de agua subterránea para el acuífero Valle de San Juan del Río, observamos que la demanda de los 8 principales usuarios es equivalente al 96.07% del déficit de agua que se tuvo en 2009 (118.69 millones de metros cúbicos).

5.5.1 Distrito de Riego 023

El principal usuario del recurso hídrico es el Distrito de Riego 023, el cual posee una superficie de 11 227 hectáreas regables (SEMARNAT, 1999), con un total de 64.8 millones de metros cúbicos (19.6% del total). Ésta cifra incluye a los módulos I y II, así como Ejido la Palma (módulo III), el cual se ubica al sur del estado en el municipio de Pedro Escobedo con un área de 695 hectáreas (RAN, 2015), y el Ejido San Isidro (perteneciente al módulo I que se ubica el oeste del estado y posee un área de 599 hectáreas (RAN, 2015).

Según datos de la propia CONAGUA, a través de la Gerencia de Distritos de Riego, el abastecimiento de agua para el Distrito de Riego 023 se ha realizado en los últimos años (2006-2014) a través de presas (49.7%) y pozos (51.3%). Durante el período mencionado, el volumen de abastecimiento para el DR023 ha sido de 71 millones de metros cúbicos, de los cuales 34.9 han provienen de pozos y 36.1 millones de metros cúbicos de presas.

5.5.2 Sector industrial

Dentro del sector industrial, el volumen concesionado a las cinco principales compañías representa el 9.03% del total con 29.8 millones de metros cúbicos al año. Dicha demanda equivale poco más del 53.7% del volumen indicado en el REPGA que se destina para riego en el Distrito de Riego 023.

Kimberly Clark de México

Con un volumen de aprovechamiento de 14.2 millones de metros cúbicos (4.3% del total), Kimberly Clark de México es una empresa que opera ocho plantas productivas en el país, una de ellas ubicada en la ciudad de San Juan del Rio, denominada planta Bajío. Entre los productos fabricados y vendidos por la compañía se encuentran: papel higiénico, servilletas, toallas de papel pañales, toallas húmedas, etc...

Uno de los principales retos de la empresa ha sido la falta de disponibilidad del agua (Kimberly-Clark de México, 2006), ya que el agua es elemento fundamental en los procesos de producción de papel y reciclado de fibras. Según la empresa, a pesar de que en los últimos años el consumo del recurso se ha reducido de forma voluntaria y significativa, las posibles limitaciones que el gobierno podría aplicar sobre la explotación del recurso hídrico podrían afectar la liquidez y situación financiera de la compañía.

Respecto a la práctica del reúso de agua, la compañía ha implementado sistemas para reciclar agua en prácticamente todas sus plantas, reduciendo de forma importante el consumo de agua de primer uso (Kimberly-Clark, 2006) aunque no se reportan datos sobre el volumen tratado ni del volumen de reúso.

Kaltex S.A. de C.V.

En segundo lugar se encuentra la empresa Kaltex S.A. de C.V. que está dedicada a la fabricación de fibras sintéticas, hilo, telas, prendas de vestir y otros productos textiles. El volumen de aprovechamiento es de 5.77 millones de metros cúbicos que representan el 1.77% del total. Respecto a programas de reúso y ahorro de agua, se indica la operación de una Planta de Tratamiento de Agua Residual (ubicada dentro de sus instalaciones en la planta de San Juan del Rio) con un caudal reportado de 300 L/s y de programas de reúso para propio servicio a la planta, en los procesos de producción donde sea factible realizar esta práctica y en el riego de áreas verdes. Sin embargo, el nivel de tratamiento secundario que reciben las descargas de la planta no es suficiente para lograr la eliminación de sustancias utilizadas en los procesos de la industria textil como los nonilfenoles, bencenos y anilinas, muchos de ellos no incluidos en la normatividad mexicana (Cabrera & Rodríguez, 2011).

Comisión Federal de Electricidad

En tercer lugar, la Comisión Federal de Electricidad en sus dos plantas de ciclo combinado el Sauz ubicadas en el municipio de Pedro Escobedo tiene un volumen de aprovechamiento de 5.7 millones de metros cúbicos (1.73% del total).

Cabe destacar que en otras zonas urbanas del país, la práctica del reúso de agua en plantas de ciclo combinado de CFE ha tenido experiencias positivas, tal es el caso de San Luis Potosí y Tijuana. En el primer caso el sistema de tratamiento y reúso cuenta con la PTAR Tenorio – Villa de Reyes, la cual opera tratamiento secundario basado en lodos activados con un caudal de tratamiento de 1050 L/s y un gasto de reúso para la Central Termoeléctrica Villa de Reyes de CFE de 450 L/s para el sistema de enfriamiento con una tarifa convenida de 7.3 pesos por metro cúbico (CEA-SLP, 2012). En Tijuana mediante el denominado Proyecto Morado, la CFE planea reutilizar el agua tratada para riego y mantenimiento de sus instalaciones, así como agua de enfriamiento. Otros casos de proyectos de reúso con CFE se han desarrollado en las centrales termoeléctricas Valle de México y Tula (Jiménez, 2001). En vista de lo anterior y la experiencia que se tiene, el reúso industrial en plantas de CFE es una de las estrategias más factibles para programas de reúso.

Otros usuarios

Con respecto al sector de abastecimiento público, destaca la Junta de Agua Potable y Alcantarillado Municipal de San Juan del Río (JAPAM) con un volumen concesionado de 24.06 millones de metros cúbicos (7.29% del total). JAPAM es un organismo público descentralizado que se encarga de administrar los sistemas de agua potable y alcantarillado municipal en San Juan del Río. Por otro lado, la Comisión Estatal de Aguas (CEA) tiene un volumen concesionado de 8.80 millones de metros cúbicos (2.67%) del total.

6. Capítulo VI - Panorama del sector agrícola en el estado de Querétaro

6.1 Ciclo agrícola, superficie y cultivo

A nivel nacional, según cifras de la Comisión Nacional del Agua la superficie de riego es de 6.5 millones de hectáreas conformadas por 85 distritos y 39 500 unidades de riego. A nivel estatal, la actividad agrícola se desarrolla en tres principales ciclos de cultivo:

- Ciclo primavera-verano: Se refiere a los cultivos sembrados entre marzo y septiembre, no importando cuando se realice la cosecha. El maíz (blanco, amarillo y forrajero) es el cultivo más importante en la entidad y la producción se ubica principalmente en los municipios de San Juan del Río, Pedro Escobedo, el Marqués y Amealco de Bonfil. En segundo lugar se encuentra el sorgo, donde los municipios de Pedro Escobedo y San Juan del Río concentran el 80% de la producción (INEGI, 2007).
- Ciclo otoño-invierno: Comprende los cultivos cuya siembra se realiza entre octubre y febrero. De manera similar, el maíz ocupa el primer lugar en producción, seguido de avena y frijol.
- Cultivos perennes: Son aquellos cultivos cuyo ciclo vegetativo tiene una duración mayor a un año, como los frutales y algunos forrajes como la alfalfa.

De manera adicional a la actividad agrícola de riego, en el estado se practica la agricultura de temporal en los meses correspondientes al ciclo primavera verano, cuando el régimen de lluvias de verano se establece en la República Mexicana. Según datos de la Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado, en el año agrícola 2011-2012 y para los municipios que conforman la región en estudio se sembraron 69 366 hectáreas (55.6%) para agricultura de temporal y 55 367 de riego (44.4%), para un total de 124 733 hectáreas sembradas (Tabla 6.1).

6.2 Distrito de Riego 023

Los distritos de riego son sistemas de irrigación a gran escala, los cuales se desarrollaron para promover el desarrollo agrícola del país (Silva & Quijada, 1999). A nivel nacional existen 85 distritos de riego con una superficie de 3.5 millones de hectáreas que representan el 53% de la superficie de riego (CONAGUA, 2014). La producción de los distritos de riego se orienta al mercado nacional y exportación. Las principales fuentes de abastecimiento de agua son presas de almacenamiento y derivadoras (89%), así como pozos profundos (11%) (CONAGUA, 2014).

El estado de Querétaro cuenta con el Distrito de Riego 023 San Juan del Río ubicado en la parte sur-oriental del estado (Figura 6.2), establecido en el año de 1999 por un acuerdo oficial.



Figura 6.1 Ubicación del Distrito de Riego 023 en Querétaro

Tabla 6.1 Datos Agricultura SEDEA Ouerétaro, SAGARPA 2011-2012, Unidades de Riego/ Distrito de Riego CONAGUA 2011-2012									
Ciclo	Municipio	Distrito de	Unidades	Suma Riego	Temporal	Total	Riego	Temporal	Total
Año Agrícola 2011 - 2012	Amealco de	0	7383	7383	12825	20208	7383	12748	20131
	Colón	0	7155	7155	8521	15676	7155	8427	15582
	El Marqués	0	13124	13124	9541	22665	13124	9742	22866
	Huimilpan	0	1699.5	1699.5	10026.5	11726	1700	9236	10936
	Pedro Escobedo	2972.8	11130.1	13934.66	4784.34	18719	14722	4353	19075
	San Juan del Río	4486.2	3234.6	7711.84	18093.16	25805	7590	20741	28331
	Tequisquiapan	0	3608.4	3762.58	4111.42	7874	3693	4119	7812
	TOTAL	7459	47334.6	54770.58	67902.42	122673	55367	69366	124733
Otoño Invierno 2011-2012	Amealco de	0	0	0	Sin información	Sin información	0	0	0
	Colón	0	1261	1261			1261	0	1261
	El Marqués	0	2184	2184			2184	0	2184
	Huimilpan	0	631	631			631	0	631
	Pedro Escobedo	978.9936	2433.7	3412.6936			4086	0	4086
	San Juan del Río	1563.2736	0	1563.2736			1551	0	1551
	Tequisquiapan	54.5328	362.6	417.1328			392	0	392
	TOTAL	2596.8	6872.3	9469.1			10105	0	10105
Perennes 2012	Amealco de	0	63	63	Sin información	Sin información	63	0	63
	Colón	0	1575	1575			1575	167	1742
	El Marqués	0	1560	1560			1560	65	1625
	Huimilpan	0	205.5	205.5			206	100	306
	Pedro Escobedo	463.1445	7353.6	7816.7445			1838	0	1838
	San Juan del Río	739.557	2111.9	2851.457			1779	0	1779
	Tequisquiapan	25.7985	1152.1	1177.8985			1166	0	1166
	TOTAL	1228.5	14021.1	15249.6			8187	332	8519
Primavera-Verano 2012	Amealco de	0	7320	7320	Sin información	Sin información	7320	12748	20068
	Colón	0	4319	4319			4319	8260	12579
	El Marqués	0	9380	9380			9380	9677	19057
	Huimilpan	0	863	863			863	9136	9999
	Pedro Escobedo	1172.5454	1342.8	2515.3454			8798	4353	13151
	San Juan del Río	1872.3404	1122.8	2995.1404			4260	20741	25001
	Tequisquiapan	65.3142	2093.8	2159.1142			2135	4119	6254
	TOTAL	3110.2	26441.4	29551.6			37075	69034	106109

El Distrito de Riego 023 cuenta con una superficie de riego de 11 227 hectáreas, de las cuales 2 204 se irrigan con agua de 54 pozos profundos de particulares (SEMARNAT, 1999) y el restante aprovechando el agua de las presas San Ildefonso, Constitución de 1917, La Llave y el Bordo la Venta. Los límites del distrito de riego se establecen al este con la zona urbana de San Juan del Río y el río San Juan, al oeste con los ejidos la Palma, la Venta y el Bordo la Venta, al sur con la presa Constitución de 1917 y sus canales, mientras que al norte con la vía de ferrocarril México-Cd. Juárez, el dren la Culebra y el canal la Baya.

El objetivo del Distrito de Riego 023 es controlar y aprovechar de manera adecuada el agua disponible mediante la construcción de obras de almacenamiento, derivación, conducción y otras logrando así aumentar la productividad agropecuaria (SEMARNAT, 1999). El distrito de riego se compone de los siguientes elementos:

- a) Áreas y obras comprendidas dentro del perímetro establecido en el Acuerdo Oficial.
- b) 4 presas de almacenamiento: San Ildefonso, Constitución de 1917, La Llave y el Bordo la Venta.
- c) 1 acueducto subterráneo, 23 acueductos superficiales, 33 canales de conducción y distribución, caminos, 40 bordos
- d) Sistemas de bombeo de agua superficial, subterránea y residual.
- e) 3 módulos de riego: módulo I, módulo II y módulo III o Ejido la Palma

Anualmente, la Comisión Nacional del Agua publica las Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego donde se incluyen datos de producción agrícola y consumo de agua en diversas categorías como información por cultivo, por municipio o por fuente de abastecimiento. En el caso del Distrito de Riego 023, de las 11 227 hectáreas que lo conforman, únicamente se han sembrado en promedio 8 070 hectáreas en el período 2002-2014, cuya tendencia no muestra cambios importantes durante dicho período tal y como se muestra en la Figura 6.3.

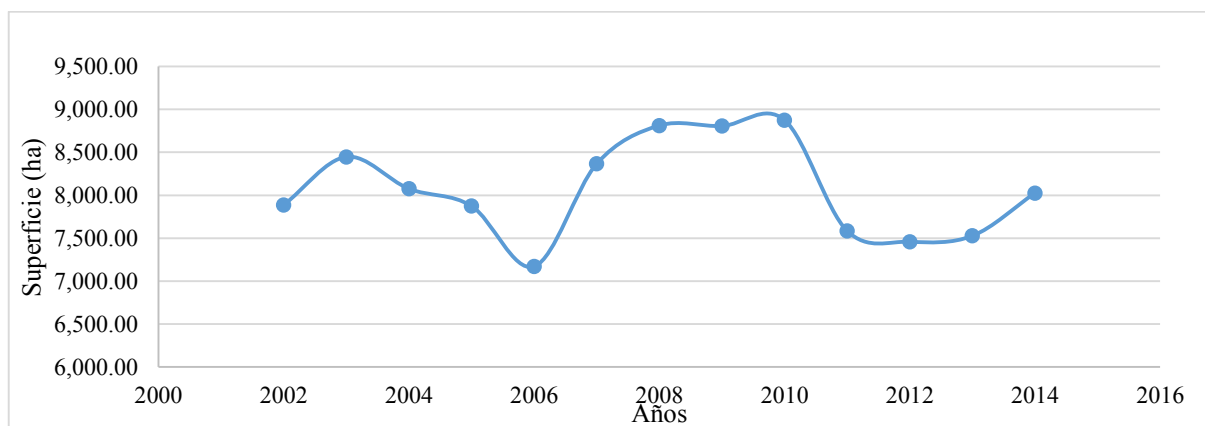


Figura 6.3 Tendencia de la superficie sembrada en DR 023

Otro de los indicadores que permite evaluar el desempeño agrícola de una región es el rendimiento por hectárea, donde se puede observar un constante aumento en el período de análisis al pasar de 10.84 ton/ha en 2002 a 21.81 ton/ha en 2014, sin embargo este parámetro varía considerablemente año con año debido a disponibilidad de agua, condiciones climáticas, etc. En la Figura 6.4 se puede observar la tendencia del rendimiento por hectárea.

En el caso del Distrito de Riego 023, donde el área sembrada durante los últimos años ha permanecido prácticamente sin grandes cambios. El rendimiento por hectárea influye directamente en la producción total del distrito, por lo que su tendencia también indica un crecimiento en el período de tiempo analizado (Figura 6.5). En el año 2011, se observa una disminución considerable en la producción debido al período de sequía que sufrió gran parte del país, incluyendo al estado de Querétaro.

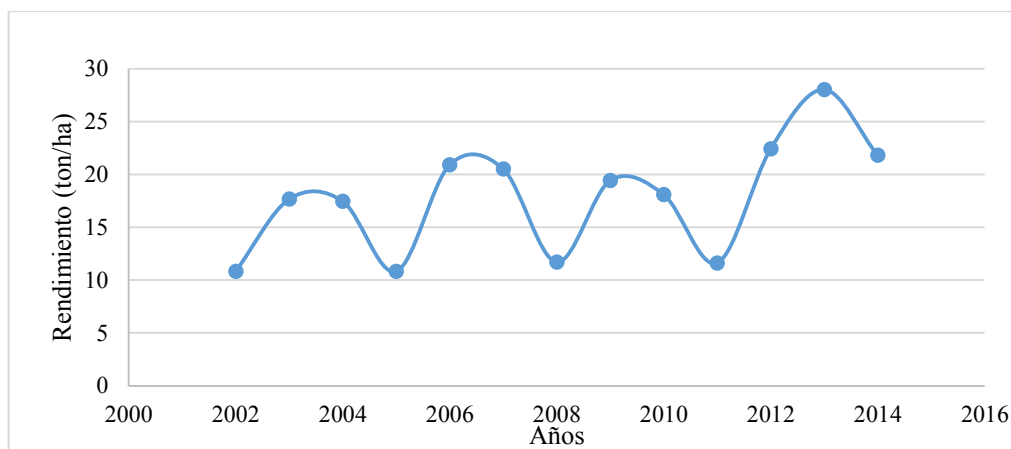


Figura 6.4 Tendencia de rendimiento por hectárea en DR 023

En cuanto al tipo de cultivo por superficie sembrada en el Distrito de Riego, se destacan en primer lugar el maíz con 3 100 hectáreas en promedio durante el período de estudio (2002 – 2014), seguido de sorgo con 1 960 hectáreas, alfalfa con 1 089 hectáreas y cebada con 947 hectáreas. En la Figura 6.6 se puede observar la superficie sembrada durante el período de análisis para cada cultivo, donde la superficie sembrada de maíz y alfalfa han permanecido casi constantes, mientras que el área sembrada de sorgo ha disminuido.

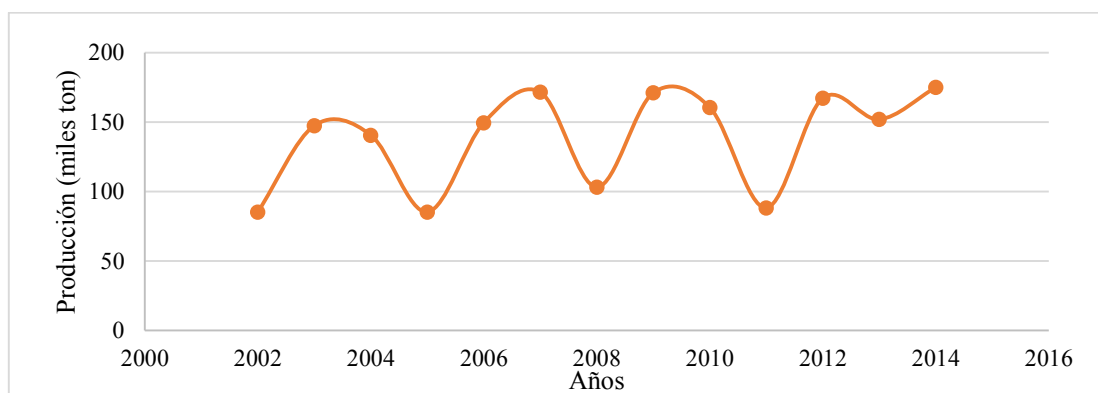


Figura 6.5 Tendencia Producción en DR 023

También se puede observar que entre 2010 y 2014, el área sembrada de sorgo disminuyó mientras que el área sembrada de cebada aumentó casi en la misma proporción. Por otro lado, en 2014, el área sembrada de cebada disminuye considerablemente, mientras que el área sembrada de maíz y sorgo aumentó en la misma producción.

Dichas variaciones han tenido impactos importantes en el precio por tonelada de cada producto, sin embargo no se puede establecer una relación única entre ambas variables, ya que, por un lado si el rendimiento por hectárea y la producción disminuyen el precio por tonelada aumentará, pero si el precio de mercado de un producto aumenta, entonces se puede planear aumentar el área de cultivo de dicho producto para obtener mayores ganancias.

6.2.1 Análisis del volumen de abastecimiento para el Distrito de Riego 023

En relación a la fuente de abastecimiento de agua y al volumen distribuido en el Distrito de Riego 023, el volumen utilizado anualmente en el período 2002 a 2014 ha permanecido prácticamente constante, sin embargo la fuente de abastecimiento si ha presentado variaciones. Durante el período 2011-2012, el consumo de agua subterránea aumentó debido a la poca disponibilidad de agua en las presas del sistema derivado de la sequía que se presentó en 2011. Por el contrario, la precipitación en la región durante 2013 y 2014 permitió un mayor almacenamiento superficial reduciendo así la demanda de agua subterránea en 2014 (Figura 6.7).

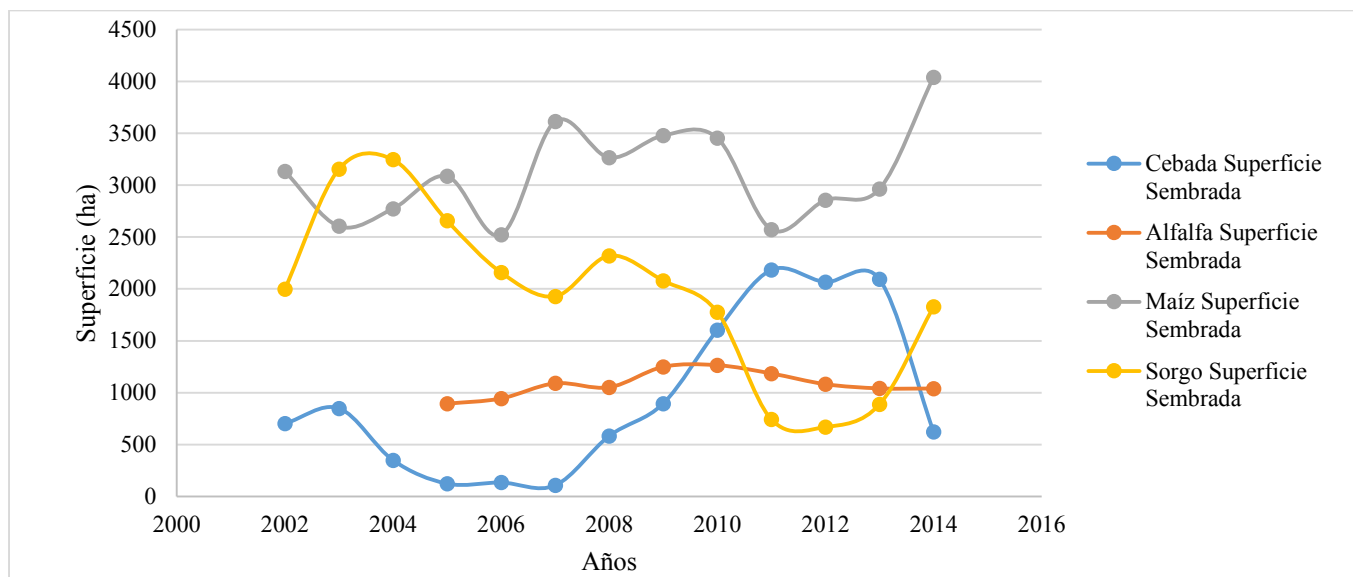


Figura 6.6 Principales cultivos sembrados en el DR 023

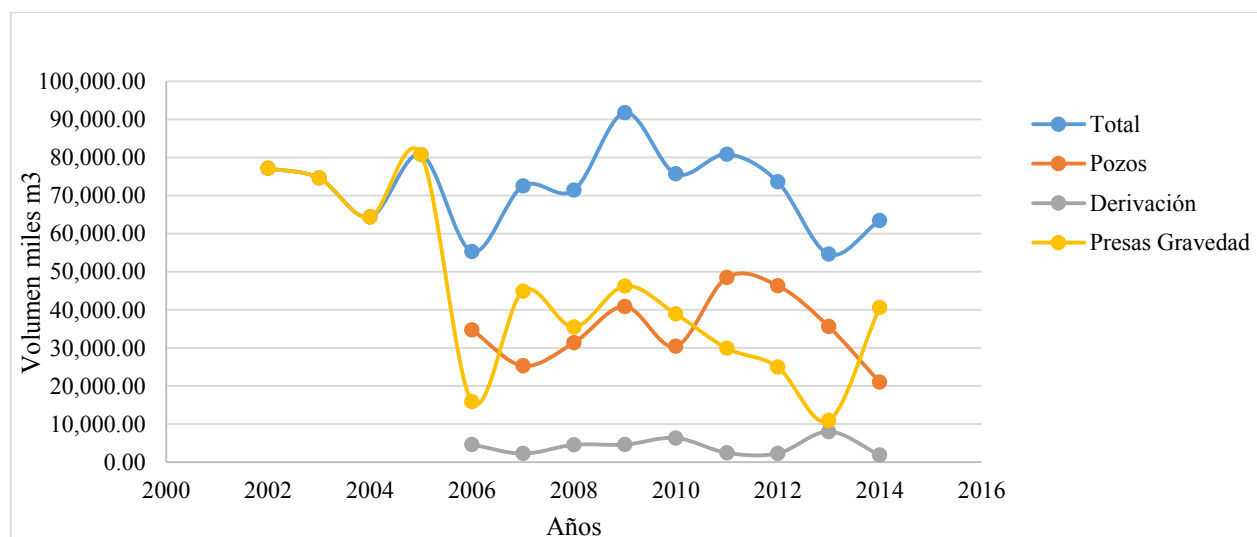


Figura 6.7 Tendencia del volumen distribuido para riego agrícola en DR 023

En el Distrito de Riego 023 los principales cultivos sembrados en promedio durante el período (2006 – 2014) son maíz con 3104.7 ha, seguido de sorgo con 1957.28 ha, seguido de alfalfa y cebada con 1092.33 y 947.38 hectáreas, respectivamente. En este caso la Comisión Nacional del Agua presenta datos de volumen de abastecimiento para riego del distrito mencionado y por fuente de abastecimiento (Tabla 6.3).

Tabla 6.2 Volumen de abastecimiento por fuente de abastecimiento de agua Distrito 023 (m ³)				
Año	Pozos	Derivación	Gravedad	TOTAL
2014	20 999 020	1 886 000	40 572 300	63 457 320
2013	35 612 250	8 033 490	10 971 730	54 617 480
2012	46 344 580	2 303 890	24 969 610	73 618 070
2011	48 486 170	2 459 660	29 903 530	80 849 360
2010	30 413 520	6 358 490	38 922 350	75 694 350
2009	40 871 760	4 611 540	46 271 630	91 754 930
2008	31 347 500	4 563 340	35 503 870	71 414 710
2007	25 331 500	2 253 310	44 929 310	72 514 120
2006	34 757 790	4 625 950	15 900 690	55 284 430

Las principales fuentes de abastecimiento para uso agrícola en el estado son presas y pozos para extracción de agua subterránea. Según datos del propio Distrito de Riego 023 las presas representan en promedio el 50% del abastecimiento de la demanda, mientras que el volumen restante se extrae del acuífero Valle de San Juan del Río.

6.3 Unidades de Riego

Las unidades de riego se pueden definir como el espacio físico que abarcan las obras de pequeña irrigación en México, donde los sistemas de riego se manejan exclusivamente por los propios usuarios (Silva & Quijada, 1999). En general, el conocimiento que se tiene sobre el manejo de las unidades de riego en el país es escaso, ya que no se dispone de información actualizada sobre los usuarios, patrones de cultivo y volúmenes utilizados, lo que refleja la falta de atención por parte del gobierno a este importante sector (Hernández & Kampfner, 2012). La CONAGUA indica que existen 39 500 unidades de riego, con una superficie de 3 millones de hectáreas que representan el 47% de la superficie de riego. La producción de las unidades de riego se orienta principalmente a los mercados locales y regionales (CONAGUA, 2012).

Las unidades de riego se diferencian de los distritos de riego por su tamaño y magnitud de la infraestructura hidráulica con la que cuentan, así como por la organización y distribución del recurso hídrico. Las unidades de riego son manejadas por ejidatarios, pequeños propietarios o una combinación entre ambos y pueden ser organizadas (22 734 unidades) o no organizadas (16 758 unidades), dependiendo del cumplimiento en su registro.

En el estado existen 169 000 hectáreas de temporal y 68 000 hectáreas de riego (INEGI, 2007), de las cuales 56 900 corresponden a las unidades de riego y el restante al Distrito de Riego 023. En la zona de estudio, el área sembrada en UdeR para el ciclo agrícola 2011 – 2012 fue 47 335 hectáreas (CONAGUA, 2012), cuya distribución por municipio podemos observar en la Tabla 6.4

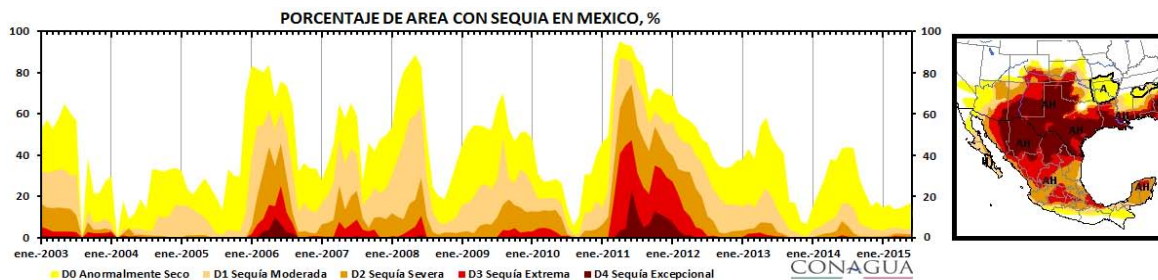
Tabla 6.3 Superficie sembrada en las unidades de riego por municipio	
Municipio	Superficie Sembrada
	(Ha)
Amealco de Bonfil	7 383.00
Colón	7 155.00
Huimilpan	1 699.50
El Marqués	13 124.00
Pedro Escobedo	11 130.10
San Juan del Río	3 234.60
Tequisquiapan	3 608.40
Total	47 334.6

Respecto a las fuentes de abastecimiento de agua para las unidades de riego a nivel nacional, podemos destacar las siguientes: pozos profundos (utilizado en el 46% de las unidades de riego), presas (35%) y fuentes superficiales (19%). Sobre la calidad del agua utilizada, en el 93% de las unidades de riego se utiliza agua extraída de pozos, ríos, lagunas y presas, con bajo contenido de sustancias tóxicas (INEGI, 2007). La Comisión Nacional del Agua por su parte indica que a nivel estatal se distribuyeron 433 017 000 metros cúbicos de agua en el ciclo agrícola 2011 – 2012 para irrigar 56 819 hectáreas sembradas.

El uso de tecnología en las unidades de riego permite mejorar la cantidad y calidad de la producción agrícola. A nivel estatal, el 54% de las unidades emplean por lo menos un tipo de tecnología como herbicidas, insecticidas, fertilizantes, semillas mejoradas y abonos naturales, siendo los más utilizados: fertilizantes químicos y herbicidas químicos (INEGI, 2007). En relación al equipamiento de las unidades de riego, los equipos más utilizados a nivel estatal son el tractor y camión de carga, principalmente en los municipios de San Juan del Río, Pedro Escobedo, el Marqués, Amealco y Colón. Los principales cultivos sembrados en las unidades de riego del estado son maíz con poco más de 26 000 hectáreas, alfalfa con 5 900 hectáreas y cebada con 2 350 hectáreas aproximadamente.

6.4 Sequía en México 2011

Uno de los fenómenos climáticos que más afecta a las actividades económicas del país es la sequía (SMN, 2015) por lo que observar su evolución nos permite comprender en buena medida las tendencias de producción agrícola, en específico dentro del sector agrícola de temporal. El año 2010 se caracterizó por ser uno de los más húmedos desde que se elaboran registros en el país, sin embargo 2011 quedó marcado en la historia del país por la sequía que afectó al centro y norte del país ocasionando cosechas pobres y pérdidas económicos (SMN, 2011).



Dicha sequía fue generada por la combinación de dos fenómenos: la Oscilación Decadal del Pacífico y el Niño-Oscilación del Sur en su fase “la Niña” y aunque el promedio anual de lluvia fue únicamente 10% menor a la media, la distribución de esta fue desigual donde estados como Durango, Coahuila, Chihuahua, Guanajuato y Querétaro tuvieron anomalías negativas de entre 30% a 45% de su lámina de lluvia anual promedio (SMN, 2011). Dentro del estado de Querétaro las regiones más afectadas fueron el centro y el occidente (Tabla 6.5).

Aunque la agricultura de riego no sufre afectaciones directas durante períodos de sequía cortos, la falta de lluvia provoca disminución en la disponibilidad de agua superficial propiciando una disminución en la producción manteniendo el mismo volumen de extracción de agua subterránea o manteniendo los niveles de producción aumentando la extracción de agua subterránea tal y como se muestra en la Figura 6.7. Por otro lado, la disponibilidad de agua residual tratada no depende de la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos, por lo que se trata de una opción atractiva para el abastecimiento al sector agrícola.

Tabla 6.4 Áreas afectadas por la sequía de 2011 en el estado de Querétaro

Sequia 2011	Enero		Marzo		Mayo		Julio		Septiembre	
Municipio	Área Expuesta (km ²)	Grado de Sequía	Área Expuesta (km ²)	Grado de Sequía	Área Expuesta (km ²)	Grado de Sequía	Área Expuesta (km ²)	Grado de Sequía	Área Expuesta (km ²)	Grado de Sequía
Amealco de Bonfil	0	SS	708	AS D0	696	SEV D2	696	EX D3	696	MOD D1
Colón	0	SS	803	AS D0	803	SEV D2	803	EX D3	803	MOD D1
El Marqués	0	SS	0	AS D0	736	SEV D2	736	EX D3	736	MOD D1
Huimilpan	385	AS D0	385	AS D0	385	SEV D2	385	EX D3	385	MOD D1
Pedro Escobedo	0	SS	250	AS D0	250	SEV D2	250	EX D3	250	MOD D1
San Juan del Río	0	SS	620	AS D0	620	SEV D2	620	EX D3	620	MOD D1
Tequisquiapan	0	SS	362	AS D0	362	SEV D2	362	EX D3	362	MOD D1

** SS Sin sequía, AS Anormalmente seco D0, MOD sequía moderada D1, SEV sequía severa D2, EX sequía extrema D3 y EXC sequía excepcional D4.

7. Capítulo VII Determinación de la demanda potencial de agua para el sector agrícola en la zona de estudio.

En el área de estudio, el sector agrícola representa aproximadamente el 64% del total del volumen extraído y registrado en el REDPA (Registro Público de Derechos del Agua), por lo que sin duda, este sector representa el principal usuario potencial para implementar prácticas de reúso en la región. Para poder lograrlo, es indispensable conocer la demanda potencial de agua que este sector ejerce sobre las fuentes de abastecimiento de la zona y evaluar su influencia en comparación con el volumen total extraído.

7.1 Concepto de Huella Hídrica

El concepto de huella hídrica es introducido por primera vez en 2003 y lo podemos definir como el volumen total de agua necesario para lograr la producción de un bien o servicio (Hoekstra et al., 2009).

El concepto de huella hídrica se compone de tres elementos que, en su conjunto, proporcionan la huella hídrica total:

- **Huella azul:** Se refiere al volumen de agua superficial y subterránea extraído para la producción de un bien o la prestación de un servicio.
- **Huella verde:** Representa al volumen de agua consumido proveniente de la precipitación.
- **Huella gris:** Es el volumen de agua potable necesario para asimilar la carga contaminante del agua residual generada al producir un bien o servicio hasta lograr cumplir con los estándares ambientales de calidad.

La magnitud de la huella hídrica de una región estará en función de los siguientes factores principales (UNESCO-IHE, 2011):

- a) Patrones de consumo de sus habitantes (relacionado con el nivel económico de la población).
- b) Tipo de industria
- c) Hábitos alimenticios de la población
- d) Prácticas agropecuarias (nivel de tecnificación)

Diversos autores se han dado a la tarea de realizar estudios para determinar la huella hídrica de algún producto en alguna región específica o país. La UNESCO a través del Instituto de Educación relativa al Agua (IHE), ha realizado diversos estudios para determinar valores estándar de la huella hídrica a nivel mundial. Aunque sabemos que el volumen de agua consumido por un cultivo depende, entre otros factores, de la localización, precipitación, temperatura, tipo de suelo y tipo de riego, el uso de del concepto huella hídrica a nivel global permite estimar de manera general el consumo de agua en función del tipo de cultivo y del área cultivada.

En el estudio realizado por la UNESCO, se estimó que la huella hídrica anual en la agricultura durante el periodo 1996-2005 fue de 7404 Gm³/año (UNESCO-IHE, 2011), que comprendió el análisis de 146 cultivos, de los cuales 126 son de producidos a gran escala (maíz, trigo, avena, arroz, sorgo) y 20 que únicamente se producen en regiones aisladas. El 78% de dicho volumen representa la huella verde, 12% la huella azul y 10% la huella gris, mientras que trigo, arroz y maíz consumieron la mayor parte del volumen mencionado. En la Tabla 7.1, se muestra una comparación de la huella hídrica para diversos cultivos.

Otro factor a considerar es la cantidad de biomasa aprovechable que se obtiene de un cultivo. Aquellos cultivos cuya cantidad de biomasa aprovechable sea mayor, por ejemplo la espinaca o lechuga (donde prácticamente toda la planta se consume), tendrán una menor huella hídrica, mientras que la huella hídrica de los cultivos con una menor cantidad de biomasa aprovechable será mayor, por ejemplo el café, nueces y almendras.

Tabla 7.1 Huella Hídrica por cultivo a nivel mundial

Cultivo	Huella Verde (m ³ /ton)	Huella Azul (m ³ /ton)	Huella Gris (m ³ /ton)	Total (m ³ /ton)
Aguacate	849	283	849	1981
Albaricoque	694	502	92	1287
Avena	1479	181	128	1788
Caña de azúcar	130	52	15	197
Caucho, gomas, ceras	12964	361	422	13747
Centeno	1419	25	99	1543
Cereales	1232	228	184	1644
Chile	240	42	97	379
Círuela	s.d.	s.d.	s.d.	2200
Cultivos forrajeros	207	27	20	254
Cultivos para la extracción de aceites	2023	220	121	2364
Dátil	s.d.	s.d.	s.d.	2300
Durazno	583	188	139	910
Especias	5872	744	432	7048
Espinaca	118	14	160	292
Fibras	3375	163	300	3838
Frijol	320	54	188	562
Frutales	727	147	93	967
Higo	s.d.	s.d.	s.d.	3350
Jitomate	108	63	43	214
Lechuga	133	28	77	238
Leguminosas	3180	141	734	4055
Lenteja	4324	489	1060	5873
Limón	432	152	58	642
Maíz	947	81	194	1222
Mango	1314	362	124	1800
Manzana	561	133	127	821
Naranja	401	110	49	560
Nueces & almendras	7016	1367	680	9063
Papa	191	33	63	287
Papaya	399	40	21	460
Pera	645	94	183	922
Piña	215	9	31	255
Plátano	660	97	33	790
Raíces y Tubérculos	327	16	43	386
Sandía	147	25	63	235
Sorgo	2857	103	87	3047
Tabaco	2021	205	700	2926
Toronja	s.d.	s.d.	s.d.	2200
Trigo	s.d.	s.d.	s.d.	1827
Uva	425	97	87	608
Vegetales	194	43	85	322

Fuente: Mekonnen & Hoekstra, (2010)

Los cinco cultivos con la menor huella hídrica total son piña (255 m³/ton), lechuga (238 m³/ton), sandía (235 m³/ton), jitomate (214 m³/ton) y caña de azúcar (197 m³/ton). Por otro lado, las especias y semillas como la nuez y almendra, son los cultivos con la mayor huella hídrica (7000 a 9000 m³/ton). El grupo de los cereales (avena, centeno, maíz, trigo y sorgo) es el más cultivado a nivel mundial y su huella hídrica promedio se estima en 1644 m³/ton, siendo el trigo el cereal con una mayor huella hídrica (1827 m³/ton) y el maíz con la menor huella hídrica

del grupo (1222 m³/ton). La huella hídrica de cultivos frutales varía desde 235 m³/ton para la sandía, hasta 2400 m³/ton para la uva.

7.2 Estimación de la Huella Hídrica para la región de estudio

Para estimar el volumen de riego empleando el concepto de huella hídrica, únicamente se debe tomar en cuenta la huella hídrica azul, ya que como se definió anteriormente, se relaciona con las extracciones de agua superficial y subterránea, en este caso para riego.

Dentro del sector agrícola de riego del estado de Querétaro, los principales cultivos son alfalfa, avena, cebada, maíz y sorgo. En la Tabla 7.2 se incluye la lista de cultivos que se producen en el estado. En algunos casos particulares donde no se reporta ningún valor a nivel mundial se ha asignado el valor promedio indicado para “otros cultivos”. En el estudio de la UNESCO mencionado anteriormente, también se hace referencia a valores de huella hídrica de carácter local para los principales cultivos como lo son: maíz, trigo y cebada (utilizaremos esos valores para el cálculo).

Tabla 7.2 Huella Hídrica para los cultivos sembrados en el estado			
Lista de Cultivos	Huella Azul (m³/ton)	Huella Hídrica Total (m³/ton)	Superficie Total Sembrada (ha)
Ajo	81.00	588.00	61.00
Alfalfa	27.00	254.00	6957.90
Apio	43.00	322.00	8.00
Avena	181.00	1788.00	2438.00
Brócoli	21.00	285.00	140.00
Calabacita	24.00	336.00	4.00
Cebada	376.00	1437.00	4421.60
Cebolla	44.00	271.00	107.00
Chile	42.00	379.00	569.00
Coliflor	21.00	285.00	275.00
Durazno	188.00	910.00	42.00
Espárrago	119.00	2150.00	206.00
Espinaca	14.00	292.00	43.00
Frijol	54.00	562.00	400.00
Frutales	147.00	967.00	3.80
Jícama	85.31	868.83	12.00
Jitomate	63.00	214.00	56.00
Lechuga	28.00	238.00	583.00
Maíz	62.00	1490.00	29034.90
Nopal	85.31	868.63	16.50
Otras Hortalizas	43.00	322.00	0.00
Otros Cultivos	85.31	868.83	4700.50
Otros Frutales	147.00	967.00	5.70
Pastos	27.00	254.00	315.00
Peral	94.00	922.00	3.00
Rosal	910.00	1008.00	111.10
Rye Grass	25.00	1543.00	465.00
Sorgo	103.00	3047.00	1689.60
Tomate Verde	63.00	214.00	157.00
Trigo	318.00	1542.00	120.10
Triticale	171.5	1542.50	1082.00
Vid	97.00	609.00	84.80
Zanahoria	28.00	195.00	576.60
Zempoaxochitl	85.31	85.31	61.00

Fuente: Mekonnen & Hoekstra (2010), CONAGUA (2006-2014)

Al realizar un análisis de la situación del sector agrícola en la región, se distinguen diferencias en tecnología, administración y funcionamiento entre el DR 023 y las UdeR ubicadas en la región. Adicionalmente, en el caso de las Unidades de Riego, la CONAGUA no reporta el cálculo del volumen destinado para riego, por lo que resulta indispensable realizar el cálculo de la demanda potencial para riego de manera separada y considerar a ambas entidades como usuarios potenciales de riego independientes.

7.3 Análisis de la huella hídrica potencial para el Distrito de Riego 023

En la región de estudio se ubica el Distrito de Riego 023 que cubre una superficie de poco más de 11 000 hectáreas, de las cuales únicamente se han sembrado en promedio (8 183 hectáreas (CONAGUA, 2004-2014). Para el cálculo de la huella hídrica potencial en el distrito y con el fin de compararla con la huella hídrica potencial correspondiente a las unidades de riego, hemos empleado datos del ciclo agrícola 2011 – 2012 ya que la CONAGUA únicamente ha publicado datos sobre unidades de riego para ese ciclo, donde la superficie sembrada para el distrito de riego 023 fue de 7 459 hectáreas. En la Tabla 7.4 se puede observar que los cultivos con mayor superficie sembrada en el distrito son los cereales, destacando el **maíz** con 2 855.6 ha (38.3 % de la superficie total), la **cebada** con 2 065.9 hectáreas (27.7% de la superficie total), **alfalfa** con 1 082 hectáreas (14.5%) y **sorgo** con 669.1 hectáreas (8.9%). Estos cuatro cultivos representan el 89.4% de la superficie total sembrada.

Para la estimación del volumen demandado por hectárea para los cultivos sembrados, es necesario utilizar el valor de huella hídrica azul, así como el rendimiento por hectárea. Respecto al volumen utilizado por hectárea el cultivo más demandante es el rosal con 15 492.2 m³/ha. Dentro del grupo de los cereales, la cebada demanda un volumen de 2327.44 m³/ha, le siguen la alfalfa y el sorgo con 2 178.09 y 1 049.9 m³/ha respectivamente y finalmente el maíz que posee la mayor superficie sembrada demanda un volumen de 718.6 m³/ha.

Con la información anterior y conociendo la superficie sembrada, finalmente se puede estimar la huella hídrica potencial por cultivo (Tabla 7.4). En este caso, los cuatro cereales mencionados, que recordemos ocupan una superficie de 89.4% del total sembrado, demandan un volumen estimado de 9.92 millones de metros cúbicos (65.4% del volumen total demandado por el DR 023). Sin embargo, en este caso destaca la producción de **avena**, aunque la superficie sembrada es relativamente menor (408.7 ha), el alto rendimiento por hectárea que reporta, provoca que el volumen demandado por hectárea sea el segundo más elevado con 7 868.1 m³/ha y su huella hídrica potencial represente 3.2 millones de metros cúbicos. Por lo que si agrupamos a éstos cinco cultivos (alfalfa, avena, cebada, maíz y sorgo) el volumen que demandan se incrementa a 13.1 millones de metros cúbicos (86.5% del total) (Gráfica 7.3)

Tabla 7.3 Huella Hídrica Potencial DR023 2011-2012					
Lista de Cultivos	Superficie Sembrada (ha)	Huella Azul (m ³ /ton)	Rendimiento (ton/ha)	Volumen cada hectárea (m ³ /ha)	Huella hídrica potencial m ³
Frijol	39.00	54.00	1.73	93.42	3 643.4
Frutales	3.80	147.00	8.00	1176.00	4 468.8
Otros Frutales	5.70	147.00	6.18	908.46	5 178.2
Vid	36.60	97.00	3.00	291.00	10 650.6
Trigo	12.20	318.00	4.82	1531.70	18 686.7
Chile	23.20	42.00	36.81	1546.02	35 867.7
Zanahoria	86.90	28.00	36.82	1031.06	89 599.3
Otros Cultivos	69.90	85.31	52.07	4442.34	310 519.7
Sorgo	669.10	103.00	10.19	1049.89	702 479.3
Rosal	100.40	910.00	17.03	15495.20	1 555 718.1
Maíz	2855.60	62.00	11.59	718.58	2 051 977.1
Alfalfa	1082.00	27.00	80.67	2178.09	2 356 693.4
Avena	408.70	181.00	43.47	7868.07	3 215 680.2
Cebada	2065.90	376.00	6.19	2327.44	4 808 258.3
Total	7459.00			Total	15 169 420.8

Fuente: Mekonnen & Hoekstra (2010), Estadísticas de los Distrito de Riego – (2011-2012) CONAGUA

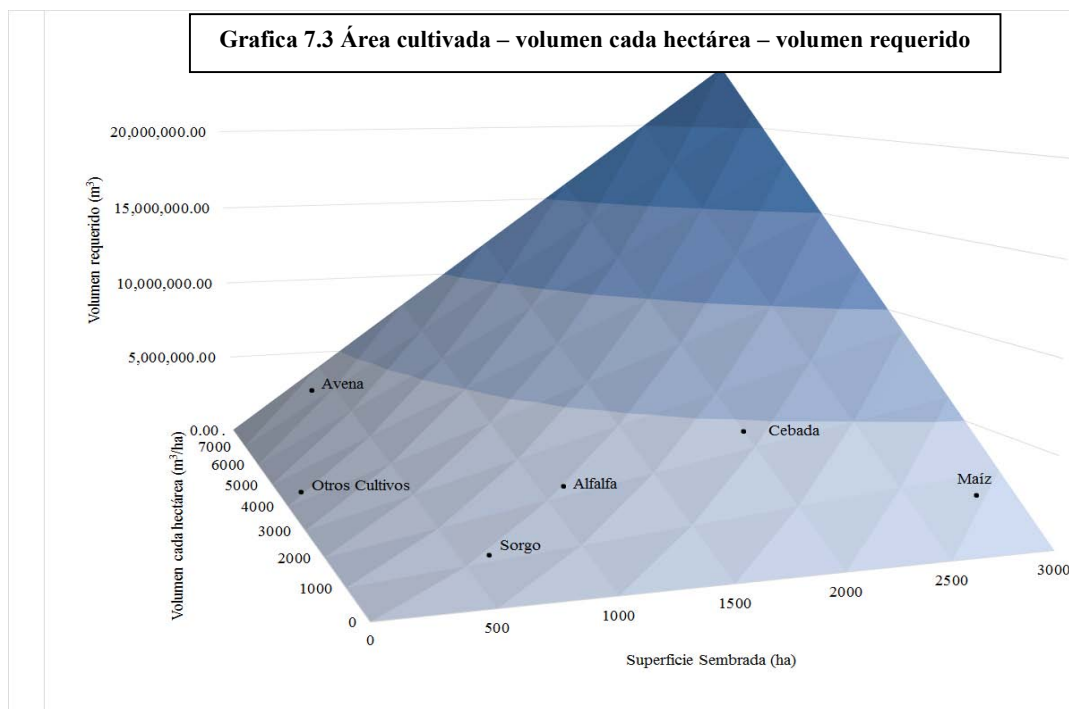


Figura 7.1 Gráfica Área cultivada – volumen cada hectárea – volumen requerido

7.4 Efecto de la Eficiencia de Riego en la Huella Hídrica de Distritos de Riego

En 2007, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua publicó valores promedio de eficiencia para los distritos de riego en México. Se considera que las pérdidas de agua en los distritos de riego son causadas por:

- Evaporación en el vaso de almacenamiento (en el caso de agua superficial), en canales a cielo abierto y parcelas.
- Filtración de agua en redes de conducción y distribución.
- Fugas.
- Percolación y escurrimiento en parcelas.
- Dotación en exceso (medida como eficiencia de entrega) y que provoca problemas de inundaciones y salinidad en el suelo agrícola.

Todos estos factores se han agrupado en tres indicadores de eficiencia para distritos de riego:

- a) Eficiencia en conducción en canales principales: Incluye pérdidas por evaporación en la red principal de distribución, además de pérdidas por filtración, juntas, válvulas, estructuras accesorias, etc... Se estima de manera global como 64.7% (IMTA, 2007).
- b) Eficiencia interparcelaria: Incluye pérdidas por evaporación, filtración, juntas, válvulas y estructuras accesorias en la red secundaria de distribución o regaderas (canales interparcelarios o parcelarios para conducir y suministrar agua desde la red principal hasta las parcelas). Varía de 65% a 85% en el caso de regaderas excavadas en tierra, 90% en regaderas revestidas de concreto y hasta 98% en regaderas entubadas. De manera general se asume como 75% (IMTA, 2007).
- c) Eficiencia de aplicación: Incluye pérdidas por evaporación y percolación durante el riego debido a longitudes de riego muy largas, gastos muy pequeños o suelos permeables. De manera general se asume como 70% (IMTA, 2007).

Por lo que si aplicamos estas consideraciones al cálculo realizado en la sección anterior obtendríamos una demanda potencial para el Distrito de Riego 023 de 44.66 millones de metros cúbicos por año con una eficiencia global de 34% (Tabla 7.5)

Tabla 7.4 Huella Hídrica DR023 2011-2012

Lista de Cultivos	Superficie Sembrada (ha)	Huella hídrica potencial m ³	Demanda Potencial considerando Eficiencia de Aplicación (70%) m ³	Demanda Potencial considerando Eficiencia de distribución en red secundaria (75%) m ³	Demanda Potencial considerando Eficiencia de conducción en red principal (64.7%)m ³
Frijol	39	3 643.40	5 204.86	6 939.81	10 726.14
Frutales	3.8	4 468.80	6 384.00	8 512.00	13 156.11
Otros Frutales	5.7	5 178.20	7 397.43	9 863.24	15 244.57
Vid	36.6	10 650.60	15 215.14	20 286.86	31 355.27
Trigo	12.2	18 686.70	26 695.29	35 593.71	55 013.47
Chile	23.2	35 867.70	51 239.57	68 319.43	105 594.17
Zanahoria	86.9	89 599.30	127 999.00	170 665.33	263 779.50
Otros Cultivos	69.9	310 519.70	443 599.57	591 466.10	914 167.07
Sorgo	669.1	702 479.30	1 003 541.86	1 338 055.81	2 068 092.44
Rosal	100.4	1 555 718.10	2 222 454.43	2 963 272.57	4 580 019.43
Maíz	2855.6	2 051 977.10	2 931 395.86	3 908 527.81	6 041 001.25
Alfalfa	1082	2 356 693.38	3 366 704.83	4 488 939.77	6 938 083.11
Avena	408.7	3 215 680.20	4 593 828.86	6 125 105.14	9 466 932.21
Cebada	2065.9	4 808 258.30	6 868 940.43	9 158 587.24	14 155 467.14
Total	7459	15 169 420.80	21 670 601.14	28 894 134.86	44 658 631.93

La CONAGUA, dentro de su publicación anual sobre estadísticas de Distritos de Riego en México, proporciona datos sobre volumen consumido y fuente de abastecimiento, retomando algunos datos importantes para el ciclo agrícola 2011 – 2012, se reporta un volumen total de abastecimiento de 73.62 millones de metros cúbicos, de los cuales, 46.35 millones provienen de pozos profundos y 27.27 millones de metros cúbicos de fuentes de abastecimiento superficiales. (CONAGUA, 2012).

7.5 Análisis de la huella hídrica potencial para las Unidades de Riego

Sobre las unidades de riego en el estado, los principales cultivos sembrados son: maíz con poco más de 26 000 hectáreas, alfalfa con 5875.9, cebada y avena con 2355.7 y 2029.3 hectáreas respectivamente, sorgo con 1020.5 ha y triticale con 1082 ha. Como mencionamos anteriormente, el rendimiento en toneladas por hectárea es diferente entre unidades de riego y distrito de riego, principalmente debido al tipo de riego y a la eficiencia del mismo. En la Tabla 7.6 se muestra el volumen de agua consumido por cada hectárea en función de la huella azul y el rendimiento promedio por cultivo en función en las unidades de riego del estado.

Podemos destacar el volumen requerido por hectárea dentro del grupo de los cultivos con la mayor superficie sembrada es: triticale (5528.02 m³/ha), la avena (4873.12 m³/ha), alfalfa, sorgo (1888.85 m³/ha), el maíz (1050.90 m³/ha) y la cebada (2219.90 m³/ha). El menor volumen requerido lo ocupan las leguminosas y vegetales.

Tabla 7.5 Huella Hídrica Unidades de Riego estado de Querétaro

Lista de Cultivos	Superficie Sembrada (ha)	Huella Azul (m ³ /ton)	Rendimiento (ton/ha)	Volumen cada hectárea (m ³ /ha)
Rosal	10.70	910.00	9.40	8554.00
Triticale	1082.00	171.50	32.23	5528.02
Avena	2029.30	181.00	26.92	4873.12
Frutales	14.98	147.00	25.00	3675.00
Trigo	107.90	318.00	6.35	2020.36
Alfalfa	5875.90	27.00	79.53	2147.27
Sorgo	1020.50	103.00	18.34	1888.85
Jitomate	56.00	63.00	28.43	1790.78
Rye Grass	465.00	25.00	62.00	1550.00
Maíz	26179.30	62.00	16.95	1050.90

Vid	47.90	97.00	11.86	1149.94
Chile	545.80	42.00	24.10	1012.06
Cebolla	107.00	44.00	20.92	920.48
Ajo	61.00	81.00	9.33	756.00
Peral	3.00	94.00	6.30	592.20
Zanahoria	489.70	28.00	20.64	577.83
Lechuga	583.00	28.00	18.74	524.67
Espárrago	206.00	119.00	4.05	481.95
Pastos	315.00	27.00	17.84	481.68
Durazno	42.00	188.00	2.50	469.06
Cebada	2355.70	376.00	5.90	2219.90
Calabacita	4.00	24.00	14.00	336.00
Brócoli	140.00	21.00	13.21	277.31
Coliflor	275.00	21.00	11.98	251.48
Espinaca	43.00	14.00	12.40	173.60
Frijol	361.00	54.00	1.10	59.40
Apio	8.00	85.31	17.13	1461.44
Jícama	12.00	85.31	269.35	22979.55
Nopal	16.50	85.31	59.51	5076.80
Otros Cultivos	4630.60	85.31	59.51	5077.88
Tomate Verde	157.00	63.00	37.25	2346.75
Zempoaxochitl	105.00	85.31	13.65	1164.55

Fuente: Mekonnen & Hoekstra (2010), Estadísticas de las Unidades de Riego – (2011-2012) CONAGUA

Una vez conocidas las huellas azules en metros cúbicos por hectárea para los diversos tipos de cultivo que se siembran en el estado y la superficie sembrada se puede conocer el volumen de agua requerido. (Gráfica 7.4). Al igual que en el caso del DR 023, podemos destacar de nueva cuenta el caso de los cereales y cultivos forrajeros, como el maíz, alfalfa, cebada, avena y sorgo.

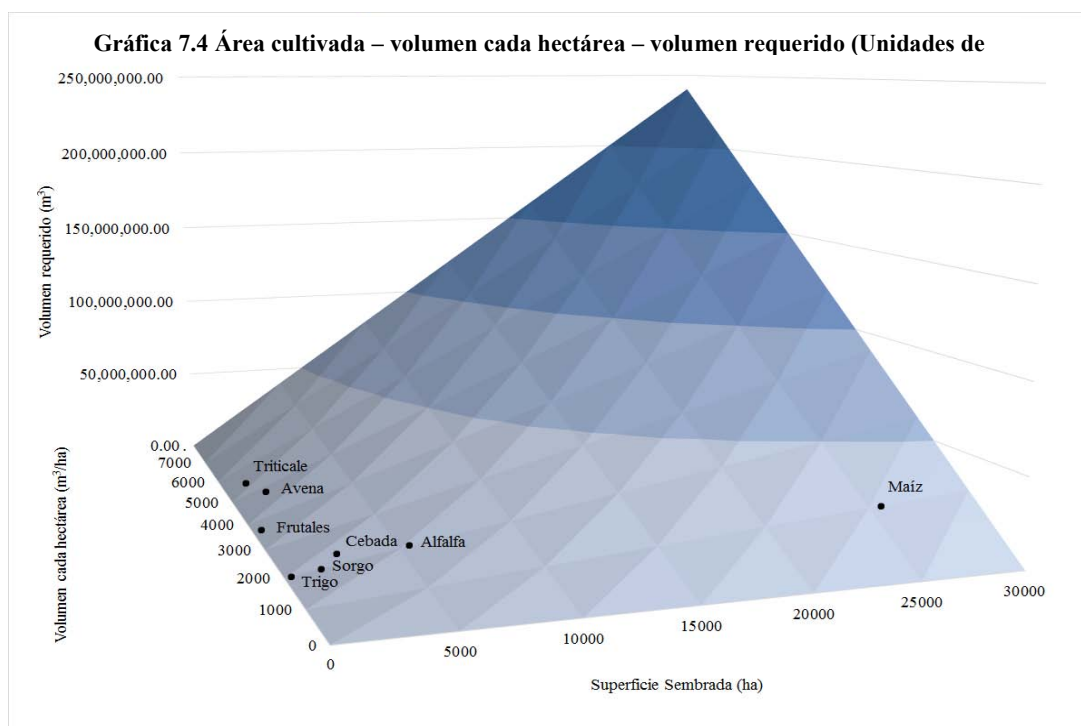


Figura 7.2 Área cultivada – volumen cada hectárea – volumen requerido (unidades de riego)

Por otro lado, también se cuenta información por municipio sobre superficie sembrada por tipo de cultivo, por lo que se puede estimar el volumen de agua consumido por municipio. Dicha información se muestra en el Anexo 1. Cabe destacar que la CONAGUA ha publicado información sobre rendimiento por cultivo a nivel municipal, por lo que con el fin de obtener un cálculo más preciso hemos empleado ese dato para el cálculo de la demanda potencial para unidades de riego del estado.

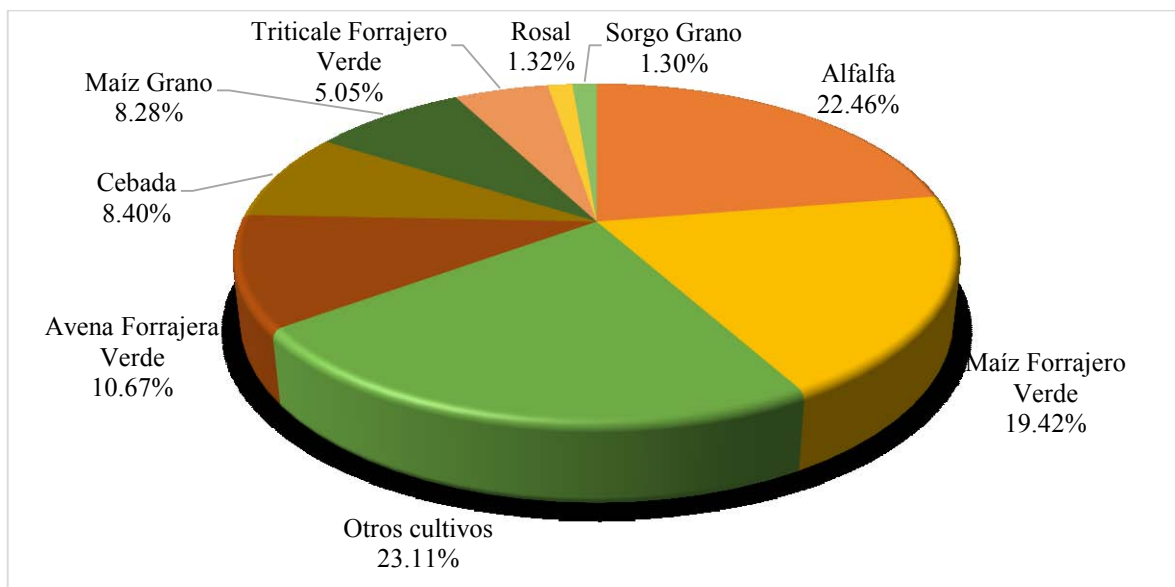
A nivel estatal los municipios de el Marqués y Pedro Escobedo concentran en sus unidades de riego 71.58 millones de metros cúbicos (65.3% de la demanda total). En segundo lugar destacan San Juan del Río y Colón con 24.07 millones de metros que representa el 19.22 %. Respecto a las eficiencias en unidades de riego, la información reportada es prácticamente inexistente por lo que para realizar esta estimación consideraremos los mismos valores incluidos en el breve resumen las eficiencias de riego en distrito de riego de la sección anterior. (Tabla 7.5).

Consideradas las eficiencias de riego para unidades de riego, la demanda potencial para riego agrícola en unidades de riego se estima cercana a los 322.63 millones de metros cúbicos irrigando un total de 47 334.8 hectáreas. Los porcentajes por municipio permanecen sin cambios ya que el incremento en el volumen demandado es similar en cada caso (Tabla 7.7).

Tabla 7.7 Demanda potencial por municipio en Unidades de Riego					
Municipio	Superficie Sembrada (ha)	Huella hídrica potencial (m³)	Demanda Potencial considerando Eficiencia de Aplicación (70%) (m³)	Demanda Potencial considerando Eficiencia de distribución en red secundaria (75%) (m³)	Demanda Potencial considerando Eficiencia de conducción en red principal (64.7%) (m³)³
Amealco de Bonfil	7,383.0	2,414,918.8	3,449,884.0	4,599,845.4	7,109,498.3
Colón	7,155.0	12,906,336.2	18,437,623.2	24,583,497.5	37,996,132.2
El Marqués	13,124.0	35,326,304.0	50,466,148.6	67,288,198.1	104,000,306.2
Huimilpan	1,699.5	2,522,455.8	3,603,508.2	4,804,677.6	7,426,086.0
Pedro Escobedo	11,130.1	36,255,182.9	51,793,118.4	69,057,491.2	106,734,916.8
San Juan del Río	3,234.7	11,163,592.8	15,947,989.8	21,263,986.4	32,865,512.2
Tequisquiapan	3,608.5	9,000,381.8	12,857,688.3	17,143,584.4	26,497,039.2
Total	47,334.8	109,589,172.3	156,555,960.4	208,741,280.6	322,629,490.8

7.6 Demanda potencial de agua por cultivo en la zona de estudio

Como mencionamos anteriormente, de manera general los cultivos con la mayor demanda potencial en el distrito de riego 023 son los mismos que en el caso de unidades de riego, tal es el caso de la alfalfa, avena, cebada y maíz. (Tabla 7.8) A nivel regional (en unidades y distrito de riego), el maíz (como maíz forrajero y de grano) es el cultivo con la mayor demanda potencial con 101.7 millones de metros cúbicos (27.69%), la alfalfa ocupa el segundo lugar con 82.5 millones de metros cúbicos (22.45% del total), seguido de avena con 39.18 millones de metros cúbicos (10.67% del total) y cebada con 30.8 millones de metros cúbicos (8.39% del total) (Gráfica 7.5). Los cuatro cultivos anteriores representan el 69.2% del total con una demanda potencial de 254.16 millones de metros cúbicos de agua. También podemos destacar el rubro de “otros cultivos” que representan el 18.96% del total con una demanda de 69.6 millones de metros cúbicos, sin embargo, para fines de evaluar requerimientos de cultivo como los nutrientes, resulta complicado establecer lineamientos que satisfagan a una gran variedad de ellos. Por el contrario en el caso de los cuatro cultivos principales (maíz, alfalfa, avena y cebada), es posible establecer de manera más sencilla lineamientos para reuso agrícola, que sin duda deberán estar orientados a esos cultivos.



* En el caso del rubro “Otros cultivos”, hemos incluido a la categoría de CONAGUA denominada “Otros cultivos” y a los cultivos de la Tabla anterior no descritos en ésta gráfica.

Figura 7.3 Porcentaje de la demanda teórica por cultivo

7.7 Demanda potencial de agua por municipio en la zona de estudio

Con el fin de caracterizar la demanda de agua teórica en la zona de estudio, también es necesario conocer como ésta se distribuye en el espacio, por lo que conocer la demanda potencial por municipio es importante para realizar un comparativo con las fuentes potenciales de agua residual tratada o sin tratar. En la Tabla 7.9 se muestra dicha demanda potencial así como el porcentaje que representa respecto al total donde los municipios de Pedro Escobedo, el Marqués y San Juan del Río concentran 78.5% de la demanda potencial total con un volumen de 288.3 millones de metros cúbicos.

Municipio	Unidades de Riego			Distrito de Riego 023			TOTAL	
	Sup. Semb. (ha)	Huella hídrica potencial (m³)	Demanda Potencial c/ Eficiencias	Sup. Semb. (ha)	Huella hídrica potencial (m³)	Demanda Potencial c/ Eficiencias	Demanda Potencial Total (m³)	%
Amealco	7,383.0	2,414,918.8	7,109,498.3	0.0	0.0	0.0	7,109,498.3	1.94%
Colón	7,155.0	12,906,336.2	37,996,132.2	0.0	0.0	0.0	37,996,132.2	10.35%
El Marqués	13,124.0	35,326,304.0	104,000,306.2	0.0	0.0	0.0	104,000,306.2	28.32%
Huimilpan	1,699.5	2,522,455.8	7,426,086.0	0.0	0.0	0.0	7,426,086.0	2.02%
Pedro Escobedo	11,130.1	36,255,182.9	106,734,916.8	2,972.8	6,045,804.3	17,798,790.8	124,533,707.7	33.91%
San Juan del Río	3,234.7	11,163,592.8	32,865,512.2	4,486.2	9,123,616.5	26,859,841.0	59,725,353.2	16.26%
Tequisquiapan	3,608.5	9,000,381.8	26,497,039.2	0.0	0.0	0.0	26,497,039.2	7.21%
Total	47,334.8	109,589,172.3	322,629,490.8	7,459.0	15,169,420.8	44,658,631.8	367,288,122.7	100.0

Tabla 7.8 Resumen de volúmenes de irrigación	Distrito de Riego 023			Unidades de Riego			Total Estatal		
	Huella hídrica potencial (m³)	Demanda potencial considerando eficiencias (m³)	% del volumen total	Huella hídrica potencial (m³)	Demanda potencial considerando eficiencias (m³)	% del volumen total	Huella hídrica potencial total (m³)	Demanda potencial total considerando eficiencias (m³)	% del volumen total
Ajo	0.00	0.00	0.00	43,764.03	128,840.89	0.04	43,764.03	128,840.89	0.04
Alfalfa	2,356,693.38	6,938,083.11	15.54	25,655,079.93	75,528,313.62	23.41	28,011,773.31	82,466,396.73	22.45
Apio	0.00	0.00	0.00	11,690.88	34,417.85	0.01	11,690.88	34,417.85	0.01
Avena Forrajera Verde	3,215,680.21	9,466,932.24	21.20	10,091,334.99	29,708,795.15	9.21	13,307,015.20	39,175,727.39	10.67
Brócoli	0.00	0.00	0.00	38,941.77	114,644.20	0.04	38,941.77	114,644.20	0.03
Calabacita (Calabacín)	0.00	0.00	0.00	1,344.00	3,956.72	0.00	1,344.00	3,956.72	0.00
Cebada	4,808,258.30	14,155,467.13	31.70	5,663,456.76	16,673,163.35	5.17	10,471,715.06	30,828,630.47	8.39
Cebolla	0.00	0.00	0.00	97,746.00	287,763.30	0.09	97,746.00	287,763.30	0.08
Chile Verde	35,867.66	105,594.06	0.24	616,692.01	1,815,535.46	0.56	652,559.67	1,921,129.52	0.52
Coliflor	0.00	0.00	0.00	69,776.70	205,421.95	0.06	69,776.70	205,421.95	0.06
Durazno (Melocotón)	0.00	0.00	0.00	27,978.16	82,367.44	0.03	27,978.16	82,367.44	0.02
Espárrago	0.00	0.00	0.00	98,770.00	290,777.95	0.09	98,770.00	290,777.95	0.08
Espinaca	0.00	0.00	0.00	7,464.80	21,976.30	0.01	7,464.80	21,976.30	0.01
Frijol (Alubia)	3,643.38	10,726.08	0.02	24,343.20	71,666.15	0.02	27,986.58	82,392.23	0.02
Frutales	4,468.80	13,156.11	0.03	1,776.60	5,230.29	0.00	6,245.40	18,386.40	0.01
Jícama	0.00	0.00	0.00	25,593.00	75,345.55	0.02	25,593.00	75,345.55	0.02
Jitomate	0.00	0.00	0.00	950,266.80	2,797,576.51	0.87	950,266.80	2,797,576.51	0.76
Lechuga	0.00	0.00	0.00	481,949.16	1,418,853.79	0.44	481,949.16	1,418,853.79	0.39
Maíz Elotero	0.00	0.00	0.00	114,142.00	336,032.97	0.10	114,142.00	336,032.97	0.09
Maíz Forrajero Verde	0.00	0.00	0.00	24,214,943.20	71,288,564.66	22.10	24,214,943.20	71,288,564.66	19.41
Maíz Grano	2,051,977.05	6,041,001.10	13.53	8,275,446.09	24,362,835.34	7.55	10,327,423.14	30,403,836.44	8.28
Nopal Verdura	0.00	0.00	0.00	24,019.03	70,711.80	0.02	24,019.03	70,711.80	0.02
Otros cultivos	310,519.73	914,167.17	2.05	23,348,206.26	68,736,899.28	21.31	23,658,726.00	69,651,066.45	18.96
Otros frutales	5,178.22	15,244.64	0.03	0.00	0.00	0.00	5,178.22	15,244.64	0.00
Rosal	1,555,718.08	4,580,019.37	10.26	91,527.80	269,456.98	0.08	1,647,245.88	4,849,476.35	1.32
Rye Grass (Zacate)	0.00	0.00	0.00	919,729.20	2,707,674.10	0.84	919,729.20	2,707,674.10	0.74
Sorgo Forrajero Verde	0.00	0.00	0.00	315,695.00	929,403.11	0.29	315,695.00	929,403.11	0.25
Sorgo Grano	702,479.34	2,068,092.56	4.63	921,044.54	2,711,546.45	0.84	1,623,523.88	4,779,639.01	1.30
Tomate de Cáscara	0.00	0.00	0.00	437,469.68	1,287,906.62	0.40	437,469.68	1,287,906.62	0.35
Trigo	18,686.74	55,013.59	0.12	120,526.45	354,828.74	0.11	139,213.19	409,842.33	0.11
Trigo Forrajero	0.00	0.00	0.00	104,265.54	306,956.77	0.10	104,265.54	306,956.77	0.08
Triticale Forr. Verde	0.00	0.00	0.00	6,293,518.35	18,528,058.73	5.74	6,293,518.35	18,528,058.73	5.04
Vid	10,650.60	31,355.27	0.07	57,118.35	168,155.89	0.05	67,768.95	199,511.16	0.05
Zanahoria	89,599.27	263,779.41	0.59	321,295.80	945,891.81	0.29	410,895.07	1,209,671.22	0.33
Zempoalxochitl	0.00	0.00	0.00	122,256.23	359,921.17	0.11	122,256.23	359,921.17	0.10
TOTAL	15,169,420.77	44,658,631.83	100.00	109,589,172.32	322,629,490.89	100.00	124,758,593.08	367,288,122.71	100.00

8. Capítulo VIII Determinación de la oferta potencial de agua para el sector agrícola en la zona de estudio.

En el capítulo anterior realizamos una estimación sobre la demanda potencial de agua en la región. Por lo que ahora es necesario conocer la oferta potencial de agua residual tratada con el fin de establecer una relación que permita evaluar el potencial de reúso agrícola existente. Para ello se abordarán cada uno de los componentes del subsector agua potable, alcantarillado y tratamiento.

8.1 Sector Agua Potable

8.1.1 Fuentes de abastecimiento para uso público

A nivel municipal y de manera similar a lo que ocurre en el sector agrícola, las fuentes de abastecimiento para uso público son preponderantemente subterráneas.

En el caso del municipio más poblado de la región (San Juan del Río), la Junta de Agua Potable y Alcantarillado Municipal (JAPAM) indica que el abastecimiento de agua para la ciudad proviene en su totalidad del acuífero 2203 Valle de San Juan del Río (JAPAM, 2006). El agua es extraída a través de pozos y únicamente es desinfectada (no existen plantas de potabilización en el municipio). Para el año 2006, JAPAM reportaba un volumen total de extracción de 13.81 millones de metros cúbicos para abastecimiento público, de los cuales 3.2 millones eran para la zona rural y 10.6 millones de metros cúbicos para la zona urbana (JAPAM, 2006). El sistema de abastecimiento cuenta con 21 tanques de regularización y 14 sectores de distribución con una eficiencia física estimada de 77% por lo que el volumen consumido fue cercano a los 10.65 millones de metros cúbicos (JAPAM, 2006). Por otro lado para el año 2015, en el Registro Público de Derechos del Agua (REPGA), el volumen concesionado para uso público urbano para ese municipio es de 24.06 millones de metros cúbicos, de los cuales 18.38 han sido otorgados a JAPAM.

Respecto a los municipios restantes, la información existente es publicada principalmente por la CONAGUA, la cual se proporciona a nivel de localidad, sin embargo no se hace mención de su origen (subterráneo o superficial) (Tabla 8.2)

Por otro lado, el REPGA indica que anualmente se tiene concesionado un volumen para uso público de 35.62 millones de metros cúbicos del acuífero 2203 Valle de San Juan del Río. De dicho volumen 42 000 m³ se concesionaron para el municipio de Amealco, 217 507 m³ para Colón, 1.83 millones de metros cúbicos para el Marqués, 705 278 m³ para Pedro Escobedo. Los municipios de Huimilpan y Tequisquiapan no tienen registros de concesión para uso público en el acuífero mencionado. Existen otros títulos de concesión para la Comisión Estatal de Agua (5.67 millones de metros cúbicos) y para el Estado de Querétaro (3.13 millones de metros cúbicos).

8.1.2 Población atendida por municipio

En el capítulo I se mostró la tendencia del número de habitantes en la zona de estudio, la cual indica un crecimiento promedio de 1.5% anual. Lo anterior seguirá impactando la demanda de agua potable para la población y aumentando la oferta potencial de agua susceptible de reúso agrícola. Por el número de habitantes que poseen actualmente, los municipios de El Marqués y San Juan del Río son los que tendrán el mayor crecimiento en términos absolutos con 63 000 habitantes y casi 75 000 habitantes respectivamente en el período 2010-2030.

Según datos de CONAGUA, la cobertura de abastecimiento de agua potable (en términos de número de habitantes) para el año 2012 en la región de estudio fue 96.3% (CONAGUA, 2012). En la Tabla 8.1 se muestra la población en 2010 y 2030 así como la cobertura de agua potable por municipio (suponiendo que dicha cobertura no aumentará).

Tabla 8.1 Población estimada y cobertura de agua potable por municipio					
Municipio	Cobertura de agua potable (%)	Población 2015 (CONAPO)	Población 2015 con servicio de agua potable	Población Estimada 2030 (CONAPO)	Población 2030 con servicio de agua potable
Amealco de Bonfil	94.3	66 142	62 372	80 976	76 360
Colón	97.9	62 693	61 376	76 478	74 872
El Marqués	92.2	142 523	131 406	181 097	166 971
Huimilpan	97	37 927	36 789	46 918	45 510
Pedro Escobedo	97	69 482	97 398	84 288	81 759
San Juan del Río	97.9	266 119	260 531	318 902	312 205
Tequisquiapan	96.6	69 473	67 111	82 801	79 986
Región Geohidrológica Valle de San Juan del Río	96.3	714 359	686 983	871 460	837 664

Fuente: CONAPO, CONAGUA (2012)

8.1.3 Volumen estimado para abastecimiento público

De acuerdo a los registros de la Comisión Nacional del Agua respecto al sector, en la Tabla 8.2 se muestran las principales localidades en la región de estudio, la población atendida por localidad y el gasto de agua potable producido, así como la dotación por habitante por día.

Tabla 8.2 Producción de agua potable en las principales localidades del estado					
Municipio	Localidad	Población localidad (2014)	Población Atendida (2014) en localidad	Caudal producido (L/s)	Dotación media (l/hab/día)
Amealco de Bonfil	Amealco de Bonfil	7750	7673	34	375
Colón	Colón	7077	7006	20	239
El Marqués	Saldarriaga	6797	6117	4	54*
Huimilpan	El Vegil	2542	2491	8	277
Pedro Escobedo	Pedro Escobedo	10055	9552	34	291
Pedro Escobedo	San Clemente	5171	3361	9	142
San Juan del Río	San Pedro Ahuacatlán	9002	8834	10	91
San Juan del Río	El Cazadero	3550	3373	7	165
San Juan del Río	La Llave	5519	5298	17	260
San Juan del Río	Paso de Mata	4776	4537	6	109
San Juan del Río	San Juan del Río	204 663	199 546	589	249
San Juan del Río	Santa Rosa Xajay	3688	3319	6	150
Tequisquiapan	San Nicolás	5702	5588	11	171
Tequisquiapan	Tequisquiapan	30721	30687	274	771
	TOTAL	307 013	297 382		

Fuente: CONAGUA, 2014 *No es representativo del total de población a nivel municipal, para ese municipio se tomará la dotación promedio estatal de 239 l/hab/día

Como mencionamos anteriormente, la Comisión Nacional del Agua no presenta datos a nivel municipal (solo localidad), por lo que tomaremos el promedio ponderado de la dotación en las localidades de cada municipio para la estimación de datos. El volumen de agua potable producido por día en la región de estudio estimado es 204 495.1 m³, lo que anualmente representa un volumen de 71.96 millones de metros cúbicos con caudal estimado de 2 366.84 L/s. (Tabla 8.3)

Tabla 8.3 Estimación del volumen de agua potable producida por municipio							
Municipio	Población total 2015	Cobertura Agua Potable (%)	Población atendida 2015	Dotación media (L/hab/día)	Producción Agua Potable (m ³ /día)	Caudal producido (L/s)	Producción de Agua Potable por año (2015) Mm ³
Amealco de Bonfil	66 142	94.3	62 372	375.0	23 389.5	270.71	8.54
Colón	62 693	97.9	61 376	239.0	14 668.9	169.78	5.35
El Marqués	142 523	92.2	131 406	239.0	31 406.1	363.50	11.46
Huimilpan	37 927	97	36 789	277.0	10 190.6	117.95	3.72
Pedro Escobedo	69 482	97	67 398	252.2	16 998.9	196.75	6.21
San Juan del Río	266 119	97.6	259 732	237.5	61 688.5	713.99	22.52
Tequisquiapan	69 473	97.9	68014	678.6	46 152.5	534.17	16.85
TOTAL	714 359	96.6	687 088	NA	204 495.1	2366.84	74.64

Fuente: Elaboración Propia, CONAGUA (2014)

Otro factor importante a considerar es la eficiencia física de un sistema de abastecimiento de agua potable, la cual representa el porcentaje de agua que es consumido por los usuarios referido al total del volumen inyectado a la red en un tiempo determinado (IMTA, 2015). Al respecto, la Comisión Nacional del Agua y el IMTA han desarrollado una matriz de indicadores de gestión de diversos organismos operadores en la República Mexicana. Dentro del estado de Querétaro, únicamente se tiene información del municipio de Querétaro y San Juan del Río, en el cual la eficiencia física ha presentado una disminución y para el año 2012 tuvo un valor de 62.5% mientras que para 2014 se redujo a 57.8% (PIGOO, 2015). Dado lo anterior, se considerará el mismo factor de eficiencia física para todos los municipios. En la Tabla 8.4 se muestra el volumen estimado de agua producido por los organismos operadores y el volumen estimado de agua consumido por los usuarios.

Tabla 8.4 Estimación del volumen de agua potable consumido					
Municipios	Población total 2015	Volumen producido (m ³ /día)	Eficiencia física	Volumen consumido (m ³ /día)	Volumen consumido anual (Mm ³)
Amealco de Bonfil	66 142	23 389.5	0.578	13 519.1	4.93
Colón	62 693	14 668.9	0.578	8 478.7	3.09
El Marqués	142 523	31 406.1	0.578	18 152.7	6.63
Huimilpan	37 927	10 190.6	0.578	5 890.2	2.15
Pedro Escobedo	69 482	16 998.9	0.578	9 825.4	3.59
San Juan del Río	266 119	61 688.5	0.578	35 655.9	13.01
Tequisquiapan	69 473	46 152.5	0.578	26 676.1	9.73
Región	714 359	204 495.1	0.578	118 198.1	43.14

Fuente: Elaboración Propia, CONAGUA (2014)

8.2 Sector Alcantarillado

Respecto al sistema de alcantarillado en la zona de estudio, la Subdirección de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento de la CONAGUA cuenta con datos sobre cobertura por municipio los cuales se incluyen en la Tabla 8.5. Con el fin de estimar la aportación de agua residual al sistema, también es necesario considerar que existe un volumen de agua facturada que no es dispuesta en la red de alcantarillado, como la destinada al riego de jardines o lavado de coches. De manera general se considera que entre el 75% y 80% (CONAGUA, 2007) de la dotación de agua potable es dispuesta en las atarjeas (cuando existe sistema de alcantarillado). Al aplicar un coeficiente de retorno de 0.75 y el porcentaje de cobertura de alcantarillado correspondiente por municipio (CONAGUA, 2014), el volumen producido de agua residual mostrado en la Tabla 8.5 resulta ser de 77 912.24 metros cúbicos al día, es decir, 28.44 millones de metros cúbicos durante todo el año.

Tabla 8.5 Estimación del volumen captado en el sistema de alcantarillado en los municipios de la región

Municipios	Población total 2015	Volumen consumido (m ³ /día)	Coefficiente Retorno Agua Residual	Volumen producido AR (m ³ /día)	Cobertura Alcantarillado	Volumen entra Alcantarillado (m ³ /día)
Amealco de Bonfil	66 142	13 519.1	0.75	10 139.3	57.15	5 794.18
Colón	62 693	8 478.7	0.75	6 359.00	76.14	4 842.00
El Marqués	142 523	18 152.7	0.75	13 614.5	91.50	12 457.66
Huimilpan	37 927	5 890.2	0.75	4 417.6	81.96	3 620.66
Pedro Escobedo	69 482	9 825.4	0.75	7 369.02	88.34	6 509.79
San Juan del Río	266 119	35 655.9	0.75	26 742.0	97.20	25 993.32
Tequisquiapan	69 473	26 676.1	0.75	20 007.1	93.44	18 694.64
Región Geohidrológica	714 359	118 198.1	0.75	88 648.6	NA	77 912.24

Fuente: Elaboración Propia, CONAGUA (2014)

Cabe destacar que en la estimación del volumen de agua que captado por el sistema de alcantarillado, no incluimos el volumen de agua de lluvia que podría entrar al mismo. Lo anterior debido a que no se tienen datos mensuales de generación de agua residual para poder comparar datos mensuales de precipitación (las lluvias ocurren como en la mayor parte de nuestro país entre Mayo y Octubre con un período de estiaje prácticamente sin precipitación). Obviamente se esperaría que cualquier aportación de agua de lluvia al sistema provoque una mejoría en la calidad de agua a tratar y un aumento en el volumen susceptible para reúso.

8.3 Sector Tratamiento de Agua Residual

8.3.1 Plantas de Tratamiento Existentes

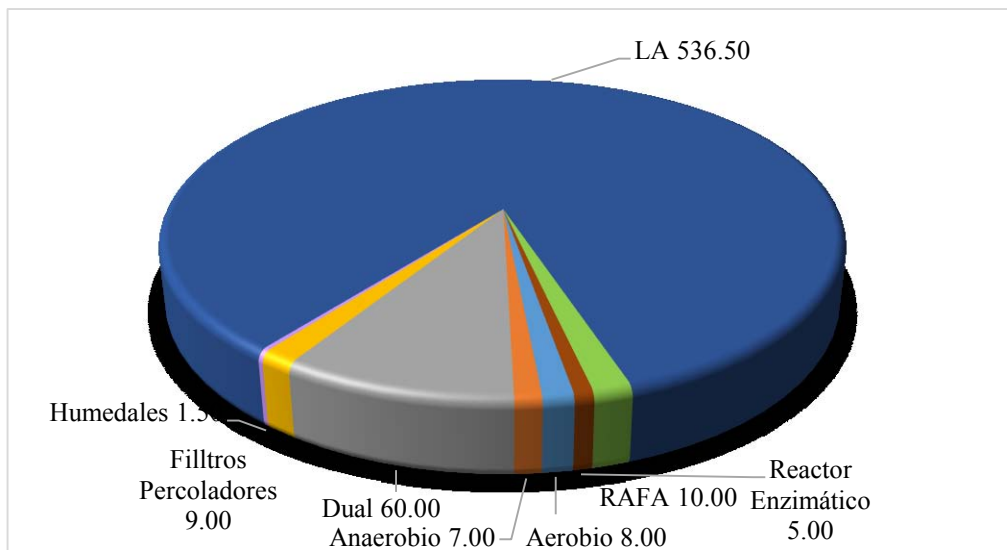
Según datos de la CONAGUA, en los municipios que conforman la región de estudio existen 52 plantas de tratamiento de agua residual, de las cuales para 2014, únicamente 22 plantas están en funcionamiento (CONAGUA, 2014). Por el volumen de agua residual tratado se destacan:

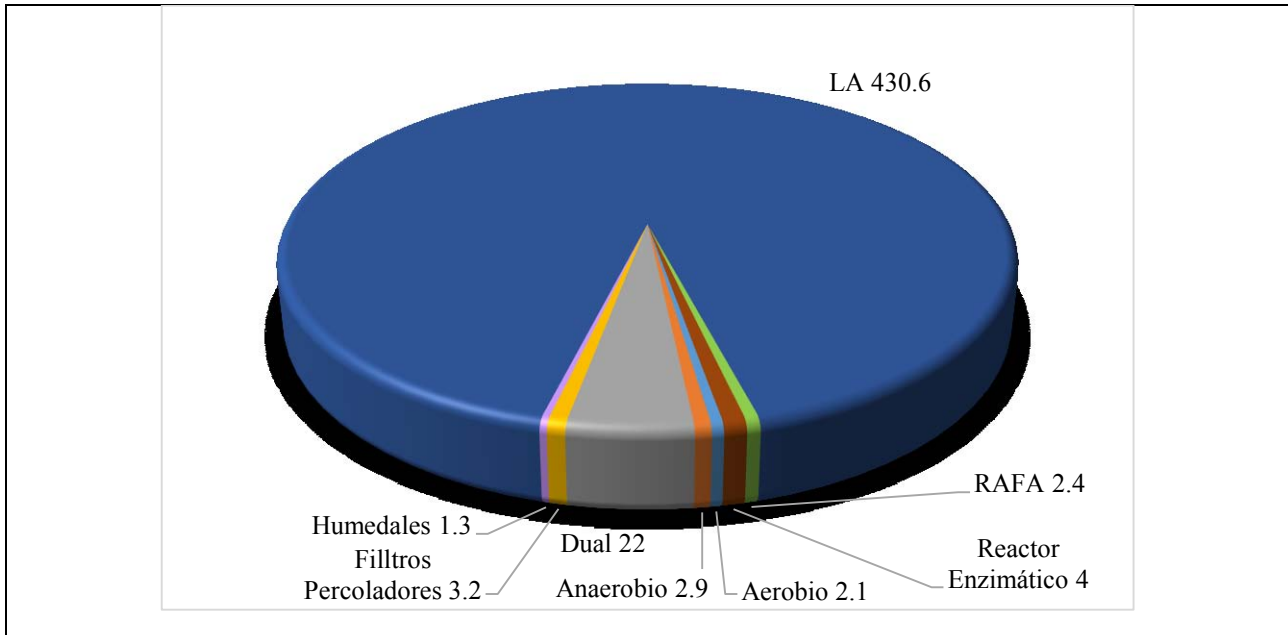
- PTAR San Pedro Ahuacatlán I, San Juan del Río: con un gasto de diseño de 125 L/s y un gasto de operación de 97 L/s. El tren de tratamiento es lodos activados y se ubican al norte de la ciudad de San Juan del Río.
- PTAR San Pedro Ahuacatlán II, San Juan del Río: con un gasto de diseño de 300 L/s y un gasto de operación de 280 L/s. El tren de tratamiento es lodos activados y se ubica al norte de la ciudad de San Juan del Río. La planta comenzó a operar en 2011.
- PTAR Tequisquiapan, Tequisquiapan: con un gasto de diseño de 60 L/s, opera con un gasto de 22 L/s. El tren de tratamiento es dual y se ubica al noreste de la ciudad, comenzó a operar en 2014.

Respecto al tipo de tratamiento, destaca el sistema de lodos activados (15 plantas). Del gasto total (637 L/s) instalado en la región, 536 L/s (84%) corresponde al sistema de lodos activados (Figura 8.1 y 8.2). Por otro lado, el caudal tratado en la región es 468.5 L/s, es decir, una eficiencia de operación de 73.5% (CONAGUA, 2014). En la Tabla 8.6 se muestran las principales características de las plantas de tratamiento en funcionamiento de la región con información del año 2014 y en el Anexo 2 se muestran todas las plantas. Respecto al uso de agua residual tratada en la región, la CONAGUA indica que el gasto destinado para riego agrícola directo es de 111.6 L/s (23.8% del total). Cabe destacar que existen otras plantas como San Pedro Ahuacatlán II cuyo cuerpo receptor es el río San Juan, del cual se extrae agua para riego agrícola en la zona.

Tabla 8.6 Plantas de Tratamiento de Agua Residual en funcionamiento ubicadas en la región

Municipio	Localidad	Nombre de la Planta	Proceso	Capacidad instalada (L/s)	Caudal tratado (L/s)	Cuerpo Receptor
Amealco	Amealco	Amealco de Bonfil	LA	20	14.6	Embalse Artificial
Amealco	Santiago Mexquititlan	Santiago Mexquititlan	Anaerobio	7	2.9	Riego Agrícola
Colon	Colon	Colon	LA	15	0.7	Riego Agrícola
El Marques	Chichimequillas	Chichimequillas	LA	6	2.9	Arroyo SN
El Marques	Saldarriaga	Bernardo Quintana	LA	12	11.5	Arroyo SN
Huimilpan	Huimilpan	Huimilpan	Filltros Percoladores	9	3.2	NA
Huimilpan	Huimilpan	La Noria	LA	2.5	1	NA
Huimilpan	El Milagro	El Milagro	Humedales	1.5	1.3	NA
Huimilpan	Huimilpan	Cumbres del Cimatario	LA	12	1	Bordo el Tángano
Huimilpan	Lagunillas	Lagunillas	LA	2	1	Riego Agrícola
Huimilpan	El Vegil	El Vegil	LA	2	0.3	NA
Pedro Escobedo	Pedro Escobedo	Pedro Escobedo	LA	15	7.1	Arroyo SN
San Juan del Río	San Pedro Ahuacatlán	San Pedro Ahuacatlán I	LA	125	97	Riego Agrícola
San Juan del Río	Loma Linda	Loma Linda	Reactor Enzimático	5	4	Riego Agrícola
San Juan del Río	San Miguel Galindo	San Miguel Galindo	RAFA	10	2.4	Arroyo Galindo
San Juan del Río	La Estancia	La Estancia	LA	10	6	Riego Agrícola
San Juan del Río	Puerta de Palmillas	Puerta de Palmillas	LA	5	1	NA
San Juan del Río	San Juan del Río	Real de Nogales	Aerobio	8	2.1	Río San Juan
San Juan del Río	El Organal	El Organal	LA	5	2.5	NA
San Juan del Río	San Pedro Ahuacatlán	San Pedro Ahuacatlán II	LA	300	280	Río San Juan
Tequisquiapan	La Fuente	La Fuente	LA	5	4	Laguna SN
Tequisquiapan	Tequisquiapan	Tequisquiapan	Dual	60	22	Río San Juan
Total				637	468.5	NA





Fuente: CONAGUA (2014)

Figura 8.1 - Figura 8.2 Caudal Instalado – Caudal Tratado y Tipo de Tratamiento

8.3.2 PTAR San Pedro Ahuacatlán II

La realización del presente trabajo, incluyó una visita técnica a la planta de tratamiento de agua residual San Pedro Ahuacatlán II, localizada al norte de la ciudad de San Juan del Río, mismo municipio en el estado de Querétaro. En términos de caudal tratado y volumen producido de agua residual tratada, dicha planta es la más importante en la región de estudio por lo que es una de las principales fuentes potenciales de agua para reúso agrícola.

La planta se concibió para recibir agua residual de tipo doméstico de la zona centro y parte de la zona oriente de la ciudad, sin embargo actualmente recibe diversas descargas industriales de la zona. Mientras que el agua residual producida en la zona oriente de la ciudad es tratada en la PTAR San Pedro Ahuacatlán I ubicada también al norte de la ciudad.

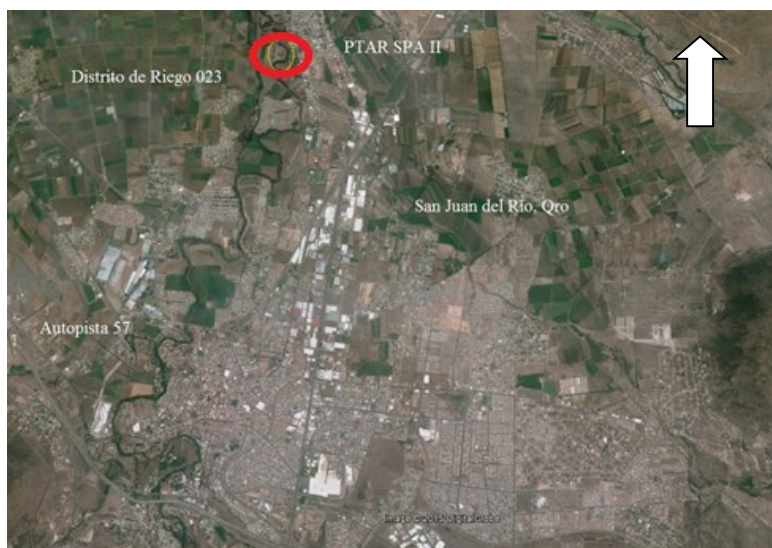


Figura 8.3 Localización de la PTAR San Pedro Ahuacatlán II

El caudal promedio de llegada a la planta es de 300 l/s (caudal de diseño), sin embargo durante avenidas la planta puede tratar hasta un máximo de 500 l/s. Por otro lado, el caudal mínimo de operación es de 150 l/s. El tren de tratamiento con el que opera, permite la remoción de más del 95% de sólidos suspendidos y de DBO. Los parámetros de operación más importantes se muestran en la Tabla 6.1. En dicha Tabla también se muestran los valores de operación de DBO y de Sólidos Suspendidos, los cuales durante 2014 y 2015 han presentado valores muy superiores a los de diseño, por lo que la planta trabaja con sobrecarga orgánica.

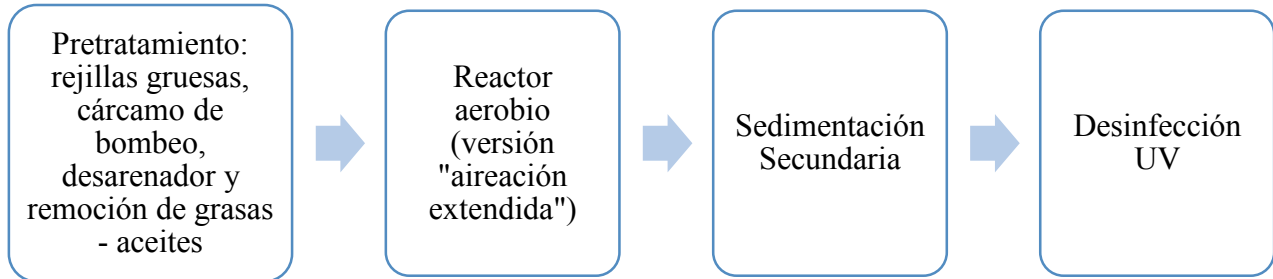


Figura 8.4 Esquema general de las unidades de tratamiento de la planta

Tabla 8.7 Datos del proyecto PTAR San Pedro Ahuacatlán II			
Gasto de diseño	300 l/s	DBO diseño influente	500 mg/l
Gasto de operación reportado por CONAGUA	280 l/s	DBO diseño efluente	30 mg/l
Gasto de operación durante visita	300 l/s	DBO promedio influente 2015	1289.6 mg/l
Gasto máximo de operación	500 l/s	SST diseño influente	300 mg/l
Gasto mínimo de operación	150 l/s	SST diseño efluente	40 mg/l
Gasto de diseño en la segunda etapa	600 l/s	SST promedio influente 2015	3284.5 mg/l

Pretratamiento

El agua colectada por los emisores que descargan a esta planta llega al cárcamo de entrada de agua cruda. En él se almacena el agua para su posterior cribado, lo cual permite la remoción de sólidos gruesos. Cuando el

caudal de entrada es superior al caudal máximo (500 l/s) existe una tubería de desviación que conduce el gasto excedente sin tratamiento al río San Juan.



Figura 8.5 Caudal de llegada a la planta

Tratamiento Secundario

El tratamiento secundario consta de dos reactores para degradación de materia orgánica con inyección de aire por difusión. El reactor biológico cuenta con dos módulos con una capacidad de 150 l/s cada uno y se diseñaron con una DBO promedio de entrada de 500 mg/l. El tiempo de retención hidráulico varía entre 9 y 11 horas. Este proceso extendido permite que se desarrolle la nitrificación – desnitrificación disminuyendo la concentración de nitrógeno (NTK) desde 50 mg/l en promedio en el influente a 20 mg/l en el efluente, según datos proporcionados en el sitio.



Figura 8.6 Reactor Aerobio

El clarificador cuenta con una rastra en la parte superior e inferior para la eliminación de cualquier materia flotante y del lodo generado en la parte inferior. El giro de las rastras es de 1 vuelta por hora y funcionan con un motor de 0.5 hp. El efluente de la planta posee una DBO de 30mg/l y 40 mg/l de sólidos totales.



Figura 8.7 Sedimentador Secundario

Tabla 8.8 Datos sobre unidades del tren de tratamiento PTAR Pedro Ahuacatlán II			
Cárcamo de bombeo	3 equipos de bombeo	Gasto por sedimentador (2 sedimentadores)	150 l/s
Gasto de operación	150 l/s c/u para un gasto de operación de 300 l/s, hay un equipo adicional de reserva	Volumen del sedimentador	1458 m ³
Número de módulos del reactor aerobio	2	TRH	TRH =2.0 h
Gasto por módulo	150 l/s	Desinfección	Radiación UV
Volumen de reactor	5000 m ³ por módulo, TRH 6.94h	Número de unidades	8 barras de 2.5 m
% Recirculación lodo	33 %	Caudal efluente	275 l/s

8.3.2.1 Problemática en la gestión y manejo del agua residual en la planta

- La zona de San Juan del Río está desarrollada industrialmente, por lo que se aprovechan fines de semana para realizar descargas al alcantarillado municipal, tal y como se pudo constatar en la visita realizada.
- Problemas con surfactantes y jabones utilizados en casas e industrias.
- La planta no cuenta con estructura de regularización para mantener uniforme el caudal y la carga orgánica que entre a la planta de tratamiento, de manera que se mantenga la eficiencia de tratamiento, al evitar el arrastre de biomasa o bien, cambios drásticos que afecten la estabilidad del proceso. El gasto máximo se recibe por las mañanas, disminuyendo por las tardes y siendo mínimo en las noches.
- La entrada de agua blanca implica descargas industriales que generan cantidades importantes de espuma, lo cual se pudo constatar en la zona de pretratamiento, en el reactor y previo a los sedimentadores.
- Grandes empresas de la zona cuentan con plantas de tratamiento pero no se sabe si funcionan adecuadamente o si realizan descargas al alcantarillado municipal (Kimberly Clark, Kaltex, Cartones Ponderosa).

- Existen convenios que permiten la entrada de agua residual con valores de DBO entre 15 000 y 20 000 mg/l que alteran el proceso (Transforma SA de CV, empresa dedicada al reciclaje de cartón y transporta 4 pipas de 32 000 litros al día, que son descargados al cárcamo de bombeo de la planta).
- El reactor biológico fue diseñado con una DBO promedio de 500 mg/l, en 2014 el promedio fue de 1100 mg/l y en 2015, de 1300 mg/l.
- Influyente y efluente con alta conductividad eléctrica (influyente 900 mS/cm² y efluente con 3000 a 5000 mS/cm²).
- Existen tuberías (3 líneas de 3km) para riego agrícola (300 l/s) pero existen problemas con los agricultores y la CONAGUA (Gerencia de Riego), ya que se prefiere agua subterránea (bombeo a más de 500 m) o de la presa Constitución de 1917.

8.3.3 Ubicación de las Plantas de Tratamiento de Agua Residual en la región

Un factor muy importante que interviene en la posibilidad de implementar un esquema de reúso agrícola es la distancia entre el sistema de tratamiento de agua residual y las zonas de cultivo. Del total de plantas construidas en la región de estudio (52), para 2014 únicamente 22 reportan un caudal tratado. En la Figura 8.8 se muestra la ubicación de dichas plantas y el nombre de los municipios donde están ubicadas.

Es importante destacar que la mayoría de ellas se encuentran localizadas en el municipio de San Juan del Río. En la misma Figura se puede observar en color azul claro el parteaguas, es decir, la línea que divide las regiones hidrológicas 26 del Pánuco (lado derecho) y 12 Lerma – Santiago (lado izquierdo).

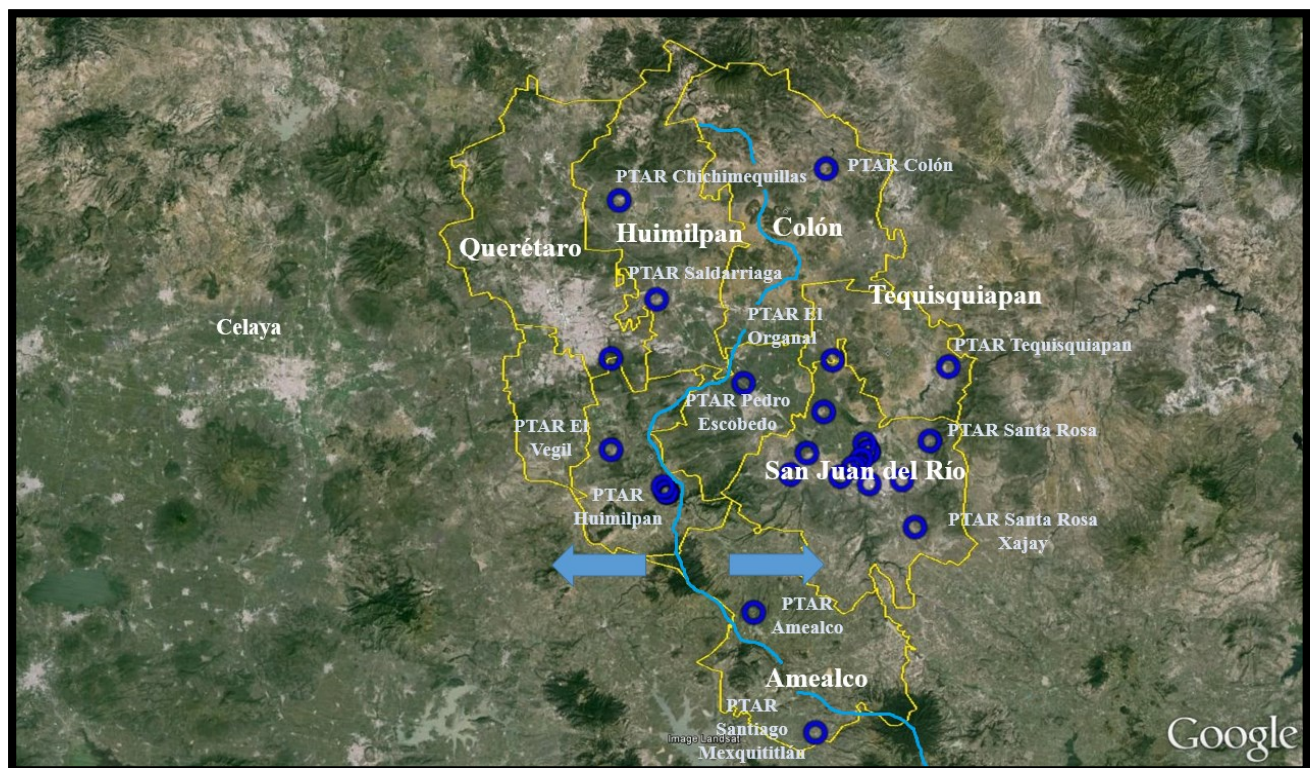


Figura 8.8 Ubicación de las PTARs en la región de estudio

Lo anterior cobra importancia al considerar los costos de bombeo del agua residual a las zonas de riego, por lo que resultará conveniente agrupar zonas de cultivo y plantas de tratamiento que se ubiquen en la misma región hidrológica para evitar un costo adicional por trasvase de agua de una cuenca a otra. Por ejemplo, las plantas de tratamiento del municipio de el Marqués y de Huimilpan se encuentran localizadas en la región del Lerma – Santiago, por lo que las áreas potenciales para reúso deberán estar ubicadas en la misma región, además de que resultaría muy costoso transportar el agua hacia la cuenca del Pánuco.

Por otro lado, de las plantas de tratamiento que tratan el mayor volumen de agua residual, dos de ellas se encuentran en el municipio de San Juan del Río (PTARs San Pedro Ahuacatlán I y II) y la tercera en el municipio de Tequisquiapan. Las tres plantas se localizan en la región del Pánuco, al igual que el DR 023 por lo que es más factible realizar el riego con agua residual tratada, aunque se debe revisar con detalle la topografía del sitio para reducir costos relativos a bombeo. En la Figura 8.9 se muestra un acercamiento para observar las PTARs localizadas en la zona de San Juan del Río y su cercanía con el Distrito de Riego 023.

8.3.4 Volumen estimado de generación de agua residual tratada en la región

Con los datos registrados por la Comisión Nacional del Agua respecto a caudal tratado y caudal instalado, realizamos el análisis por municipio sobre el volumen de agua tratado. Por la magnitud caudal de operación, el municipio de San Juan del Río es el que genera mayor cantidad de agua residual tratada con un volumen diario de 34 128 m³, es decir, un volumen anual de 12.45 millones de metros cúbicos (Tabla 8.9). A nivel regional, el volumen de agua tratado asciende a 40 478.4 metros cúbicos al día, lo que representa un volumen anual de 14.77 millones de metros cúbicos tratados. Por otro lado, si el sistema de tratamiento regional funcionara a la capacidad instalada, el volumen anual disponible de agua residual tratada aumentaría a 20.08 millones de metros cúbicos (135% de la capacidad actual).

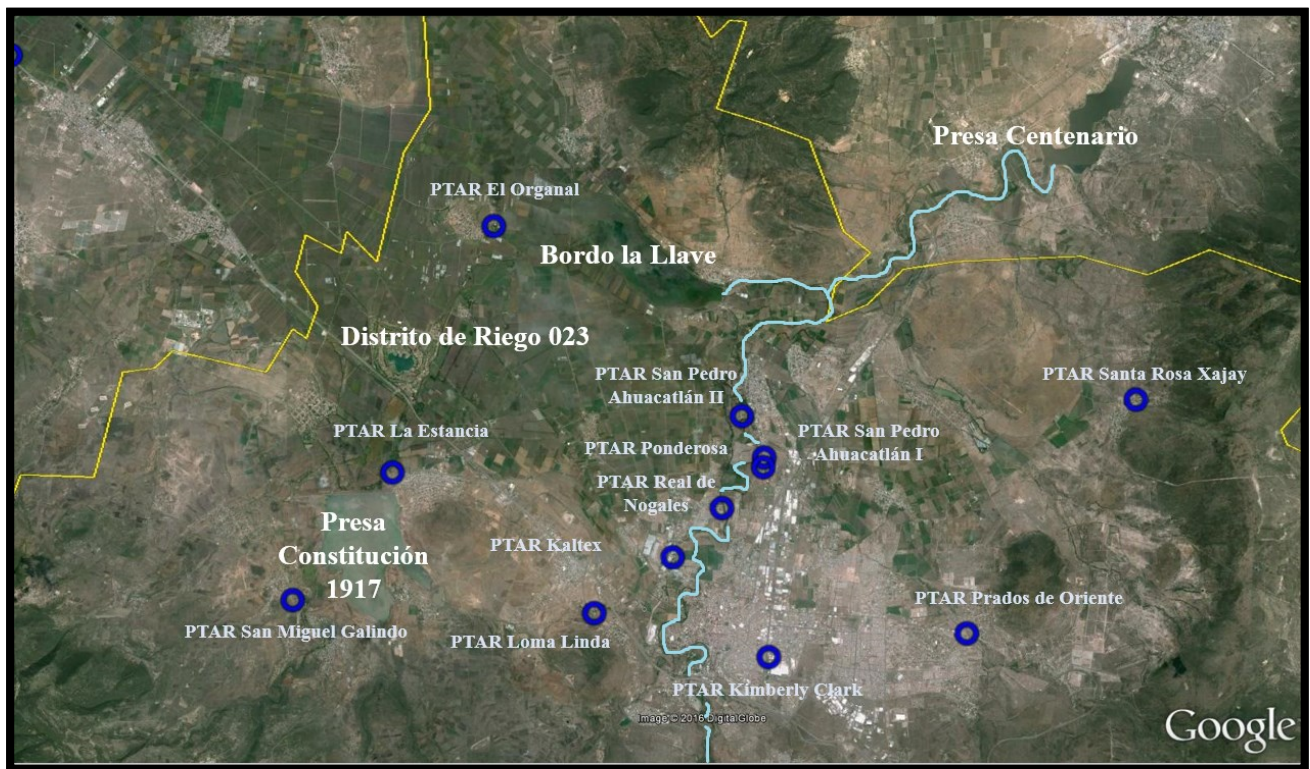


Figura 8.9 Ubicación de las PTARs en la zona de San Juan del Río

En la siguiente Tabla también se incluye la cobertura de tratamiento en función del volumen que entra al sistema de alcantarillado y el volumen de tratamiento. A nivel regional la cobertura es de 49%, mientras que el municipio de San Juan del Río presenta una cobertura de 123%, lo que nos hace suponer que existen usuarios no domésticos que vierten agua residual al sistema de alcantarillado de la ciudad. A nivel estatal la cobertura de tratamiento es de 50.4% (CONAGUA, 2014). Mientras que en la estimación mostrada en la Tabla 8.9 la cobertura de tratamiento es de 51.9%.

Tabla 8.9 Estimación del volumen producido de agua residual tratada.

Municipios	Población (2015)	Volumen entra Alcantarillado (m ³ /día)	Caudal Instalado Tratamiento CONAGUA 2014 (L/s)	Caudal Tratado CONAGUA A 2014 (L/s)	Volumen Tratado (m ³ /día)	% Trat.	Volumen total (si toda la capacidad instalada funcionara) m ³ /día
Amealco de Bonfil	66 142	5 794.2	27.00	17.50	1 512.0	24%	2332.8
Colón	62 693	4 842.0	15.00	0.70	60.5	1%	1296.0
El Marqués	142 523	12 457.7	18.00	14.40	1 244.2	9%	1555.2
Huimilpan	37 927	3 620.7	29.00	7.80	673.9	17%	2505.6
Pedro Escobedo	69 482	6 509.8	15.00	7.10	613.4	9%	1296.0
San Juan del Río	266 119	25 993.3	468.00	395.00	34 128.0	123%	40435.2
Tequisquiapan	69 473	18 694.6	65.00	26.00	2246.4	11%	5616.0
Región	714 359	77 912.2	637.00	468.50	40 478.4	49%	55036.8
		28 437 968. 7	m ³ /año		14 774 616.00	m ³ /año	20 088 432.0

Por lo que podemos concluir que actualmente, existe un volumen de agua residual tratada para reúso de 14.77 millones de metros cúbicos anuales. Si las plantas de tratamiento funcionarían al 100% de su capacidad el volumen disponible aumentaría a 20.08 millones de metros cúbicos anuales y si se tuviera el 100% de cobertura de tratamiento del volumen que entra al alcantarillado el volumen disponible aumentaría a 28.43 millones de metros cúbicos anuales.

8.3.5 Tendencia reciente en la cobertura de tratamiento

A lo largo del tiempo, la cobertura de saneamiento en el país ha aumentado debido a la construcción de nuevas plantas de tratamiento, sin embargo, existen otras que, debido a la falta de mantenimiento han disminuido su capacidad de operación o incluso se encuentran fuera de servicio. Tal es el caso de la región en estudio, que en 2006, contaba con 36 plantas de tratamiento con una capacidad instalada de 314.5 L/s y un caudal tratado de 272.6 L/s (CONAGUA, 2006). Respecto al uso para riego agrícola, se reportó que la totalidad de agua tratada se destinaba para dicho uso. En 2006 existía una planta de tratamiento con filtros percoladores denominada “San Juan del Río” con un caudal tratado de 125 L/s, en los registros posteriores dicha planta no se vuelve a mencionar. Por lo que en 2009 y a pesar de la puesta en marcha de 8 nuevas plantas en la región, la capacidad instalada y el caudal tratado presentan una disminución. En 2011, comienza la operación de la PTAR San Pedro Ahuacatlán II lo que provoca un aumento en la capacidad de tratamiento y en el caudal tratado en la zona superando los 450 L/s y 600 L/s respectivamente (Gráfica 8.10)

Entre 2012 y 2014, los reportes de CONAGUA respecto a saneamiento dejaron de incluir 25 plantas de tratamiento en la región (sin especificar la causa), por lo que a pesar de la construcción de nuevas plantas, la cobertura de tratamiento se mantuvo estable. En 2014, comienza la operación de la PTAR Tequisquiapan con un caudal instalado de 60 L/s y un caudal de tratamiento de 22 L/s (Gráfica 8.10)

Cabe destacar que la Comisión Estatal de Aguas del estado, en su cartera de proyectos de obra civil 2015 tiene contemplado la construcción de 7 plantas de tratamiento, de las cuales 3 se localizan en la zona de estudio (PTAR Navajas Aeropuerto (no se especifica gasto), PTAR Epigmenio González (no se especifica gasto) y PTAR Amealco de Bonfil II (20 a 30 L/s).

Respecto al gasto que se destina para riego agrícola, se puede observar en la gráfica anterior que ha presentado una disminución desde 2006 (fecha en la que inició el registro) al pasar de 272.6 L/s a 111.6 L/s. Sin embargo, en los registros de CONAGUA se reporta que la PTAR San Pedro Ahuacatlán II y PTAR Tequisquiapan vierten el agua tratada en el río San Juan, donde existe un reúso indirecto y sin medición de agua de dicho río para riego agrícola, además de que se realiza con una mezcla de agua superficial, agua residual y agua residual tratada.

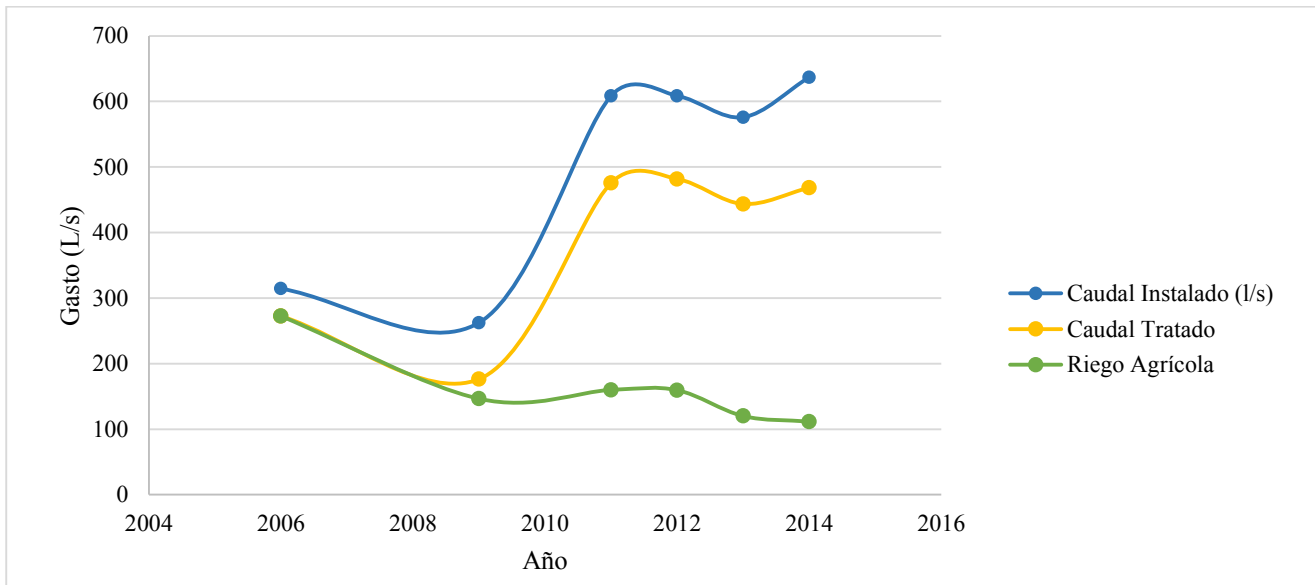


Figura 8.10 Tendencia en la cobertura de tratamiento

8.3.6 Escenarios 2030 de generación de agua residual tratada en la región

Con el fin de presentar un análisis más completo de la situación actual y futura de la generación de agua residual tratada en la región de estudio, es necesario definir escenarios futuros basados en planeación gubernamental al respecto. La CONAGUA ha publicado Planes Hídricos por regiones para el año 2030. Para nuestro caso, hemos consultado el Plan Hídrico Visión 2030 Golfo Norte y el Plan Nacional de Desarrollo 2013 – 2018 donde se establecen metas diversas en materia de agua, entre las cuales podemos destacar: aumento en las coberturas de agua potable y alcantarillado al 100%, aumento en las coberturas de tratamiento al 100% y mejora en la eficiencia física de los sistemas de distribución. Con base en cada una de estas metas, hemos planteado tres escenarios para 2030 donde se ha considerado el aumento en la población y el cumplimiento parcial o total de dichas metas para analizar su impacto en la propuesta.

Escenario 1: El tratamiento de agua residual continúa con la tendencia actual, las coberturas de agua potable y alcantarillado, así como la eficiencia física no mejoran.

Con base en las estimaciones realizadas por el Consejo Nacional de Población para 2030, la producción de agua potable aumentaría al pasar de 43.14 millones de metros cúbicos consumidos en 2015 a 52.4 millones de metros cúbicos consumidos en 2030. Respecto al alcantarillado, el volumen recolectado aumentaría al pasar de 28.43 millones de metros cúbicos en 2015 a 34.54 millones de metros cúbicos en 2030.

En la gráfica 8.10 mostramos la evolución de la cobertura de tratamiento a nivel regional. Para estimar dicho valor en el 2030 y ante la falta de un plan específico que indique los proyectos de saneamiento a desarrollar en los próximos años, obtuvimos las ecuaciones que presentan el mejor ajuste para los datos ingresados (caudal instalado y caudal tratado en función del tiempo).

Respecto al caudal instalado el modelo más representativo resulta ser:
 $y = 48.45x - 96919...$ (1) con un coeficiente de correlación de 0.72

Para el caudal tratado, el modelo más representativo resulta ser:
 $Y = 33.735x - 67450...$ (2) con un coeficiente de correlación de 0.58

Al aplicar la primer expresión, obtenemos un caudal instalado de 1 428.4 L/s, mientras que con la segunda expresión obtenemos un caudal tratado de 1 032.05 L/s. Los valores anteriores representan un volumen de agua tratado para 2030 de 32.55 millones de metros cúbicos anuales con una cobertura de 94.22 % (Tabla 8.10).

Tabla 8.10 Estimación del volumen de agua potable, volumen en alcantarillado y volumen tratado para el Escenario 1

Municipios	Diario Agua Potable (m ³)	Anual Agua Potable (hm ³)	Consumido Diario (m ³)	Consumido Anual (hm ³)	Diario Alcant. (m ³)	Anual Alcant. (hm ³)	Volumen Diario Tratado (m ³ /día)	Volumen Anual Tratado (hm ³)
Amealco de Bonfil	28 635.1	10.45	16 551.1	6.04	7093.7	2.59	3330.8	1.22
Colón	17 894.4	6.53	10 343.0	3.78	5906.7	2.16	133.2	4.86
El Marqués	39 906.2	14.57	23 065.8	8.42	15 829.3	5.78	2740.7	1.00
Huimilpan	12 606.4	4.60	7286.5	2.66	4479.0	1.63	1484.6	0.54
Pedro Escobedo	20 621.2	7.53	11 919.1	4.35	7896.0	2.88	1351.3	0.49
San Juan del Río	73 924.0	26.98	42 728.1	15.60	31 148.9	11.37	75179.9	27.44
Tequisquiapan	55 006.6	20.08	31 793.8	11.60	22 281.1	8.13	4948.6	1.81
Región	248 593.9	90.74	143 687.3	52.45	94 635.6	34.54	89 169.1	32.54

Escenario 2: Se mejora el sistema de abastecimiento y alcantarillado. Mejora de eficiencia física a 80% (según Plan Hídrico Regional Golfo Norte Visión 2030), aumento en la cobertura de agua potable y alcantarillado a 100%, se mantiene la tendencia de tratamiento.

Realizando el mismo procedimiento de cálculo que en el caso anterior, podemos observar que la producción de agua potable crece por el aumento en la cobertura del servicio y se ubica en los 94.21 millones de metros cúbicos anuales. El volumen de agua consumido también se incrementa hasta los 75.36 millones de metros cúbicos anuales debido al aumento en la eficiencia física. Dicho aumento se encuentra estimado en el Plan Hídrico Regional 2030, donde se indica que las obras y estudios necesarios para lograr esa eficiencia requerirán una inversión de 675 millones de pesos (PHRGN 2030, 2011).

En el sistema de alcantarillado se tendría una cobertura de prácticamente 100% (según datos del mismo plan) lo que provocaría que el volumen anual que ingresa al alcantarillado aumente a 56.52 millones de metros cúbicos. Respecto al tratamiento y aplicando los modelos indicados en la sección anterior, el volumen anual tratado sería de 32.5 millones de metros cúbicos al año con una cobertura de 57.6%. (Tabla 8.11)

Tabla 8.11 Estimación del volumen de agua potable, volumen en alcantarillado y volumen tratado para el Escenario 2

Municipios	Diario Agua Potable (m ³)	Anual Agua Potable (hm ³)	Consumido Diario (m ³)	Consumido Anual (hm ³)	Diario Alcant. (m ³)	Anual Alcant. (hm ³)	Diario Tratado (m ³ /día)	Anual Tratado (hm ³)
Amealco de Bonfil	303 66.0	11.08	24 292.8	8.87	18 219.6	6.65	3330.8	1.22
Colón	18 278.2	6.67	14 622.6	5.34	109 66.9	4.00	133.2	0.05
El Marqués	43 282.2	15.80	34 625.7	12.64	25 969.3	9.48	2740.7	1.00
Huimilpan	12 996.3	4.74	10 397.0	3.79	7797.8	2.85	1484.6	0.54
Pedro Escobedo	21 258.9	7.76	17 007.2	6.21	12 755.4	4.66	1351.3	0.49
San Juan del Río	75 741.8	27.65	60 593.5	22.12	45 445.1	16.59	75 179.9	27.44
Tequisquiapan	56 186.5	20.51	44 949.2	16.41	33 711.9	12.30	4948.6	1.81
Región	258 110.0	94.21	206 488.0	75.37	154 866.1	56.53	89 169.1	32.55

Escenario 3: Se mejora la eficiencia física a 80% (según el PHRGN 2030), aumento en la cobertura de alcantarillado y tratamiento a 100% (según lo propuesto por el PHRGN 2030).

Al aplicar los cálculos anteriores al tercer escenario, la producción de agua potable y el volumen consumido se mantienen estables respecto al escenario 2, así como el volumen que entra al alcantarillado (56.52 millones de metros cúbicos). Por otro lado, según las metas de saneamiento incluidas en el PHRGN 2030 (cobertura total de saneamiento), el volumen de agua residual producido sería prácticamente similar al volumen entrante

al alcantarillado (56.52 Mm³). Esto implica que la producción diaria de agua sería de 154 866.01 metros cúbicos (1 792.42 L/s), es decir, 382.5% del caudal tratado actual (Tabla 8.12)

Para lograr lo anterior, es necesario llevar a cabo la ampliación de la infraestructura del sector para llevar a cabo el tratamiento adicional de 1316 L/s, 4.7 veces el caudal tratado en la PTAR San Pedro Ahuacatlán II.

Tabla 8.12 Estimación del volumen de agua potable, volumen en alcantarillado y volumen tratado para el Escenario 3

Municipios	Diario Agua Potable (m ³)	Anual Agua Potable (Mm ³)	Consumido Diario (m ³)	Consumido Anual (Mm ³)	Diario Alcantarillado (m ³)	Anual Alcantarillado (Mm ³)	Diario Tratado (m ³ /día)	Anual Tratado (Mm ³)
Amealco	30 366.0	11.08	24 292.8	8.87	18 219.6	6.65	18 219.6	6.65
Colón	18 278.2	6.67	14 622.6	5.34	10 966.9	4.00	10 966.9	4.00
El Marqués	43 282.2	15.79	34 625.7	12.64	25 969.3	9.48	25 969.3	9.48
Huimilpan	12 996.3	4.74	10 397.0	3.79	7797.8	2.85	7797.8	2.85
Pedro Escobedo	21 258.9	7.76	17 007.2	6.21	12 755.4	4.66	12 755.4	4.66
San Juan del Río	75 741.8	27.65	60 593.5	22.12	45 445.1	16.59	45 445.1	16.59
Tequisquiapan	56 186.5	20.51	44 949.2	16.41	33 711.9	12.30	33 711.9	12.30
Región	258 110	94.21	206 488.0	75.37	154 866.0	56.53	154 866	56.53

8.4 Resumen de escenarios

Al agrupar las estimaciones realizadas los puntos anteriores respecto a la generación de agua residual tratada (potencial para reúso) podemos observar que para 2030, si se cumple lo propuesto para el caso del escenario 3, se tendría un volumen disponible de agua residual tratada cuatro veces mayor al actual (Tabla 8.13). Por otro lado, un correcto funcionamiento de las plantas de tratamiento actuales permitiría elevar en 42% el volumen disponible. Cabe destacar que los municipios que requieren la mayor inversión para la construcción de nuevas obras de saneamiento son: Colón, el Marqués, Pedro Escobedo y Tequisquiapan. Mientras que San Juan del Río, únicamente deberá ajustar el volumen tratado en función del crecimiento población y de una mejora en las coberturas de agua potable, alcantarillado y eficiencia física.

Tabla 8.13 Resumen de Escenarios de Tratamiento (Volumen Tratado Anual)

Municipios	2015 (Mm ³)	2015 con toda la capacidad instalada (Mm ³)	2015 con 100% cobertura (Mm ³)	Escenario 1 (Mm ³)	Escenario 2 (Mm ³)	Escenario 3 (Mm ³)
Amealco de Bonfil	0.55	0.85	2.11	1.22	1.22	6.65
Colón	0.022	0.47	1.77	4.86	0.05	4.00
El Marqués	0.45	0.57	4.55	1.00	1.00	9.48
Huimilpan	0.25	0.91	1.32	0.54	0.54	2.85
Pedro Escobedo	0.22	0.47	2.38	0.49	0.49	4.66
San Juan del Río	12.46	14.76	9.49	27.44	27.44	16.59
Tequisquiapan	0.82	2.05	6.82	1.81	1.81	12.30
Región Geohidrológica	14.77	20.09	28.44	32.54	32.55	56.53
Porcentaje satisfecho de la demanda DR 023	33%	45%	64%	73%	73%	127%
Porcentaje Satisfecho demanda UdeR	5%	6%	9%	10%	10%	18%
% reducción en el déficit	11%	15%	21%	24%	24%	42%

9. Capítulo IX Evaluación del Potencial de Reúso de Agua Residual Tratada

En la Tabla 9.1 se hace mención de los principales factores que permiten agrupar los datos obtenidos en capítulos anteriores para la región de estudio en función de los principales criterios para la evaluación de un programa de reúso agrícola (Moscoso *et al*, 2002). Para concluir con el planteamiento final de este trabajo: la estrategia que se sugiere para llevar a cabo un programa de reúso de agua residual tratada en los campos agrícolas de la región.

Tabla 9.1 Principales datos para la evaluación de un programa de reúso agrícola	
Criterios	Comentarios
Disponibilidad de terreno	11 000 ha en Distrito de Riego 023 y 47 334 ha en Unidades de Riego
Demanda de agua residual	367.29 millones de metros cúbicos al año
Comercialización	La mayor parte de los cultivos son forrajeros, se venden al sector ganadero
Técnicas de manejo agronómico con ART	Oficialmente no se realiza, sin embargo agricultores obtienen agua del Río San Juan que contiene efluentes de PTARs
Productividad	Distrito de Riego 023 presenta mejores rendimientos que Unidades de Riego
Calidad del agua requerida por cultivos	Se deberá considerar que la mayor parte de los cultivos son forrajeros y cereales (maíz, avena, cebada, sorgo y alfalfa).
Tren de tratamiento en PTARs	Predomina tratamiento secundario (lodos activados)
Capacidad de PTARs	637 L/s, caudal tratado 468.5 L/s
Normatividad para el tratamiento de ART	NOM-001-SEMARNAT-1996
Normatividad para el reúso de ART en agricultura	NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997
Manejo de agua y lodo excedentes	PTAR San Pedro Ahuacatlán II → Datos de laboratorio indican manejo adecuado de agua, sin embargo manejo deficiente de lodos
Manejo de contingencias y amortiguamiento	No existen estructuras de retención
Caracterización de actores	CONAGUA, COTAS, JAPAM, Comisión Estatal de Aguas, Gerencia de Distritos de Riego, Asociaciones de Usuarios del DR 023, SAGARPA, IMTA, Gobiernos municipales (organismos operadores).
Nivel de aceptación	Varía en función del tipo de reúso, en general para reúso agrícola ronda el 80%

Fuente: Moscoso, *et al* 2002- elaboración propia

9.1 Localización de los usuarios potenciales respecto a las Plantas de Tratamiento de Agua Residual

En el capítulo V, hicimos mención sobre los usuarios principales del agua subterránea procedente del acuífero Valle de San Juan del Río y del volumen concesionado registrado para cada uno. Para la identificación de los potenciales usuarios de agua residual es relevante su localización con respecto a las PTARs, ya que de ello depende en gran medida el costo de inversión y la operación del sistema de reúso, la cual incluye tuberías, accesorios, equipo de bombeo, energía eléctrica y mantenimiento.

Del total de pozos de donde se extrae agua del acuífero, el mayor porcentaje de ellos tiene un volumen asignado menor a 250 000 metros cúbicos anuales. Los pozos con un volumen asignado mayor que 1 millón de metros cúbicos anuales (pozos indicados en color negro) se concentran en la misma zona donde se ubican los usuarios principales (ver Figura 9.1). En ella también se destaca la localización de dichos usuarios principales y sus baterías de pozos; se puede observar que la mayoría se ubica dentro del área del Distrito de Riego 023 y de la zona urbana de San Juan del Río al sur.

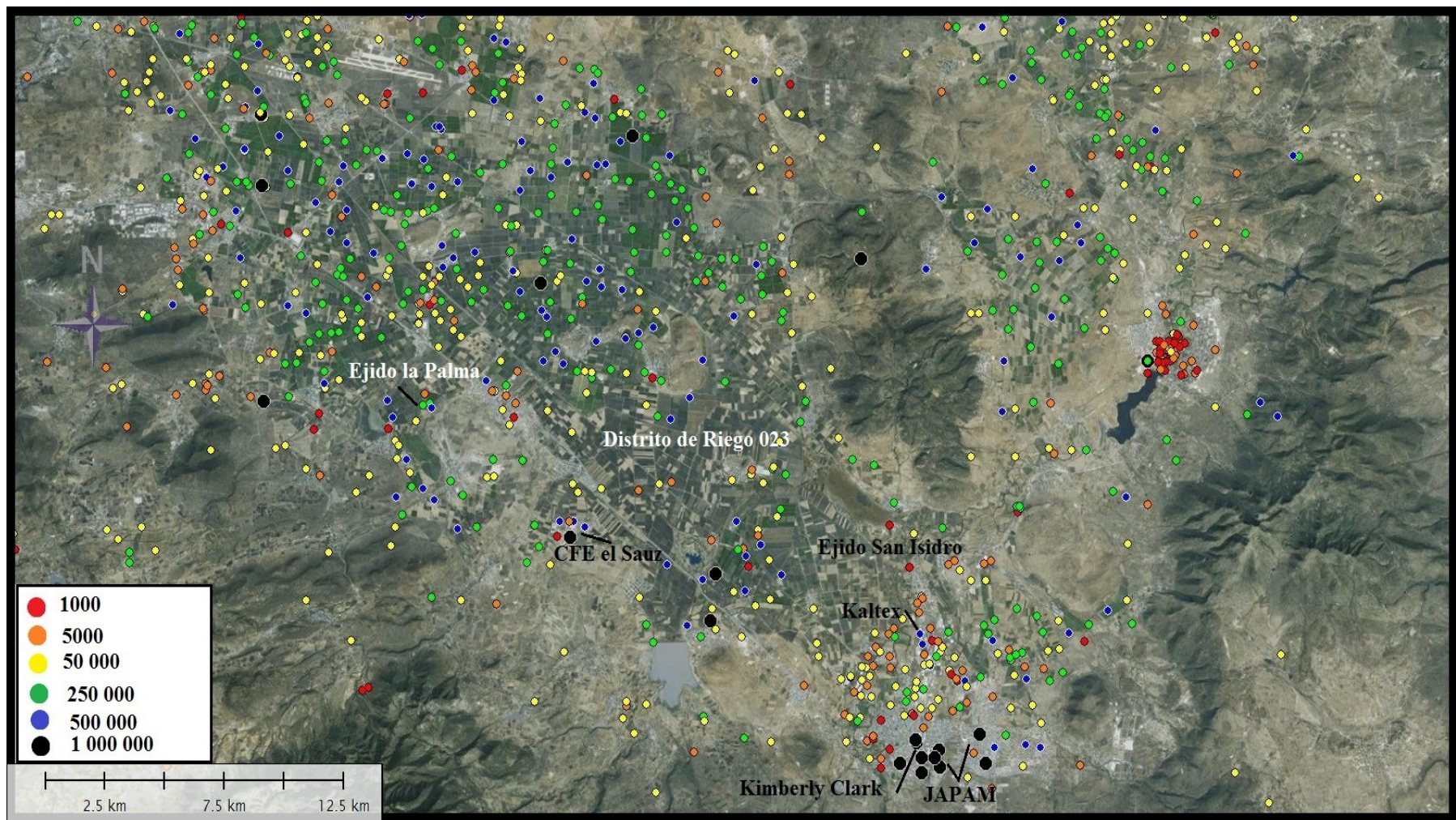


Figura 9.1 Pozos de extracción del acuífero Valle de San Juan del Río y volumen concesionado (m³)

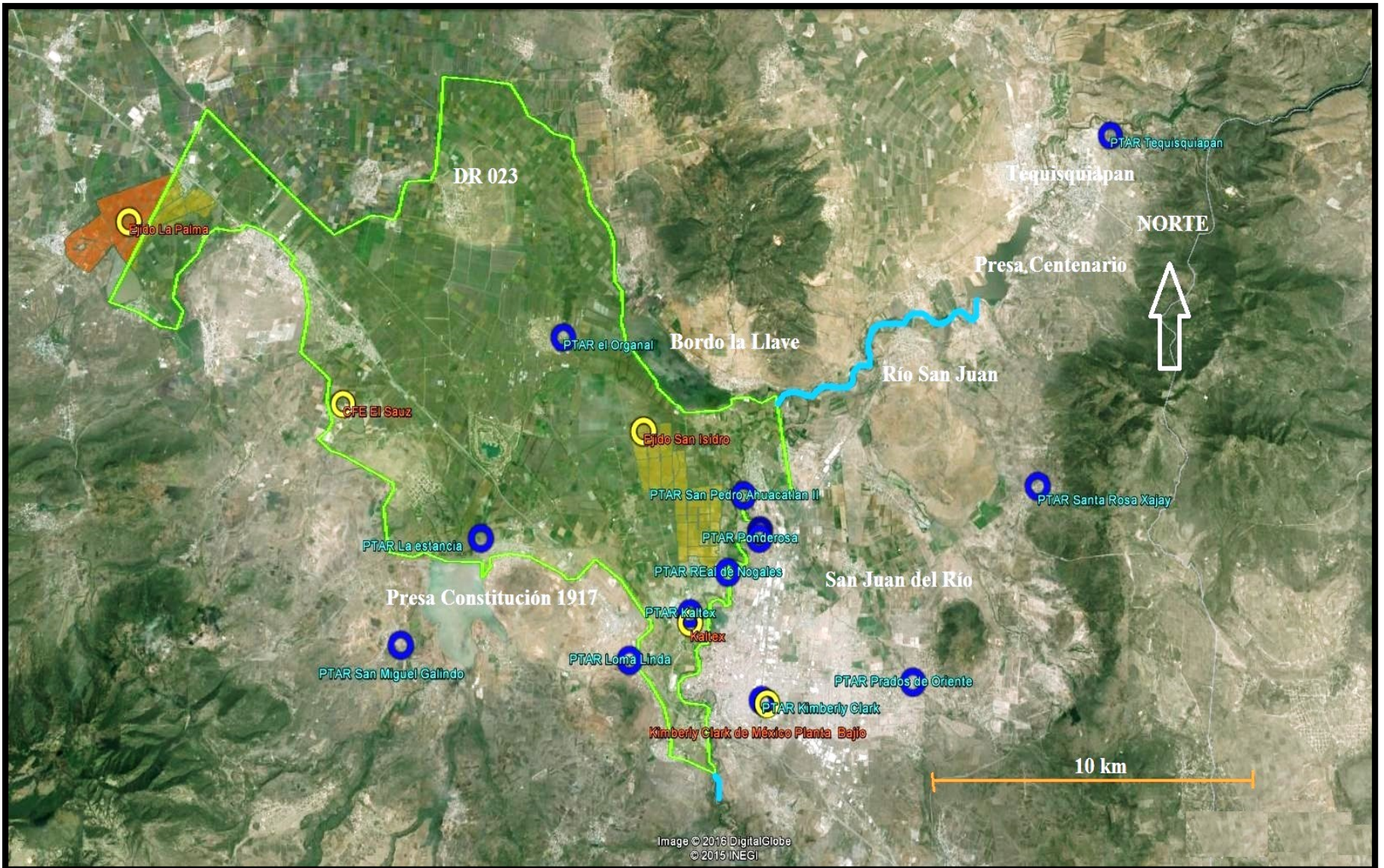


Figura 9.2 Localización de grandes usuarios y plantas de tratamiento de agua residual

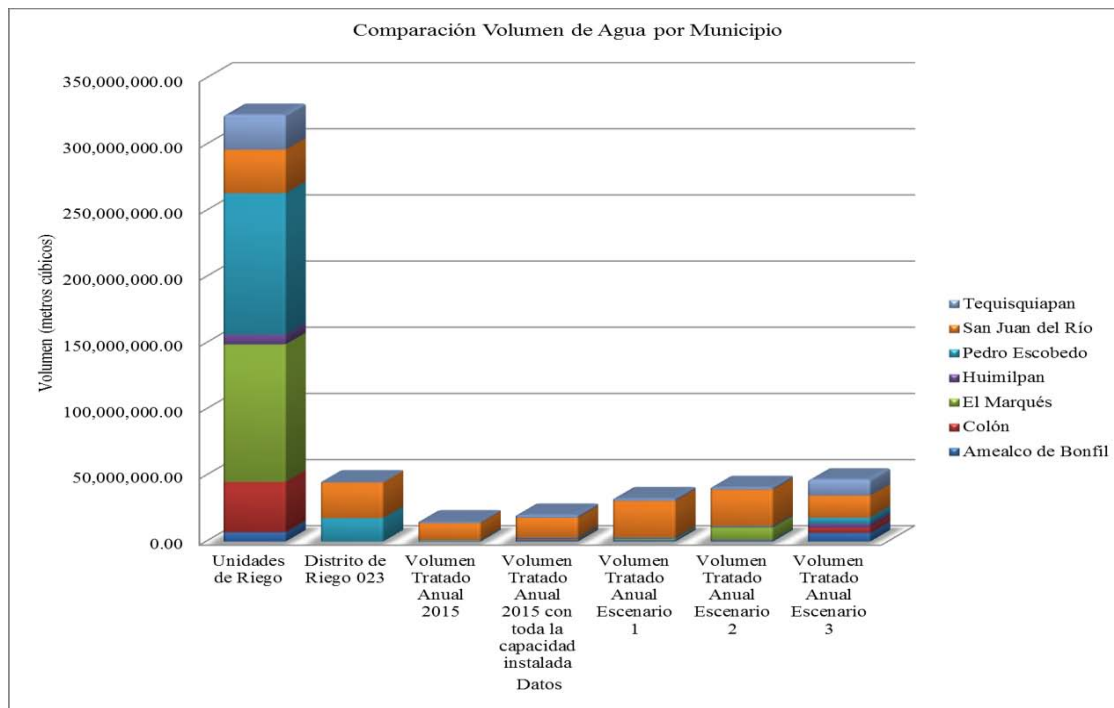


Figura 9.4 Volumen de Oferta y Demanda por municipio

Previo a la estimación particular del comportamiento demanda/oferta de esos usuarios-oferentes, es posible analizar el volumen actual de demanda – oferta de manera global, es decir, agrupando el volumen producido por todas las PTARS de la región de estudio. Para ello usamos el valor de la huella hídrica potencial ponderada (Tabla 9.2), evaluada en el capítulo VII, correspondiente a los tres escenarios definidos para el año 2015 (ver Capítulo VIII). En el caso del Distrito de Riego 023, el valor promedio obtenido fue de 5987.2 m³/ha al año. Para las unidades de riego, el valor obtenido resulta ser 6815.9 m³/ha al año, el cual como era de esperarse es mayor, debido a la menor tecnificación que existe en ellas.

En la Tabla 9.2 se observa la superficie promedio potencial que se podría irrigar en el Distrito de Riego 023 y en las Unidades de Riego con el volumen de agua residual tratada generado en 2015. Es, decir, para el escenario 2015 actual, el uso agrícola en el DR 023 de la producción de casi 15 millones de m³ agua residual tratada equivaldría a reducir en 11% el déficit del acuífero el cual corresponde a 33% de la demanda estimada de agua del DR 023 (ver Capítulo VII) o también podría ser equivalente al 5% de la estimada para Unidades de Riego. En el segundo caso, escenario 2015 con las PTARs operando al 100% de su capacidad, se podría reducir el déficit en un 15% y sustituir el 45% del abastecimiento al DR 023 o el 6% en UdeR. Para el tercer caso, cuando sea tratada toda el agua residual generada, la reducción en el déficit puede ser de 21% y satisfacer en un 64% el abastecimiento al DR 023 o 9% en UdeR.

Tabla 9.2 Superficie potencial a irrigar con el volumen de ART generado			
Escenarios	Volumen de oferta m ³	Superficie en DR 023 (ha)	Superficie en U de R (ha)
2015 Actual	14 770 000	2466.93	2166.99
2015 con 100% capacidad instalada	20 100 000	3357.16	2948.99
2015 con 100% de cobertura	28 440 000	4750.13	4172.60

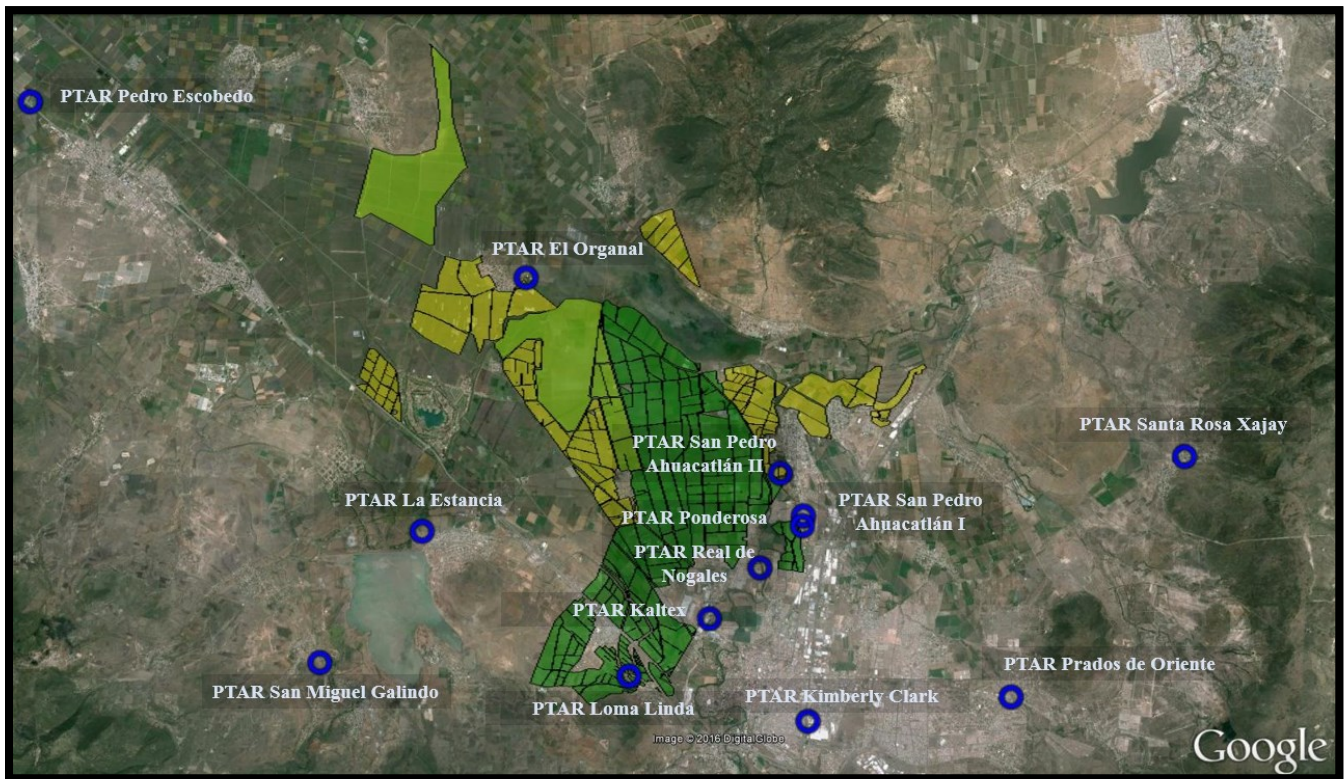


Figura 9.5 Superficie irriable aprovechando el agua residual generada en las plantas de tratamiento de la región bajo los tres escenarios actuales (2015)

Cabe destacar que estos volúmenes de agua para el reúso y su contribución a la reducción del déficit del acuífero, están vinculados al cumplimiento de las consideraciones hechas para cada escenario; de ahí que requerirían de inversiones en la construcción de infraestructura hidráulica que permitiera la captación, el tratamiento y el transporte del agua, desde cada planta hasta la zona del Distrito de Riego 023. Lo anterior resulta costoso, principalmente respecto a la conducción y bombeo de agua, ya que la distancia entre algunas plantas de tratamiento y zonas de riego puede llegar a ser considerable.

A partir de lo anterior, y considerando además, que las plantas pueden ser operadas por organismos diversos, para la estrategia de reúso de agua residual tratada en el campo, a nivel de toda la región, que se estima podría llegar a tener un impacto en la reducción del déficit del acuífero de hasta 21%, requiere del análisis potencial de cada una de las PTAR, de manera que se facilite la planeación técnica, administrativa y económica de la práctica del reúso agrícola.

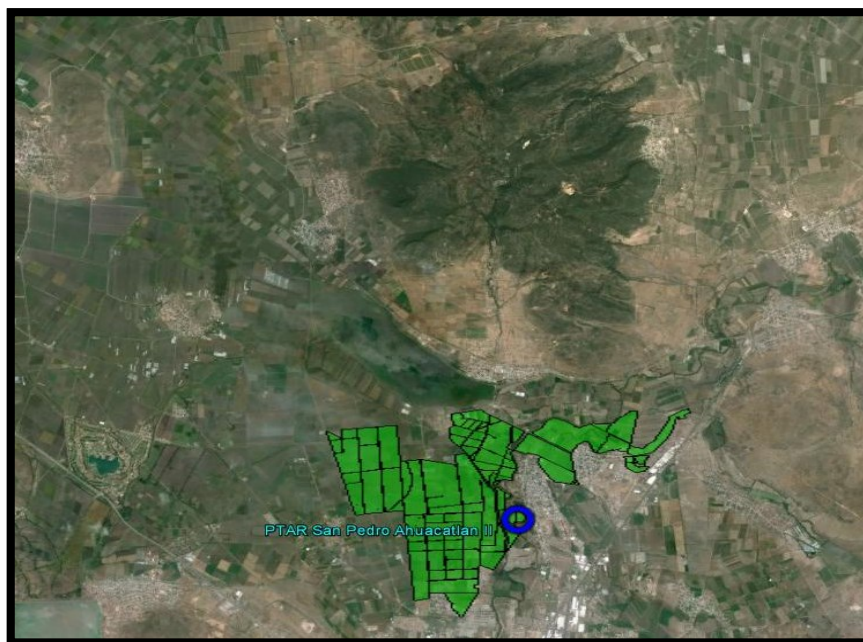
En la siguiente sección se presentan los resultados obtenidos para las 10 plantas de tratamiento principales de la región y los cinco cultivos predominantes determinados en el capítulo VI: avena, alfalfa, cebada, maíz y sorgo. Para cada caso se presentan las estimaciones de la superficie de suelo agrícola para cada uno de los cultivos que potencialmente se podrían irriar considerando los volúmenes anuales actuales de tratamiento por PTAR. Además se exponen mapas donde se muestra las zonas de riego cercanas a las plantas y si éstas corresponden al DR023 o a UdeR; en los mapas, en color verde se muestran las parcelas pertenecientes al DR 023 y en color morado las parcelas pertenecientes a unidades de riego y otras zonas de irriación. Estas estimaciones parten del supuesto de que el riego sólo cubre un ciclo de cultivo anual para el escenario 2015 actual.

9.2.1 PTAR San Pedro Ahuacatlán II

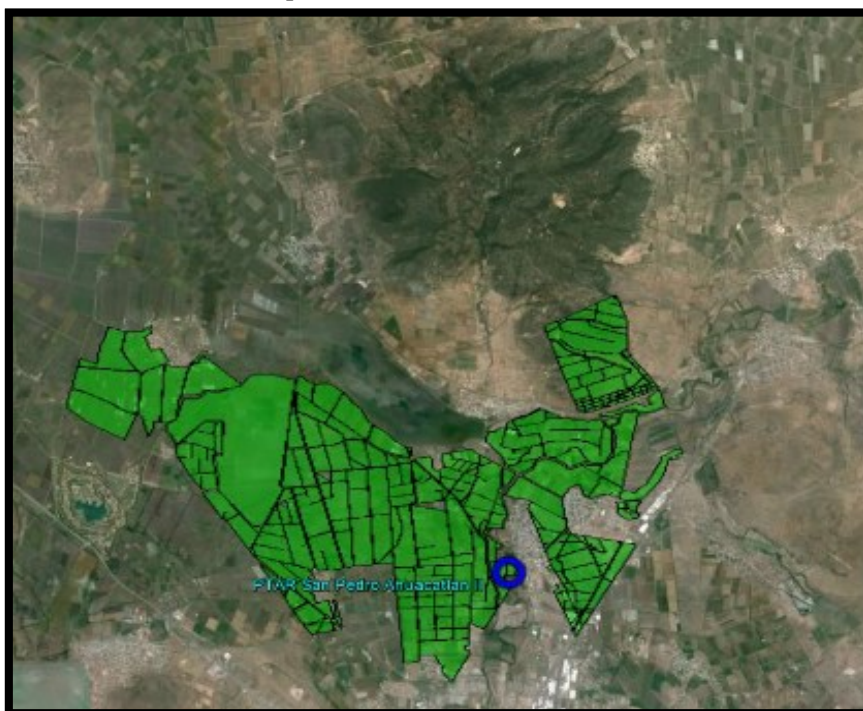
Caudal tratado = 280 L/s

Volumen anual tratado promedio 2014 = 8 830 080 m³

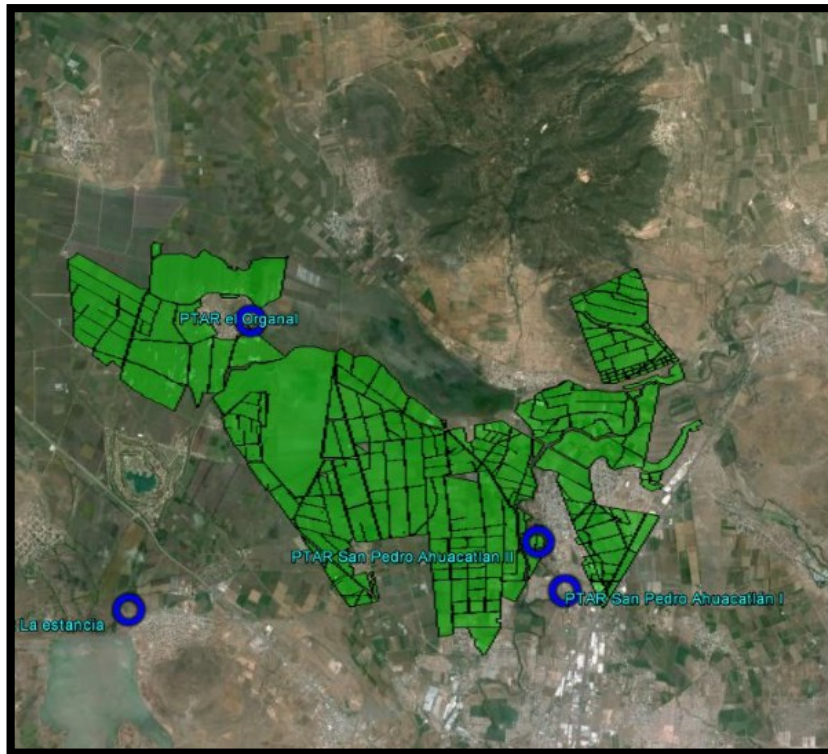
Tabla 9.3 Superficie irrigable con efluente tratado PTAR San Pedro Ahuacatlán II					
Cultivo	Alfalfa	Avena	Cebada	Maíz	Sorgo
Volumen Total m ³	9 187 965.4	9 062 891.3	8 570 196.4	8 357 079.7	8 882 558.5
Área Total ha	4218.1	1151.9	3682.2	9727.6	6576.2



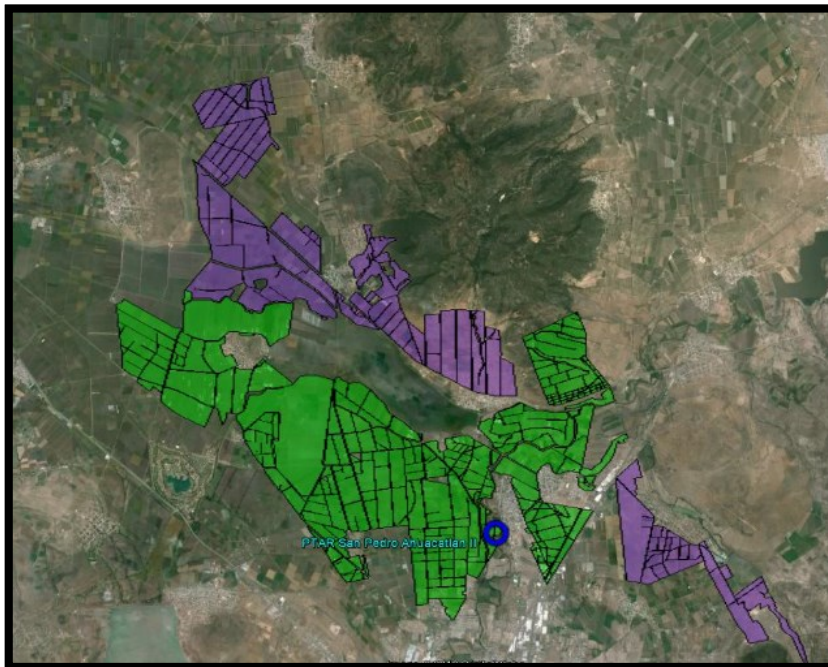
Avena – Área irrigable 151.9 ha – Huella hídrica 7868.1 m³/ha
 Volumen requerido 9.06 millones de metros cúbicos



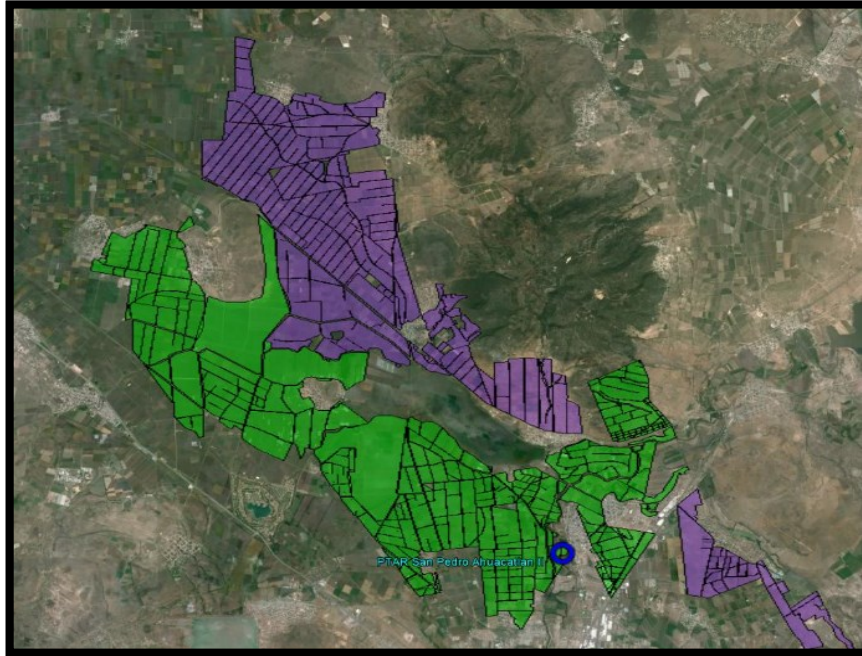
Cebada - Área irrigable 3682.2 ha – Huella hídrica 2327.4 m³/ha
 Volumen requerido 8.57 millones de metros cúbicos



Alfalfa - Área irrigable 4218.1 ha – Huella hídrica 2178.1 m³/ha
 Volumen requerido 9.19 millones de metros cúbicos



Sorgo - Área irrigable 6576.2 ha – Huella hídrica 1049.9 – 1888.9 m³/ha
 Volumen requerido 8.88 millones de metros cúbicos



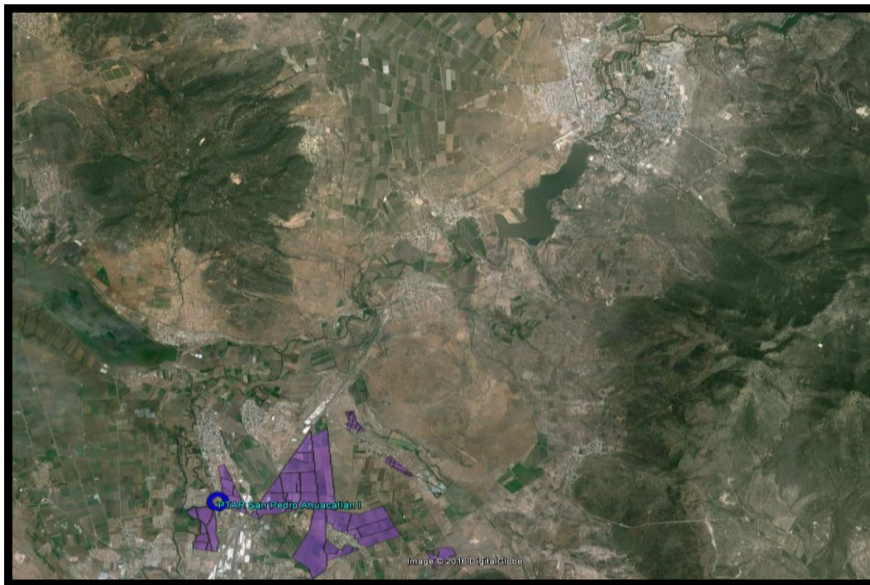
Maíz - Área irrigable 9727.6 ha – Huella hídrica 718.6 – 1051.0 m³/ha
 Volumen requerido 8.36 millones de metros cúbicos
Figura 9.6 PTAR San Pedro Ahuacatlán II

9.2.2 PTAR San Pedro Ahuacatlán I

Caudal Tratado = 97 L/s

Volumen anual tratado 3 058 992 millones de metros cúbicos

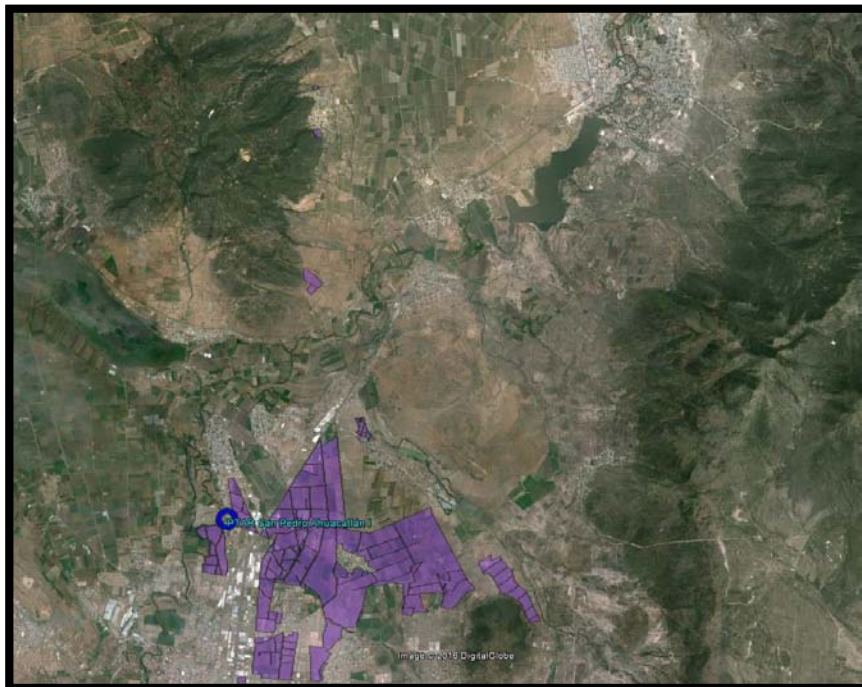
Tabla 9.4 Superficie irrigable con efluente tratado PTAR San Pedro Ahuacatlán I					
Cultivo	Alfalfa	Avena	Cebada	Maíz	Sorgo
Vol. Total m ³	3,060,785.8	3,071,386.7	3,053,925.6	3,052,577.7	3,004,925.0
Área Total ha	1,425.4	630.3	1,375.7	2,904.5	1,590.9



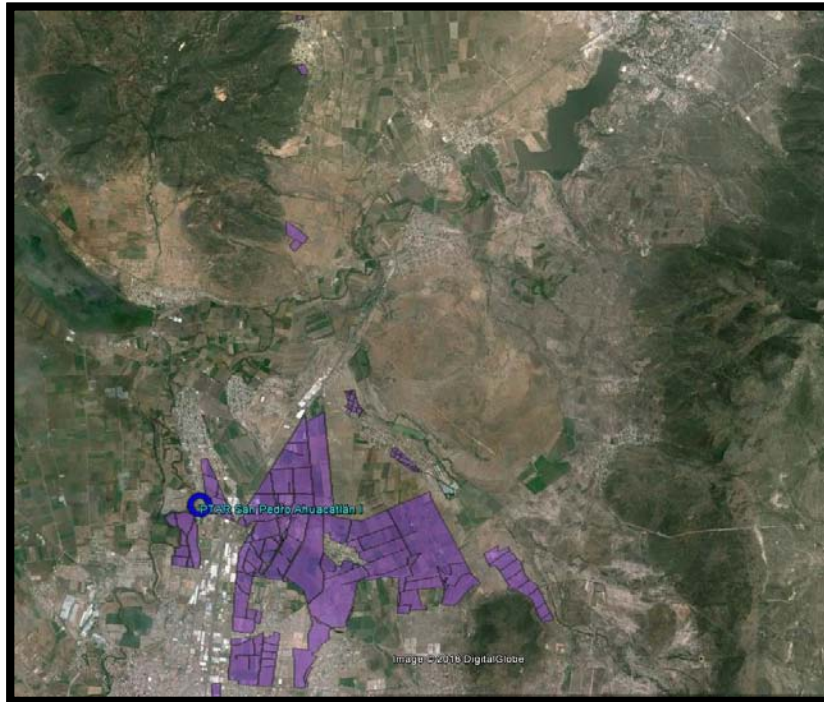
Avena – Área irrigable 630.27 ha – Huella hídrica 4873.1 m³/ha
 Volumen requerido 3.07 millones de metros cúbicos



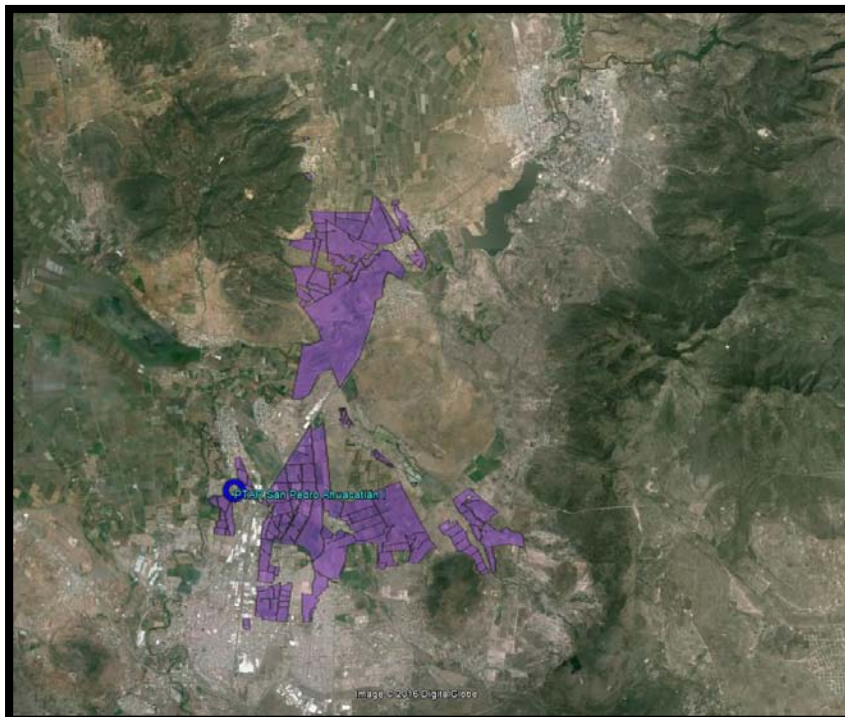
Cebada - Área irrigable 1375.70 ha – Huella hídrica 2219.9 m³/ha
Volumen requerido 3.05 millones de metros cúbicos



Alfalfa - Área irrigable 1425.4 ha – Huella hídrica 2147.3 m³/ha
Volumen requerido 3.06 millones de metros cúbicos



Sorgo - Área irrigable 1590.9 ha – Huella hídrica 1888.9 m³/ha
 Volumen requerido 3.00 millones de metros cúbicos



Maíz - Área irrigable 2904.51 ha – Huella hídrica 1051.0 m³/ha
 Volumen requerido 3.05 millones de metros cúbicos

Figura 9.7 PTAR San Pedro Ahuacatlán I

9.2.3 PTAR Tequisquiapan

Caudal tratado = 22 L/s

Volumen anual tratado = 693 732 metros cúbicos

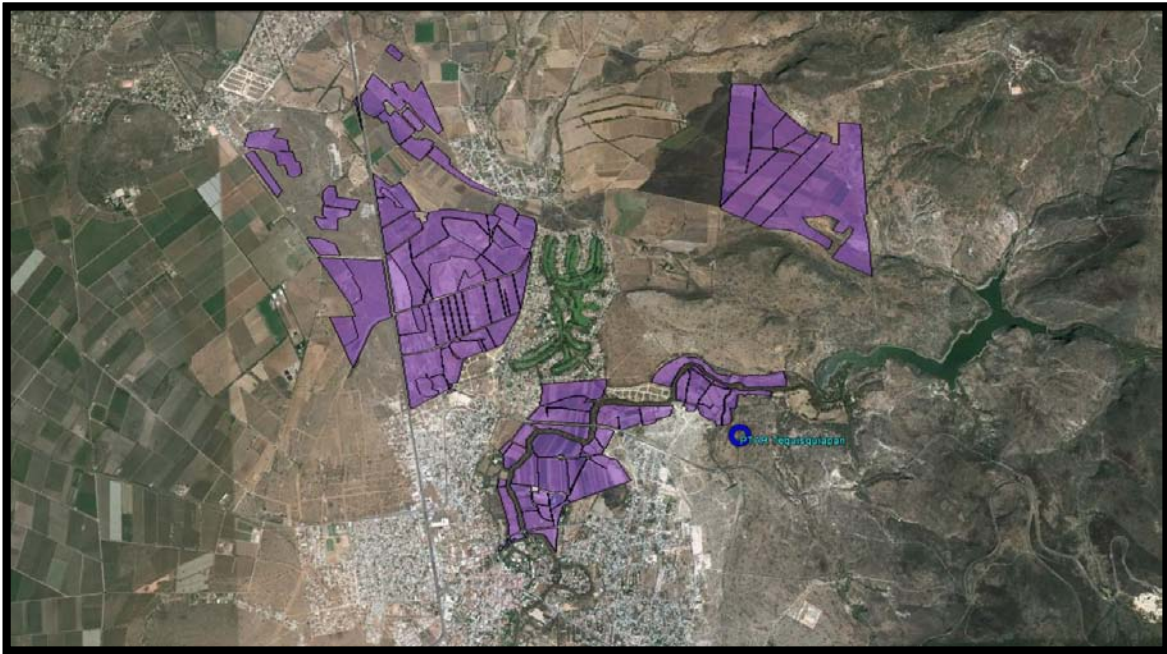


Figura 9.8 PTAR Tequisquiapan

Tabla 9.5 Superficie irrigable con efluente tratado PTAR Tequisquiapan

Cultivo	Alfalfa	Avena	Cebada	Maíz	Sorgo
Volumen Total m ³	698,279.9	707671.3	694163.7	687591.2	669752.9
Área Total ha	325.2	145.2	312.7	654.2	354.6

9.2.4 PTAR Amealco

Caudal tratado = 14.6 L/s

Volumen anual tratado = 460 425.6 metros cúbicos

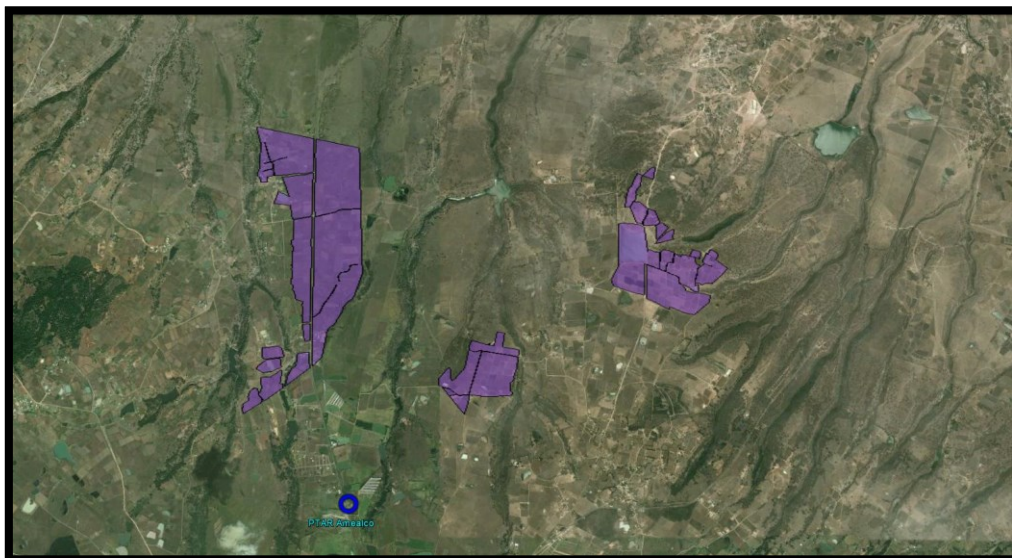


Figura 9.9 PTAR Amealco

Tabla 9.6 Superficie irrigable con efluente tratado PTAR Amealco					
Cultivo	Alfalfa	Avena	Cebada	Maíz	Sorgo
Volumen Total	473,674.8	425,352.2	489,696.6	471,410.0	416,668.9
Área Total	220.6	87.3	220.6	448.5	220.6

9.2.5 PTAR Saldarriaga – PTAR Pedro Escobedo – PTAR Huimilpan – PTAR La Estancia – PTAR la Fuente

Tabla 9.7 Superficie irrigable con efluente tratado						
Superficie (ha)	Alfalfa	Avena	Cebada	Maíz	Sorgo	
PTAR Saldarriaga - Caudal Tratado = 11.5 L/s - Volumen Tratado = 362 664.0 m ³						
Volumen Total	NA	336,882.2	302,548.7	348,277.0	384,539.7	402,730.4
Área Total	848.9	156.9	62.1	156.9	365.9	213.2
PTAR Pedro Escobedo - Caudal Tratado = 7.1 L/s – Volumen Tratado = 223 906 m ³						
Volumen Total	NA	243,842.6	206,367.6	199,517.5	177,534.3	231,851.6
Área Total	247.0	112.0	26.2	85.7	247.1	220.8
PTAR La Estancia – Caudal Tratado = 6 L/s – Volumen Tratado = 189 216 m ³						
Volumen Total	NA	210,862.4	761,713.4	225,321.1	227,741.5	231,103.8
Área Total	316.93	96.8	96.8	96.8	316.9	220.1
PTAR La Fuente – Caudal Tratado 4 L/s – Volumen Tratado 126 144 m ³						
Volumen Total	NA	187,478.2	425,472.2	193,819.5	91,761.1	164,915.5
Área Total	87.3	87.31	87.31	87.31	87.31	87.31
PTAR Huimilpan – Caudal Tratado 3.2 L/s – Volumen Tratado = 100 915.2 m ³						
Volumen Total	NA	159,319.6	361,567.7	164,708.5	77,978.9	140,145.8
Área Total	848.9	74.2	74.2	74.2	74.2	74.2

9.2.6 Propuesta para el potencial de reúso actual

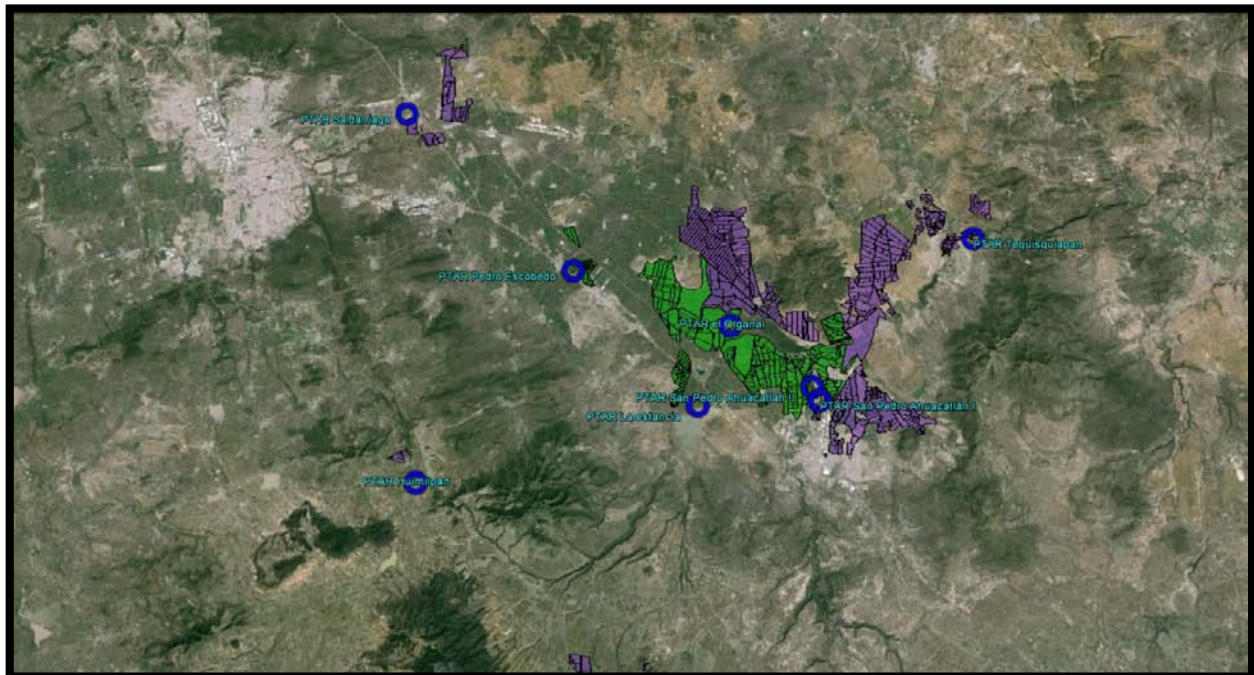


Figura 9.10 Superficie total a irrigar

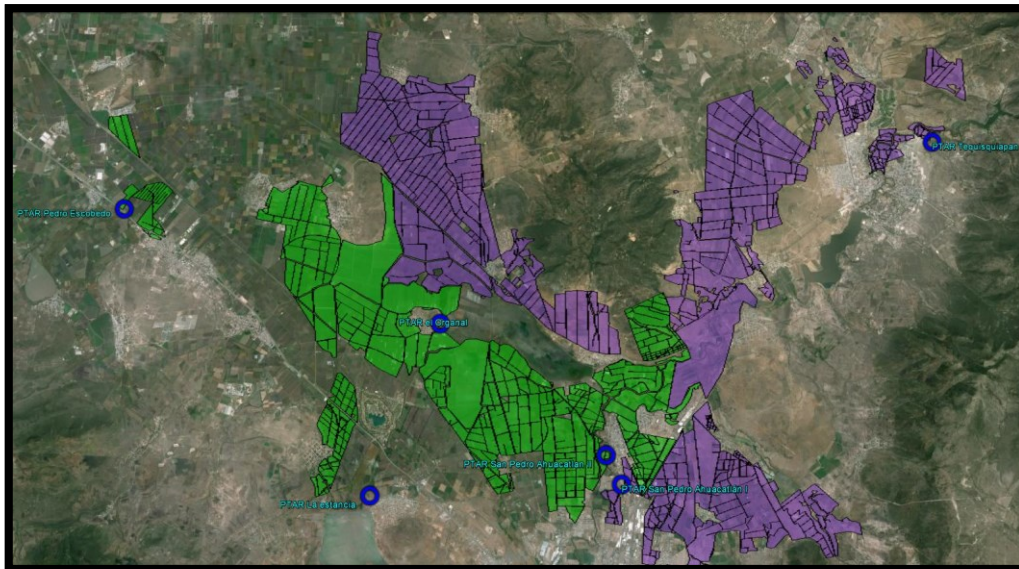


Figura 9.11 Núcleos agrarios irrigables en la zona del DR 023

En los dos mapas anteriores se ilustra la síntesis del análisis realizado en esta sección, donde la práctica viable que se estima para el reúso del agua residual tratada se concentra en el DR023. Notar que la superficies a irrigar con el volumen producido por las PTAR Saldarriaga, Pedro Escobedo, Huimilpan, y Amealco son muy inferiores en comparación con las localizadas en el DR 023, además de que poseen una localización dispersa. Por lo que al observar el volumen tratado por planta y por su localización, podemos concluir que el reúso de manera inmediata se podría realizar en las plantas San Pedro Ahuacatlán I y II con un volumen de 11.83 millones de metros cúbicos anuales, que representan el 80% del volumen tratado actual y que también es equivalente a una reducción de 8.85% del déficit. Otra opción, sería incluir el volumen tratado de las PTAR la Estancia y Tequisquiapan, aumentando el potencial de reúso actual a 12.71 Mm³, lo que representa el 86% del volumen tratado actual y es equivalente a 9.5% del déficit.

9.3 Volumen potencial de reúso – Escenarios futuros

En la Tabla 9.8 se observa la superficie promedio potencial que se podría irrigar en el Distrito de Riego 023 y en las Unidades de Riego con el volumen de agua residual tratada generado en 2030, bajo los tres escenarios definidos para ese año en el capítulo VIII. Para el escenario 1 y 2 en 2030 (100% cobertura abastecimiento y alcantarillado), el uso agrícola en el DR 023 de la producción de casi 32.55 millones de m³ agua residual tratada equivaldría a reducir en 24% el déficit del acuífero el cual corresponde a 73% de la demanda estimada de agua del DR 023 (ver Capítulo VII) o también podría ser equivalente al 10% de la estimada para Unidades de Riego. Para el tercer caso, cuando sea tratada toda el agua residual generada en 2030, la reducción en el déficit puede ser de 42% y satisfacer en un 127% el abastecimiento al DR 023 o 18% en UdeR.

Tabla 9.8 Superficie potencial a irrigar con el volumen de ART generado			
Escenarios	Volumen de oferta m³	Superficie en DR 023 (ha)	Superficie en U de R (ha)
2015 Actual	14 770 000	2466.93	2166.99
2015 con 100% capacidad instalada	20 100 000	3357.16	2948.99
2015 con 100% de cobertura	28 440 000	4750.13	4172.60
Escenario 1 y 2 2030	32 550 000	5436.60	4775.60
Escenario 3 2030	56 530 000	9441.81	8293.84

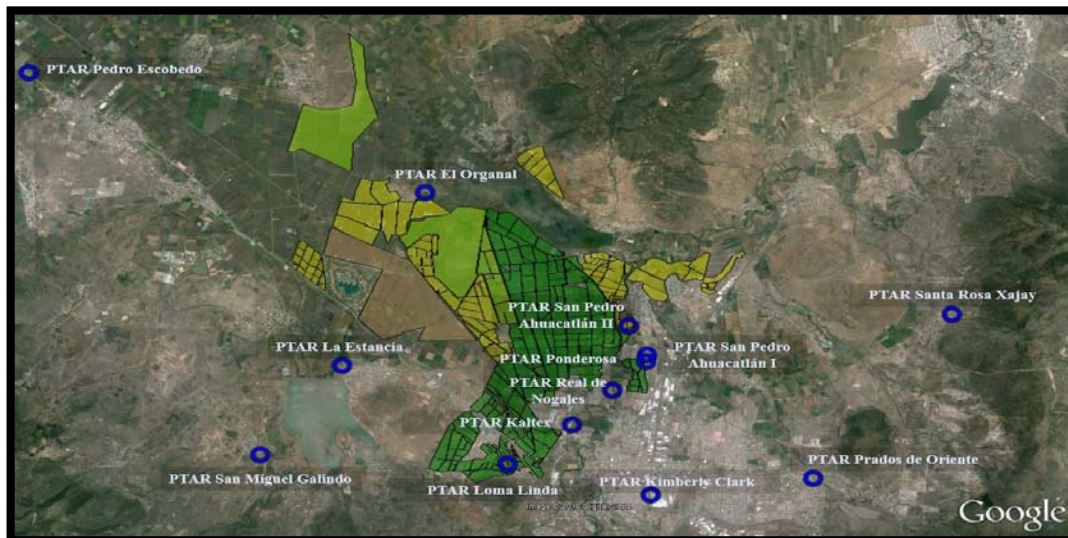
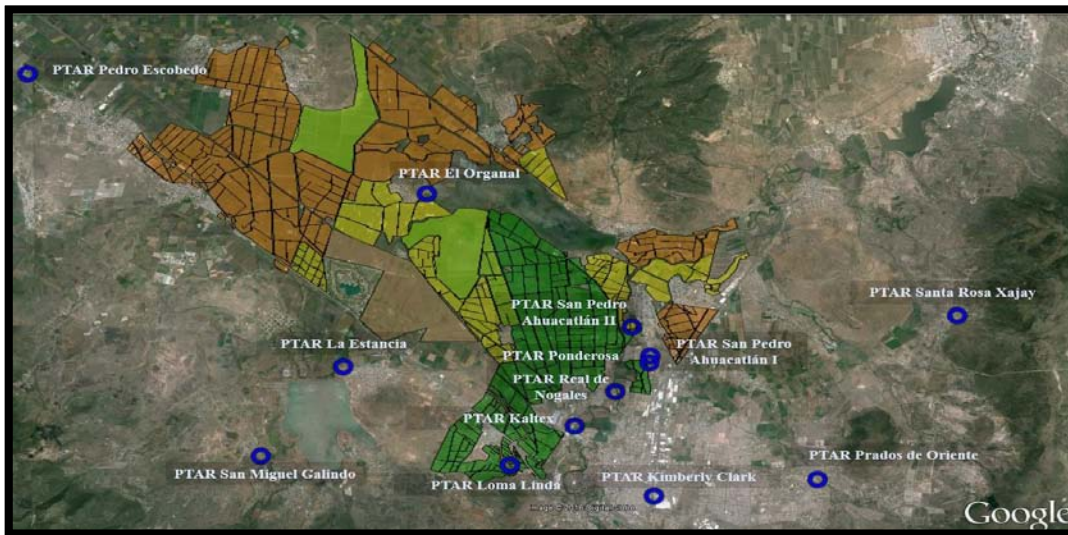
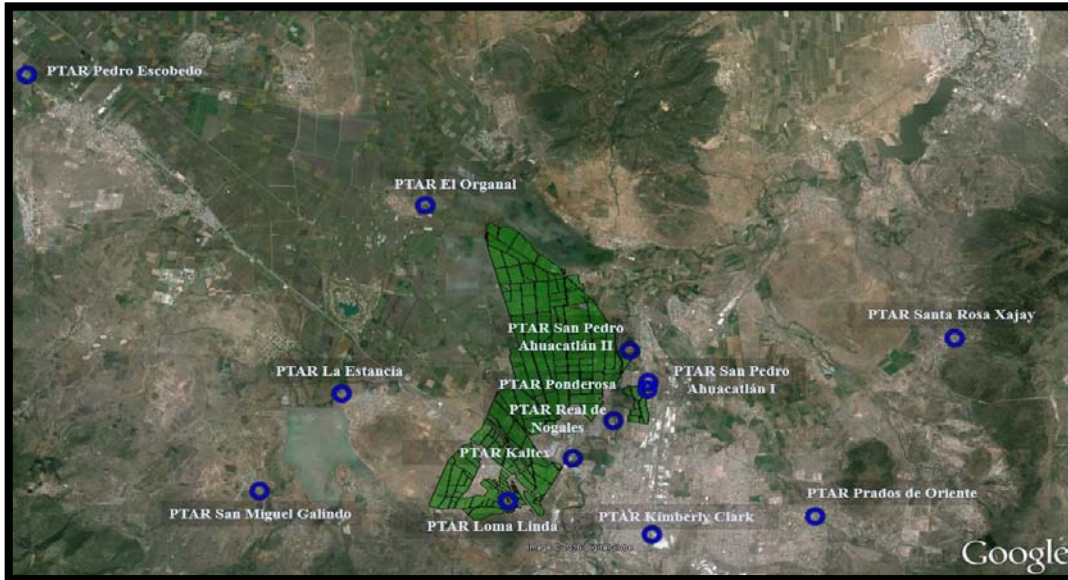


Figura 9.12 a-b-c

En la Figura 9.12a se puede observar la superficie potencial actual (2015) que se podría sembrar con el agua residual tratada en la región para el Distrito de Riego 023, mientras que en la Figura 9.12b se representa la superficie potencial bajo los escenarios 1 y 2 para 2030. La mayor diferencia ocurre al comparar el escenario actual contra el escenario 3, donde la superficie aumenta 400% aproximadamente en función al volumen disponible cubriendo una superficie mayor a la que se irriga actualmente en el DR 023(Figura 9.12c).

9.4 Consideraciones técnicas para su aplicación

Infraestructura existente - futura

La cobertura actual de tratamiento en cada municipio de la región es desigual. Existen municipios con una cobertura actual menor al 10% y por otro lado el municipio de San Juan del Río posee una capacidad instalada mayor que la generación de agua residual municipal (131%). Lo anterior implica que el alcantarillado municipal recibe descargas industriales, hecho confirmado con la visita realizada a la PTAR San Pedro Ahuacatlán II.

Respecto a las inversiones necesarias para que las plantas operen a su capacidad instalada, los municipios de San Juan de Río y Tequisquiapan son los que poseen el mayor caudal fuera de operación (Tabla 9.9). Mientras que las inversiones requeridas para lograr un 100% de cobertura para el escenario actual 2015, se concentran en los municipios de El Marqués y Tequisquiapan, donde se necesita aumentar la capacidad instalada en 126.2 L/s y 151.4 L/s respectivamente.

Es importante destacar que en San Juan del Río, la capacidad instalada actual es superior a la requerida para lograr 100% de cobertura, por lo que es conveniente evaluar la posibilidad de que el agua residual de otras localidades pueda ser conducida a las plantas de ese municipio para recibir tratamiento, además de que se debe evitar el ingreso de agua residual de tipo industrial al sistema.

Para 2030, los municipios que requerirán mayores inversiones para lograr la cobertura al 100% son de nueva cuenta El Marqués y Tequisquiapan, con 283 y 325 L/s respectivamente; mientras que a nivel regional se deberán invertir recursos para aumentar la capacidad instalada en 1155 L/s en total.

El Distrito de Riego 023 cuenta con una red principal de conducción de agua desde la presa Constitución de 1917 y de pozos; una red secundaria e interparcelaria para distribución de agua, así como una red de drenaje, la cual es vital para evitar problemas de salinidad del suelo. Entonces, se deberán evaluar las redes de distribución y conducción actuales, para analizar si tienen la capacidad de manejar el agua residual tratada y el agua de primer uso. En la Figura 9.13 se observa una imagen satelital del DR 023 donde se muestra en color azul la red principal de distribución, en amarillo la red interparcelaria y en naranja la red de drenaje que fluye al bordo la Llave.

Tabla 9.9 Capacidad Instalada y Faltante para cubrir el 100% de cobertura en 2015 y 2030 por municipio (L/s)

Municipio	2015						2030	
	Caudal Tratado Actual	Cobertura Estimada Tratamiento	Instalada 2015	Instalada en 2015 fuera de operación	Instalada 100% de cobertura	Faltante respecto a la actual	Instalada 100% cobertura	Faltante respecto a la actual
Amealco	17.5	26 %	27.0	9.5	67.1	40.1	210.9	183.9
Colón	0.7	1 %	15.0	14.3	56.0	41.0	126.9	111.9
El Marqués	14.4	10 %	18.0	3.6	144.2	126.2	300.6	282.6
Huimilpan	7.8	19%	29.0	21.2	41.9	12.9	90.3	61.3
Pedro Escobedo	7.1	9%	15.0	7.9	75.3	60.3	147.6	132.6
SJDR	395.0	131%	468.0	73.0	300.8	-	526.0	58.0
Tequisquiapan	26.0	12%	65.0	39.0	216.4	151.4	390.2	325.2
Región	468.5	52%	637.0	168.5	901.8	431.9	1792.4	1155.4

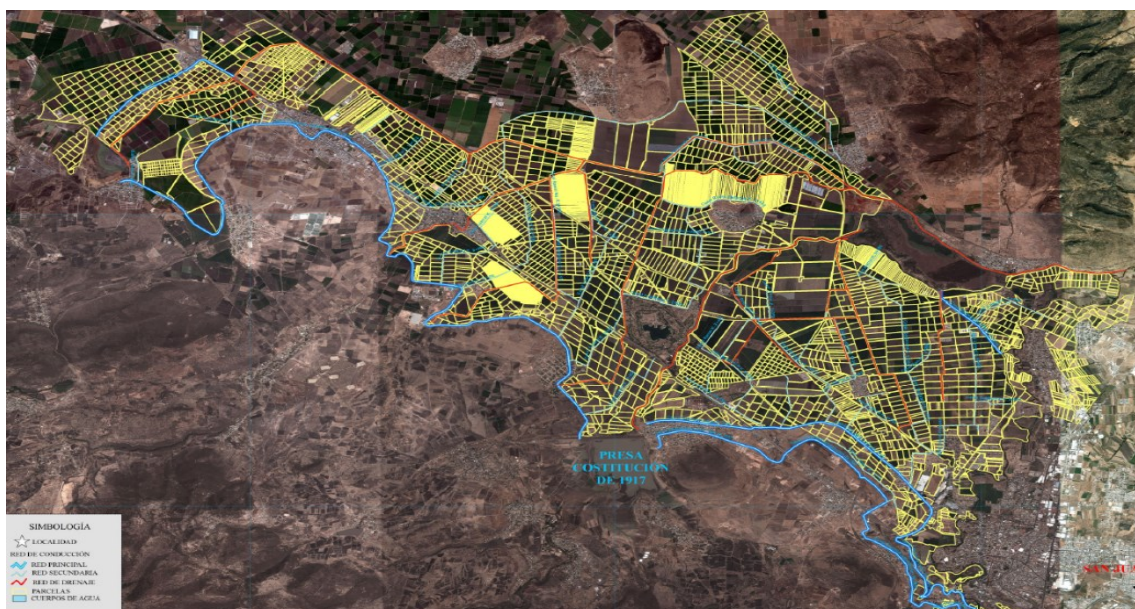


Figura 9.13 Red de canales y red de drenaje del DR 023 (Fuente CONAGUA)

Calidad del agua

Un menor costo en el tratamiento de agua residual se verá reflejado en aquellas plantas de tratamiento que actualmente remueven nutrientes como nitrógeno y fósforo. Por ejemplo, la PTAR San Pedro Ahuacatlán II realiza un proceso de lodos activados aireación extendida para lograr la desnitrificación del efluente, proceso que es el más adecuado para el reúso de agua residual tratada.

En la región de estudio, algunas PTAR reciben descargas industriales, por lo que el proceso de tratamiento puede ser insuficiente y el reúso puede resultar inadecuado para el suelo, agua, cultivos y para el ser humano, tal es el caso de la PTAR San Pedro Ahuacatlán II, que fue diseñada con un proceso aerobio para el tratamiento de agua residual de tipo municipal pero que recibe efluentes industriales. Sin duda, para la aplicación de un programa de reúso agrícola, será necesario revisar el funcionamiento de las plantas de tratamiento de la región y realizar las adaptaciones pertinentes para que generen agua tratada con la calidad que deberá cumplir las exigencias del tipo de cultivo y tipo de riego actuales.

Tipo de cultivo

Este trabajo se enfocó a los cultivos más importantes de la región: maíz, alfalfa, avena y cebada. El maíz representa el 13.5% del consumo de agua en el DR 023 y la alfalfa representa el 15.5%. Con base en la estimación de la demanda realizada en esta investigación a partir del cálculo de la huella hídrica, ésta deberá de verificarse con respecto a las exigencias reales de agua de estos cultivos y analizar si la calidad del agua actual producida en las PTAR es la adecuada. El reúso agrícola puede implicar un mayor rendimiento por hectárea y un aumento en el número de ciclos agrícolas. Además habría que explorar la posibilidad de analizar el cambio de cultivos por otros que permitan aumentar los ingresos en función del precio por tonelada en el mercado. (Anexo 5).

Volumen de Riego

Considerando los cultivos más importantes y los valores de huella hídrica que la bibliografía sugiere, es necesario verificar que el volumen de riego estimado cubre los siguientes tres aspectos importantes para establecer el alcance de ésta práctica:

- a) **Volumen de agua a utilizar:** Más del 90% del agua que absorbe una planta se pierde por evapotranspiración, la cual se determina por el tipo de cultivo y el clima de la región. (FAO, 2004). Aunque en este trabajo se utilizaron valores de huella hídrica para dicha estimación, es necesario considerar que el volumen utilizado se debe ajustar considerando la lámina de precipitación y el riego en exceso para eliminación de sales.
- b) **Esquema de riego:** Se debe realizar un balance hídrico entre la cantidad de agua requerida por el cultivo en un período de tiempo dado (usualmente semanal o mensual) y las pérdidas de agua, para así obtener la lámina real que se deberá aplicar. Lo anterior obedece a diversos factores como la capacidad de retención de agua del suelo, profundidad de raíces, evapotranspiración, lámina aplicada por riego, tipo de riego y condiciones de drenaje de la zona. (FAO, 2004).
- c) **Lavado de suelo:** En el caso de algunas PTARs de la región y pozos de la región, por ejemplo San Pedro Ahuacatlán II, los valores de conductividad eléctrica en el agua son muy elevados, por lo que es previsible que ocurra una importante acumulación de sales en el suelo como resultado de la evaporación del agua de riego. Para evitar lo anterior se realizan riegos en exceso, para que el agua percole y remueve las sales que se han acumulado, siendo necesario considerar una lámina de riego adicional a la estimada por evapotranspiración.

Tipo de Riego

En el uso de agua residual tratada se debe considerar la salinidad, el posible riesgo a la salud de los trabajadores y consumidores, así como los daños potenciales que el agua podría causar a los cultivos y al ambiente, además de las consideraciones que se deben tomar con el uso de agua de primer uso como el volumen de riego, clima, tipo de suelo, tipo de cultivo, costo del sistema de riego (bombeo, energía, insumos, mantenimiento) y conocimiento por parte de los usuarios de la operación del sistema (FAO, 2004).

El riego por inundación es el más utilizado en la región, sin embargo es el que demanda una mayor cantidad de agua. Cuando se irriga con agua de primer uso, el cambio en el tipo de riego depende de la capacidad de inversión para instalarlo, mientras que si se trata de agua residual tratada.

Agroquímicos

En el capítulo II se han descrito los beneficios del agua residual tratada respecto al contenido de nutrientes que posee (principalmente nitrógeno y fósforo), pudiendo sustituir el uso de fertilizantes químicos. Es recomendable estudiar la posibilidad de aprovechar el lodo residual generado y debidamente tratado en las zonas agrícolas, ya que también aporta nutrientes. Esta sustitución contribuirá a atenuar los impactos ambientales relacionados con el uso excesivo de agroquímicos, como los procesos de eutrofización tal y como ocurre en el Bordo la Llave el cual recibe los excedentes de riego del DR 023 (Figura 9.14)



Figura 9.14 Bordo la Llave ubicado al norte de San Juan del Río

9.5.1 Prefactibilidad

En la siguiente Tabla (9.11) se muestran algunos criterios para evaluar la factibilidad económica del reúso agrícola; en color azul se identifican los criterios positivos y en color naranja los criterios que se identifican como negativos para el caso de la región en estudio.

Tabla 9.10 Criterios básicos de prefactibilidad	
Criterio	Observaciones
¿Existe infraestructura de riego en la zona?	Distrito de Riego 023
¿Existe una organización que represente a los agricultores?	Si, la Asociación de Usuarios del Módulo I, II y III del Distrito de Riego 023
¿Se han desarrollado proyectos de reúso similares y exitosos en la región?	No, el más cercano es San Luis Potosí
¿Existe competencia por el agua para otro uso?	Sí, urbano e industrial, por lo que el proyecto de reúso liberará agua para uso urbano
¿El área agrícola se encuentra a menos de 20km del área urbana?	Sí, de hecho las principales PTAR de la región se localizan en el DR 023
¿Es competitivo el precio del agua tratada que se ofrecerá a los agricultores comparado con el agua de primer uso?	Aunque el agua tratada contenga nutrientes, difícilmente se podrá vender a un precio superior al del agua de primer uso. Se tiene que conseguir un precio inferior.
¿Riego restringido?	La mayoría de cultivos son forrajeros por lo que el tratamiento de agua será más económico
¿Existe exportación de productos agrícolas al extranjero?	Si es así, el uso de ART puede afectar las ventas de productos agrícolas
¿Existe escasez de agua en la zona?	Sí, se pierden 133 millones de metros cúbicos al año en el acuífero
¿Es el flujo de agua residual una parte importante (>25%) del flujo agrícola demandado?	Para el DR 023 representa cerca de una tercera parte de la demanda
¿Existen diferencias estacionales en la cantidad de agua de primer uso disponible?	En el caso de agua superficial si existen, para agua subterránea se observan tendencias anuales
¿El efluente municipal está exento de contaminación industrial?	No, existen descargas importantes por parte de industrias que afectan el tren de tratamiento de las PTAR de la región
¿Existe infraestructura para riego con agua superficial?	Sí, el DR 023 cuenta con red de distribución e interparcelaria, así como red de drenaje.
¿El paro de la PTAR provoca descargas de agua residual en el ambiente?	Al menos en el caso de PTAR San Pedro Ahuacatlán I y II, si ocurre
¿La temporada de estiaje es larga o se presentan años de sequía que provocan problemas de suministro?	Si, dura 7 a 8 meses y ha habido graves sequías como la registrada en 2011
¿Se ubica la PTAR cerca del reúso? (< 5km)	Sí
¿Existen desniveles entre la PTAR y el sitio de riego?	No, la diferencia de cotas es muy pequeña (terreno plano)
¿Los usuarios requieren todos de una calidad uniforme?	En vista de que los cultivos forrajeros abarcan el mayor porcentaje de la demanda, se podría utilizar el agua de reúso para irrigar dichos cultivos que en efecto requieren una calidad de agua uniforme.
¿Está definido el tipo de suelo en la zona agrícola?	Sí, el DR 023 se encuentra delimitado
¿Existe algún cuerpo receptor donde se podría conducir agua residual tratada excedente?	Sí, Bordo la Llave
Total Positivo	15/20 = 75%
Total Deficiente	5/20 = 25%

Fuente Barrios, 2004 – elaboración propia

Del análisis de la Tabla 9.11 podemos concluir que la región de estudio cumple con la mayoría de criterios para la aplicación de un programa de reúso agrícola, principalmente: volumen disponible, zonas de riego y problemas de escasez de agua. Sin embargo, se deberá hacer hincapié en los criterios que han recibido calificación deficiente:

- a) La experiencia existente en la región es poca
- b) Falta de infraestructura para el manejo, almacenamiento y regulación del caudal de agua residual (previo a las plantas y para efluentes).
- c) Problemas relacionados con descargas industriales en alcantarillado municipal.

Y finalmente, el precio del agua residual tratada puede ser menos competitivo que el precio del agua de primer uso (superficial o subterránea), por lo que para hacer rentable este tipo de proyectos, se deben buscar cultivos cuya comercialización implique mayores ganancias (mayor precio por tonelada). Por ello, hemos realizado un cálculo breve para observar el comportamiento del costo del agua y del precio de venta de los principales cultivos de la región bajo las tres opciones de abastecimiento mencionadas: reúso agrícola, agua subterránea, agua superficial (Anexo 5).

9.6 Consideraciones finales

En este texto, hemos tratado de mostrar un panorama general del reúso agrícola como una medida que puede ayudar a reducir el déficit en acuíferos y a liberar agua de primer uso para el abastecimiento público, sin olvidar también los beneficios *per se* para el sector agrícola. Sin embargo, para la aplicación de un programa de esta naturaleza en una región específica donde ya se mostró que existe el potencial (como es este caso), se requiere la realización de estudios a detalle que consideren información adicional:

- a) **Variación estacional** de precipitación, temperatura, radiación y humedad:
- b) Estudios para evaluar el **riesgo a la salud humana** por la aplicación de agua residual tratada en los cultivos
- c) Estudio de carácter social encaminados a conocer la **percepción** de la población al respecto y realizar propuestas para lograr una mayor aceptación social del programa por parte de agricultores, autoridades y sociedad.
- d) **Análisis económico** a fondo que permita comparar costos por el aprovechamiento de agua de primer uso y agua residual tratada.
- e) Lineamientos sobre **restricciones y recomendaciones específicas** a cultivos para esa zona de estudio.
- f) Estudios de **hidrogeología** que permitan evaluar el impacto real de la propuesta en la situación del acuífero, los cuales deben estar acompañados de monitoreo de calidad de agua subterránea.
- g) Estudios de **capacidad del suelo para uso agrícola** (Barrios, 2004) que incluyan información sobre: fertilidad de suelo, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, zonas contaminadas, zonas con mal drenaje, problemas de salinidad, riesgo de erosión, tasa de infiltración de agua de riego, retención, nivel freático, etc.

10. Conclusiones - Recomendaciones

Esta investigación analizó a los grandes usuarios del agua subterránea (Distrito de Riego 023, Kimberly – Clark de México, Kaltex, CFE, JAPAM y la Comisión Estatal de Aguas) que tienen un volumen de extracción concesionado de 114 hm³, que corresponde al 34% del total extraído del acuífero Valle de San Juan del Río (329.6 hm³), y equivalente al 86% del déficit del acuífero en 2015. En particular se analizó con detalle el volumen de agua concesionado al sector agrícola que corresponde al 76.7% del total extraído, por lo que las medidas para disminuir el déficit de agua, aumentar su disponibilidad y la liberación de agua de primer uso, fueron los principales objetivos de este trabajo.

Las conclusiones de esta investigación se enmarcan en las siguientes estimaciones realizadas, que sirven de contexto para su comprensión: 1) La demanda teórica anual de agua para el DR 023 considerando eficiencias de riego se estimó en 44.66 hm³ con una huella hídrica promedio de 5987.4 m³/ha/año, mientras que para Unidades de Riego en el estado se estimó en 322.63 hm³ con una huella hídrica promedio de 6815.8 m³/ha/año, lo cual obedece a que las Unidades poseen un menor grado de tecnificación. 2) La demanda total estimada agrícola en la región se calculó en 367.29 hm³ y se distribuyó para el cultivo de alfalfa (22.45%), maíz forrajero (19.4%), avena forrajera (10.67%) cebada (8.39%) y maíz de grano (8.28%). El cultivo de maíz y alfalfa en el estado (184 hm³) supera al déficit (133.3 hm³).

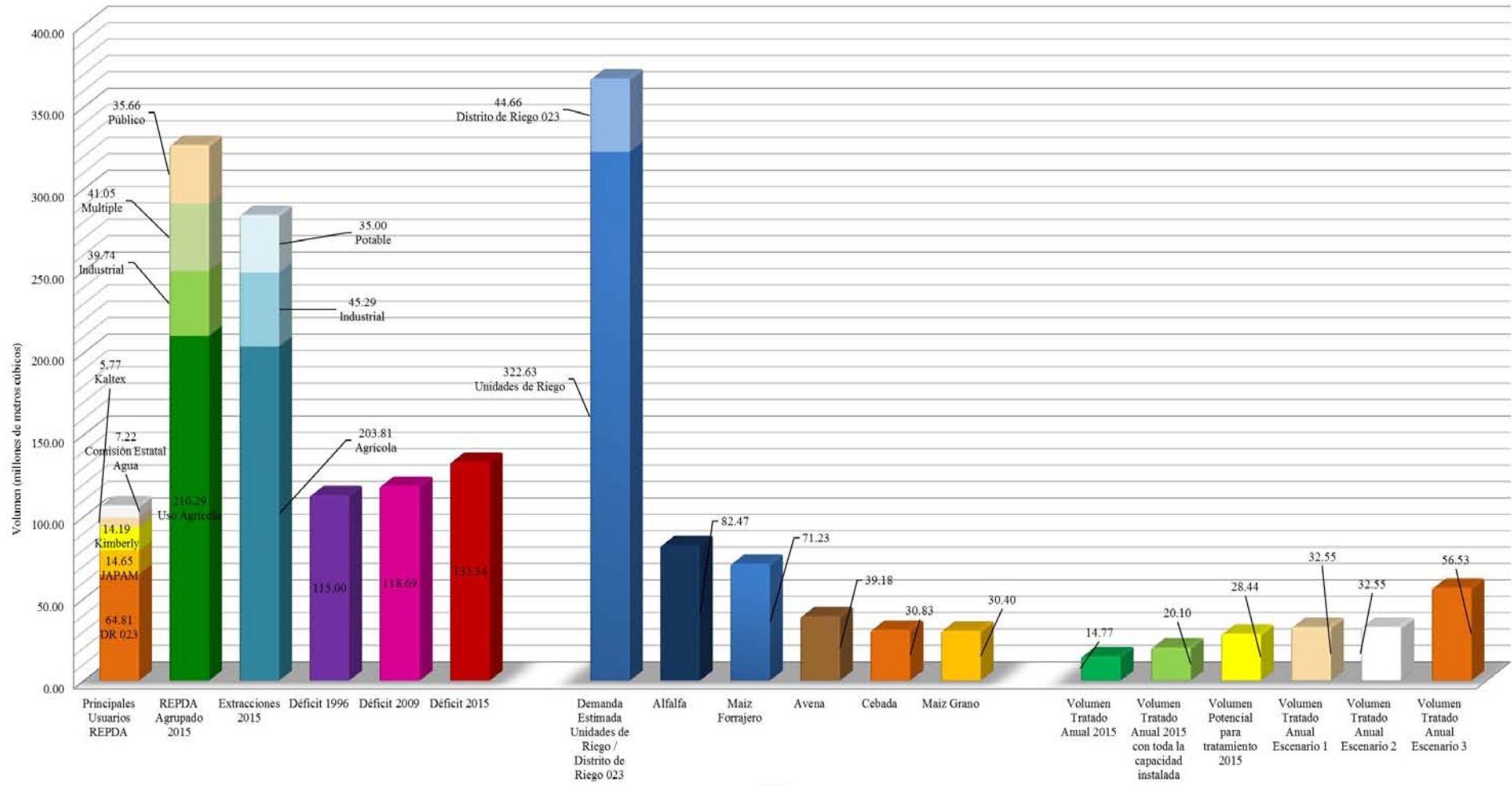
- La región de estudio reúne los principales criterios y necesidades para establecer un programa de reúso en la región: poca disponibilidad de agua (evaporación anual 2000 mm – precipitación 600 mm), acelerado crecimiento poblacional, desarrollo agropecuario e industrial y escasez de fuentes de abastecimiento superficiales que provocan la extracción excesiva de agua subterránea (133.3 hm³ anuales).
- El DR 023 y las PTARs San Pedro Ahuacatlán I y II (con 300 y 127 L/s de capacidad instalada), reúnen las condiciones óptimas para la implementación en el corto plazo de un programa de reúso de agua residual tratada
- Estos usuarios-generadores presentan ventajas porque por su localización es factible el suministro de agua residual tratada y porque dichas plantas generan en conjunto la mayor parte del volumen tratado en la región (80%)
- La gran dispersión territorial de las Unidades de Riego dificulta incorporar a estos agricultores a un programa de reúso, a pesar de ser quienes demandan el mayor volumen de primer uso que se extrae del acuífero
- Las PTARs restantes (50) en la región, tiene capacidad instalada muy baja, menores a 60 L/s, y operan con eficiencias menores al 50%
- El análisis de la relación entre la demanda potencial de agua para riego y de la potencial oferta de agua residual tratada, se basó principalmente en la estimación de la huella hídrica de los cultivos que se siembran en la región y considerando diferentes escenarios de generación de agua residual tratada
- La implementación en el corto plazo de un programa de reúso de agua residual tratada podría iniciar, bajo las condiciones actuales de operación de las PTARs, con un volumen de 11.83 hm³ para regar aproximadamente 1975 ha del DR 023, que equivale al 26.5% de la superficie del distrito y de la demanda total de agua
- Este programa inicial contribuiría a reducir el déficit anual del acuífero Valle de San Juan del Río en un 8.9%
- La evolución de un programa de reúso de agua residual tratada en la región dependerá de inversiones en: mantenimiento y rehabilitación (168.5 L/s), ampliación de las PTARs, construcción de nuevas PTARs (1155.4 L/s, con una inversión estimada de 515 mdp) y del incremento en la cobertura de los servicios de saneamiento (drenaje municipal)

- Para aumentar el potencial del programa de reúso, es necesario considerar los escenarios de generación de agua residual tratada analizados, que comprenden: i) la operación de las PTARs existentes al 100% de su capacidad instalada, y ii) construir nuevas plantas para tratar toda el agua que genera la población actual (2015). El volumen de reúso se vería incrementado a 20.09 hm³ y a 28.34 hm³, respectivamente. Volúmenes que serían equivalentes a reducir el 15% y el 22% del déficit del acuífero Valle de San Juan del Río, es decir, prácticamente duplicar y triplicar el impacto del programa inicial
- Para los escenarios futuros en 2030, se estimó que: i) si se cubre el 100% del abastecimiento de agua potable y de alcantarillado, el volumen de agua residual tratada que se puede reusar es de 32.54 hm³ (24.4% del déficit), mientras que ii) si además se cubre en un 100% el tratamiento de toda el agua residual que genere la población proyectada para ese año, es de 56.53 hm³ (42.4% del déficit)
- Para el DR 023, el programa de reúso tendría los siguientes impactos en términos de la superficie potencial a sembrar: i) bajo los tres escenarios actuales, y utilizando el valor de huella hídrica ponderada, sería de 2467, 3357 y 4750 ha, respectivamente, y equivaldrían a cubrir la demanda de agua en un 33%, 45% y 65%, respectivamente. ii) Al considerar los escenarios para 2030, el área se podría incrementar a 5436 y 9441 ha, respectivamente; cabe señalar que esta última área supera a la cultivada en el DR y plantea la posibilidad de ampliar el área sembrada en los últimos años y hacer más eficiente el uso y rendimiento en el DR 023.

Recomendaciones

- Respecto a la localización en el espacio, las principales plantas de tratamiento se localizan contiguas al Distrito de Riego 023, también los grandes usuarios como Kimberly Clark de México, CFE y Kaltex, por lo que no se debería descartar el reúso industrial como alternativa.
- Es necesario evaluar en qué medida es factible económicamente realizar mejoras en las eficiencias de riego, ya que tienen un gran impacto en el volumen utilizado (300% de incremento en la demanda original). Aunque también se debe precisar que gran parte del volumen de pérdidas se infiltra y regresa al acuífero (es necesario realizar estudios para cuantificarlo).
- Como sucede con el reúso de agua residual tratada, es conveniente analizar la posibilidad de aprovechamiento del lodo residual tratado en la agricultura, ya que permite reducir costos por compra de fertilizantes además de proveer un sitio adecuado para su disposición e ingresos por su venta como mejorador de suelos.
- Aunque la estimación preliminar del costo del reúso agrícola indicó que es menos competitivo que el del agua de primer uso, es necesario evaluar los costos a detalle y considerar opciones tales como el impacto del cambio de cultivos, por otros con mayor precio en el mercado, lo cual permitiría obtener mayores ingresos para los agricultores de la zona, y podría hacer más atractiva la inversión en reúso.
- Finalmente, se recomienda que para estudios posteriores en la región, se considere el análisis de variables tales como: variación estacional de la precipitación-*evapotranspiración*, evaluación detallada de cada una de las PTARs existentes, evaluación in situ de las parcelas-cultivos en el DR 023, examinar la posibilidad del reúso de agua residual sin tratar para cultivos forrajeros, así como explorar la aceptación de la práctica del reúso de agua residual tratada en la agricultura de la región.

Comparación Volumen de Agua 2



Datos

Referencias

- Al Jasser, A.O. (2011). Saudi wastewater reuse standards for agricultural irrigation: Riyadh treatment plants effluent compliance. *Journal of King Saud University*, 23, 1-8.
- Angelakis, A., Bontoux, L., (2000), *Wastewater Reclamation and Reuse in Eureau Countries*, EUA, Water Policy
- Asano, T. (1985). *Artificial Recharge of Groundwater*. Estados Unidos de América: Butterworth.
- Asano, T., Burton, F, & Leverenz H. (2007). *Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications*. Estados Unidos de América: AECOM.
- Asano, T., F. L. Burton, H. L. Leverenz, R. Tsuchihashi, and G. Tchobanoglous. 2007. *Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications*. New York: McGraw-Hill.
- Asano, T., R. G. Smith, and G. Tchobanoglous (1985). *Municipal wastewater treatment and reclaimed water characteristics in Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater—A Guidance Manual*. Chelsea, Mich.: Lewis Publication
- Barrios, Eugenio. (2004). *Guía para la Identificación de Proyectos de Reúso de Agua*. México: CONAGUA.
- Blumenthal, U.J., Peasey, A., Ruiz-Palacios, G. and Mara, D.D. (2000) *Guidelines for wastewater reuse in agriculture and aquaculture: recommended revisions based on new research evidence*. WELL Resource Centre, London School of Hygiene and Tropical Medicine and WEDC, Loughborough University.
- Bontoux, J., Bebin, J., (1992), *Wastewater Management in Coastal Areas*, Francia, Pergamon Press.
- Cabrera & Rodríguez, *Calidad del agua en el estado de Querétaro*, 2011, Centro de Estudios Académicos sobre Contaminación Ambiental, Universidad Autónoma de Querétaro, México
- California Department of Water Resources. (2004). *Water Facts - Water Recycling*. Water Facts, 23, 1-8.
- CEA SLP. (2011). *Tratamiento y Reúso de Agua en el estado*. Agosto 2015, de Comisión Estatal de Aguas Sitio web: www.ceaslp.gob.mx/
- CEA-SLP (2012), *Plan Integral de Saneamiento San Luis Potosí*, Comisión Estatal de Aguas, México
- César, E., Vázquez, B. (2003). *Ingeniería de los Sistemas de Tratamiento y Disposición de Aguas Residuales*. México: Fundación ICA.
- CESPM. (2015). *Aguas Residuales*. Agosto, 2015, de Comisión Estatal de Servicios Públicos Mexicali Sitio web: <http://www.cespm.gob.mx/plantasresiduales.html>
- Comisión Estatal de Aguas de Querétaro. (2015). *Programa de obras 2015*. octubre, 2015, de CEA Querétaro Sitio web: ND
- CONAGUA - IMTA. (2010). *Integral Modernization of the Valle de Juárez Irrigation District 009 and treated wastewater for fresh water in the Valle de Juárez*, Chihuahua. México: CONAGUA.
- CONAGUA (2004-2014), “*Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego*”, 2004-2014, Comisión Nacional del Agua, México
- CONAGUA (2006-2014), “*Estadísticas de los Distritos de Riego 2006-2014*”, Comisión Nacional del Agua, México
- CONAGUA (2009), *Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea*, 2009, Comisión Nacional del Agua, México.
- CONAGUA (2010). *Manual para el uso de aguas residuales en la agricultura*. México: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA (2012), “Estadísticas Agrícolas de las Unidades de Riego Ciclo 2011-2012”, Comisión Nacional del Agua, México

CONAGUA (2012), “Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego”, 2011-2012, Comisión Nacional del Agua, México

CONAGUA (2012), Programa Hídrico Regional Visión 2030 Golfo Norte, 2012, Comisión Nacional del Agua, México.

CONAGUA (2014), Estadísticas del Agua en México 2014, Comisión Nacional del Agua, México, 239 pp

CONAGUA, “Compendio Básico del Agua en México”, Programa Nacional Hidráulico 2001-2006”, 2002, Comisión Nacional del Agua, México

CONAGUA, Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea acuífero 2203 Valle San Juan del Río, Comisión Nacional del Agua, México, 2009

CONAGUA, Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Valle de San Juan del Río, Comisión Nacional del Agua, México, 1996

CONAGUA. (2006). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. México: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA. (2009). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. México: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA. (2009). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. México: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA. (2011). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. México: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA. (2011). Mercado de Aguas Residuales en México. Reporte Económico de Administración del Agua, 4to trimestre 2011, 1-4.

CONAGUA. (2012). Estadísticas Agrícolas de las Unidades de Riego. México: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA. (2012). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. México: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA. (2012). Programa Hídrico Regional Visión 2030, Región Hidrológico Administrativa IX Golfo Norte. México: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA. (2012). Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. México: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA. (2013). Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego. México: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA. (2013). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. México: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA. (2014). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. México: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA. (2014). Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. México: Comisión Nacional del Agua.

CONAPO (2013), Dinámica Demográfica 1990 – 2010 y proyecciones de población 2010 – 2030, Consejo Nacional de Población, México, 42 pp

CQMA (2011) Diagnóstico Ambiental Integral de la ciudad de San Juan del Río, Querétaro, Centro Queretano del Medio Ambiente, México, 157 pp

- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. & Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua.
- EPA (2004). Guidelines for Water Reuse. EUA: Environmental Protection Agency
- EPA (2012). Guidelines for Water Reuse. Washington D.C.: Environmental Protection Agency.
- FAO (1985). Water Quality for Agriculture. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO (1992). Wastewater treatment and use in agriculture. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO (2002). Crops and Drops making the best use of water for agriculture. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO. (2004). Crops and Drops making the best use of water for agriculture. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO. (2013). Guidelines to control water pollution from agriculture in China. Roma: FAO.
- Gerba C. P. (1983). Pathogens in Utilization of Municipal Wastewater and Sludge on Land. Workshop. A. L. Page, Riverside California
- Goldstein, R., Smith, S., (2002). U.S. Electricity Consumption for Water Supply and Treatment. California: EPRI Managers
- Hernández, A & Kampfner, O. (2012). Las Unidades de Riego: sector estratégico para la seguridad agrícola y alimentaria de México. XXII Congreso Nacional de Hidráulica, XXII
- Hernández, A., Quiñones, E., Acevedo, D., Rubiños, J., (2014). Calidad biológica de aguas residuales utilizadas para riego de cultivos forrajeros en Tulancingo, Hidalgo, México. Scientific Electronic Library Online Chapingo, 20, --.
- IMTA (2007), Gaceta del IMTA #3, 2007, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México.
- IMTA. (2015). Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores. Octubre, 2015, de Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Sitio web: http://www.pigoo.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=637
- INEGI (2009), Censos Económicos: Zona Metropolitana de Querétaro, 2009, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (2012), Perspectiva Estadística Querétaro, 2012, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México, 95 pp
- INEGI. (2007). Panorama Agropecuario en Querétaro. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México
- INEGI. (2010). Censo de Población y Vivienda. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- JAPAM. (2006). Evaluación Socioeconómica de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales "San Pedro Ahuacatlán II", en San Juan del Río, México: Junta de Agua Potable y Alcantarillado Municipal de San Juan del Río, Querétaro.
- Jiménez, B. (2005). La Contaminación Ambiental en México. México: Limusa - Noriega.
- Jiménez, B., Asano, T.. (2008). Water Reuse: An International Survey of Current Practice, Issues and Needs. Reino Unido: IWA.
- Jiménez, B., Chávez, A., Gibson, R., Maya, C., (2012). Unplanned aquifer recharge in el Mezquital/Tula Valley, México. En Water Reclamation Technologies in Safe Manage Aquifer Recharge (141-158). Reino Unido: IWA Publishing.

- Kandiah A. (1990). Criteria and classification of saline water. *Water, Soil and Crop Management Practices Relating to the Use of Saline Water*.
- Kandiah A. (1990). Water quality management for sustainable agricultural development. *Natural Resources Forum*.
- KCM (2006), Reporte Anual Kimberly-Clark de México, 2006, Kimberly-Clark de México, México
- Magaña Rueda Víctor (2004). Los impactos del niño en México. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, México.
- Mara, D. (2004) Domestic wastewater treatment in developing countries. UK-USA: Earthscan.
- Martens D. & D. Westermann. (1991). Fertilizer Applications for Correcting Micronutrient Deficiencies. Micronutrients in agriculture. Disponible en <http://eprints.nwisrl.ars.usda.gov/>.
- Martineau, P.. (2014). State Board Approves Low-Interest Loan Terms for Recycling Projects. Agosto 28, 2015, de Association of California, Water Agencies Sitio web: <http://www.acwa.com/news/water-recycling/state-board-approves-low-interest-loan-terms-recycling-projects>
- Mekonnen & Hoekstra, "The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products", UNESCO -IHE, Volumen 2, 2010
- MEROKOT. (2015). Water treatment and effluent reuse, Agosto 2015, de Israel National Water Company Sitio web: <http://www.mekorot.co.il/Eng/Activities/Pages/WastewaterTreatmentandReclamation.aspx>
- Metcalf and Eddy, Inc. (1991). *Wastewater Engineering—Treatment, Disposal, and Reuse*. McGraw-Hill Publishing Company, New York, New York.
- Moreno, L., Fernández, M., Rubio, J., Calaforra, J. (2003). La depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno fundamentos y casos prácticos. Andalucía
- Moscoso, J., Ecocheaga, L., Ugas, R., Tréllez, E., . (2002). Guía para la Formulación de Proyectos de Sistemas Integrados de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales Domésticas. Lima: CIID, CEPIS.
- NA. (2015). Aplicación Tarifas CFE. Enero 2016, de CFE Sitio web: CFE http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_negocio.asp?Tarifa=6
- NAS (2012). Water Reuse: Potencial for expanding nation's water supply through reuse of municipal wastewater. Washington D.C.: National Academy of Sciences.
- ND. (2007). Análisis de Costos de Producción de Maiz Blanco. Enero 2016, de FIRA Sitio web: ND
- NRC (1996). Use of Reclaimed Water and Sludge in Food Crop Production. Estados Unidos de América: National Research Council.
- O'Connor, G. A., D. Kiehl, G. A. Eiceman, and J. A. Ryan. (1990). Plant uptake of sludge-borne PCBs. *J. Environ. Qual* .
- OMS (1989). Safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture. Geneva, Organización Mundial de la Salud
- OMS (2006). Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater in agriculture. Suiza: Organización Mundial de la Salud.
- ONU. (2004). Israel: A case study on commitments-related best practice or lessons learned in sanitation. agosto, 2015, de Organización de las Naciones Unidas Sitio web: <http://www.un.org/esa/sustdev/csd/csd13/casestudies/>
- Organismo de Cuenca Golfo Norte (2012), “Programa Hídrico Regional 2030 Región Hidrológico Administrativa IX”, Comisión Nacional del Agua, México.
- Papaiacovou, I., Achileos, C., Ioannidoi, I., Panayi, A., Kazner, C., Hochstrat, Rita. (2012). Water Reuse in Cyprus. *Reclaimed Water*, 225, 1-4.

Pascual R, Albañil A & Lobato R. (2011). Reporte del Clima en México. México: Servicio Meteorológico Nacional.

Registro Agrario Nacional, RAN Núcleos Agrarios [en línea], México, SEDATU – SAGARPA, [fecha de consulta: 07 Septiembre 2015], disponible en www.ran.gob.mx

Rojas, A.. (2011). Experiencia del reúso del agua residual tratada en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí. abril, 2015, de CEA San Luis Potosí Sitio web: http://www.agua.unam.mx/assets/acuíferos/pdfs/presentaciones/albertorojas_ceaslp.pdf

Secretaria de Desarrollo Agropecuario de Querétaro. (2011). Anuario Estadístico del Sector Rural. México: Oficina de Desarrollo Rural Sustentable.

Secretaria de Desarrollo Agropecuario de Querétaro. (2012). Anuario Estadístico del Sector Rural. México: Oficina de Desarrollo Rural Sustentable.

Secretaria de Desarrollo Agropecuario de Querétaro. (2014). Anuario Estadístico del Sector Rural. México: Oficina de Desarrollo Rural Sustentable.

SEMARNAT (2011), Programa Hídrico Nacional Visión 2030 Región Hidrológico Administrativa IX Golfo Norte, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, 175pp

SEMARNAT. (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. México: Comisión Nacional del Agua.

SEMARNAT. (1999). Acuerdo Oficial por el cual se establece el Distrito de Riego 023 San Juan del Río. México: Diario Oficial de la Federación.

SEMARNAT. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. México: Comisión Nacional del Agua.

SEMARNAT. (2012). Programa de Acciones y Proyectos para la Sustentabilidad Hídrica Visión 2030 Estado de Querétaro. México: Comisión Nacional del Agua.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2013), Uso de tecnología y de servicios en el campo, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, México, 1012pp

SIAP. (2015). Agricultura extensiva e intensiva. Julio 27, 2015, de Servicio de Información Agropecuaria Sitio web: <http://www.siap.gob.mx/siaprendes/contenidos/2/01-agricultura/contexto-2.html>

Silva, P & Quijada S. (1999). Unidades de Riego: La otra mitad del sector bajo riego en México. IMWI Serie Latinoamericana, 19, 1-18.

SMN. (2011). Monitor de Sequía en México. Julio 29, 2015, de Servicio Meteorológico Nacional Sitio web: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=20&Itemid=74

State Water Resources Control Board. (2015). Irrigated Lands Regulatory Program. agosto 18, 2015, de SWRCB Sitio web: http://www.swrcb.ca.gov/water_issues/programs/agriculture/

Takashi, A., Levine, A., Leverenz, H., (1998). Wastewater Reclamation and Reuse. California, EUA: CRC Press.

Tchobanoglous, G., Stensel, H. (2002). Wastewater Engineering. Estados Unidos de América: Mc Graw-Hill.

UNAM (2011), “Retos de la investigación del agua en México”, 2011, Universidad Nacional Autónoma de México Campus Morelos, México

UNESCO (2009) Third United Nations Water Development Report: Water in a Changing World, Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

Winpenny, J., Heinz, I., Oshima, S., (2013). Reutilización del agua en la agricultura ¿Beneficios para todos? Roma: FAO

Anexo 1 – Huella Hídrica Potencial en Unidades de Riego

Anexo 1 Huella Hídrica Potencial Unidades de Riego Ciclo 2011-2012					
Amealco de Bonfil					
Cultivo	Superficie Sembrada	Rendimiento	Huella Azul	Volumen cada hectárea	Demanda hídrica potencial
	(ha)	(ton/ha)	(m³/ton)	(m³/ha)	m³
Alfalfa	25.00	43.12	27.00	1,164.24	29,106.00
Avena Forrajera	225.00	10.31	181.00	1,866.11	419,874.75
Durazno (Melocotón)	38.00	3.79	188.00	712.52	27,075.76
Frijol (Alubia)	35.00	1.20	54.00	64.80	2,268.00
Maíz Grano	6,597.00	3.81	62.00	236.22	1,558,343.34
Trigo Forrajero	43.00	7.09	342.00	2,424.78	104,265.54
Zempoaxochitl	105.00	13.65	85.30	1,164.35	122,256.23
Pastos	315.00	17.84	27.00	481.68	151,729.20
Total	7,383.00				2,414,918.82
Colón					
Cultivo	Superficie Sembrada	Rendimiento	Huella Azul	Volumen cada hectárea	Demanda hídrica potencial
	(ha)	(ton/ha)	(m³/ton)	(m³/ha)	m³
Ajo	20.00	6.00	85.31	511.86	10,237.20
Alfalfa	1,230.00	69.10	27.00	1,865.70	2,294,811.00
Avena Forrajera	397.00	23.00	181.00	4,163.00	1,652,711.00
Cebada	135.00	5.40	376.00	2,030.40	274,104.00
Cebolla	32.00	11.30	44.00	497.20	15,910.40
Chile Verde	100.00	28.88	42.00	1,212.96	121,296.00
Espárrago	60.00	4.10	119.00	487.90	29,274.00
Frijol (Alubia)	185.00	1.60	54.00	86.40	15,984.00
Jitomate	56.00	269.35	63.00	16,969.05	950,266.80
Maíz Forrajero Verde	1,045.00	35.00	62.00	2,170.00	2,267,650.00
Maíz Grano	2,776.00	8.17	62.00	506.54	1,406,155.04
Rye Grass (Zacate)	285.00	80.00	25.00	2,000.00	570,000.00
Sorgo Forrajero	30.00	38.00	103.00	3,914.00	117,420.00
Sorgo Grano	150.00	8.70	103.00	896.10	134,415.00
Tomate de Cáscara	100.00	20.50	85.31	1,748.86	174,885.50
Trigo Grano	45.00	5.61	318.00	1,783.98	80,279.10
Triticale Forrajero	497.00	32.70	171.50	5,608.05	2,787,200.85
Zanahoria	12.00	11.12	28.00	311.36	3,736.32
Total	7,155.00				12,906,336.21
El Marqués					
Cultivo	Superficie Sembrada	Rendimiento	Huella Azul	Volumen cada hectárea	Demanda hídrica potencial
	(ha)	(ton/ha)	(m³/ton)	(m³/ha)	m³
Ajo	35.00	9.00	85.31	767.79	26,872.65
Alfalfa	1,398.00	78.93	27.00	2,131.11	2,979,291.78
Avena Forrajera Verde	860.00	30.00	181.00	5,430.00	4,669,800.00
Brócoli	79.00	13.52	21.00	283.92	22,429.68
Calabacita	4.00	14.00	24.00	336.00	1,344.00
Cebada	220.00	5.85	376.00	2,199.60	483,912.00
Cebolla	65.00	24.46	44.00	1,076.24	69,955.60
Chile Verde	60.00	7.80	42.00	327.60	19,656.00
Coliflor	92.00	11.65	21.00	244.65	22,507.80
Durazno (Melocotón)	4.00	1.20	188.00	225.60	902.40
Espárrago	146.00	4.00	119.00	476.00	69,496.00
Espinaca	43.00	12.40	14.00	173.60	7,464.80
Frijol (Alubia)	140.00	0.80	54.00	43.20	6,048.00
Jícama	12.00	25.00	85.31	2,132.75	25,593.00
Lechuga	115.00	26.61	28.00	745.08	85,684.20
Maíz Elotero	110.00	16.00	62.00	992.00	109,120.00

Maíz Forrajero Verde	5,600.00	60.74	62.00	3,765.88	21,088,928.00
Maíz Grano	3,100.00	7.00	62.00	434.00	1,345,400.00
Nopal Verdura	12.00	17.20	85.31	1,467.33	17,607.98
Rye Grass (Zacate)	180.00	44.00	25.00	1,100.00	198,000.00
Sorgo Forrajero	55.00	35.00	103.00	3,605.00	198,275.00
Sorgo Grano	50.00	9.50	103.00	978.50	48,925.00
Tomate de Cáscara	57.00	54.00	85.31	4,606.74	262,584.18
Triticale Forrajero	580.00	35.00	171.50	6,002.50	3,481,450.00
Zanahoria	107.00	28.39	28.00	794.92	85,056.44
Total	13,124.00				35,326,304.51
Huimilpan					
Cultivo	Superficie Sembrada	Rendimiento	Huella Azul	Volumen cada hectárea	Demanda hídrica potencial
	(ha)	(ton/ha)	(m ³ /ton)	(m ³ /ha)	m ³
Ajo	6.00	13.00	85.31	1,109.03	6,654.18
Alfalfa	198.00	79.33	27.00	2,141.91	424,098.18
Apio	8.00	17.13	85.31	1,461.36	11,690.88
Avena Forrajera	53.00	29.00	181.00	5,249.00	278,197.00
Brócoli	61.00	12.89	21.00	270.69	16,512.09
Cebada	190.00	4.67	376.00	1,755.92	333,624.80
Cebolla	10.00	27.00	44.00	1,188.00	11,880.00
Chile Verde	4.00	8.50	42.00	357.00	1,428.00
Coliflor	183.00	12.30	21.00	258.30	47,268.90
Frijol (Alubia)	1.00	0.80	54.00	43.20	43.20
Lechuga	468.00	30.24	28.00	846.72	396,264.96
Maíz Elotero	6.00	13.50	62.00	837.00	5,022.00
Maíz Forrajero Verde	290.00	47.74	62.00	2,959.88	858,365.20
Maíz Grano	209.00	7.59	62.00	470.58	98,351.22
Nopal Verdura	4.50	16.70	85.31	1,424.68	6,411.05
Peral	3.00	6.30	94.00	592.20	1,776.60
Triticale Forrajero	5.00	29.00	171.50	4,973.50	24,867.50
Total	1,699.50				2,522,455.76
Pedro Escobedo					
Cultivo	Superficie Sembrada	Rendimiento	Huella Azul	Volumen cada hectárea	Demanda hídrica potencial
	(ha)	(ton/ha)	(m ³ /ton)	(m ³ /ha)	m ³
Alfalfa	813.90	96.92	181.00	17,542.52	14,277,857.03
Avena Forrajera	303.90	33.34	181.00	6,034.54	1,833,896.71
Cebada	1,759.10	6.71	376.00	2,522.96	4,438,138.94
Chile Verde	40.80	42.73	42.00	1,794.66	73,222.13
Maíz Grano	4,729.90	10.43	62.00	646.66	3,058,637.13
Otros Cultivos	2,464.70	55.58	85.30	4,740.97	11,685,078.62
Sorgo Grano	647.10	9.84	103.00	1,013.52	655,848.79
Zanahoria	370.70	22.40	28.00	627.20	232,503.04
Total	11,130.10				36,255,182.38
San Juan del Río					
Cultivo	Superficie Sembrada	Rendimiento	Huella Azul	Volumen cada hectárea	Demanda hídrica potencial
	(ha)	(ton/ha)	(m ³ /ton)	(m ³ /ha)	m ³
Alfalfa	1,093.40	95.27	27.00	2,572.29	2,812,541.89
Chile Verde	129.30	29.70	42.00	1,247.40	161,288.82
Maíz Grano	779.80	5.71	62.00	354.02	276,064.80
Otros Cultivos	1,208.10	75.76	85.31	6,463.09	7,808,053.71
Rosal	10.70	9.40	910.00	8,554.00	91,527.80
Vid Mesa	13.40	10.86	97.00	1,053.42	14,115.83
Total	3,234.70				11,163,592.84
Tequisquiapan					
Cultivo	Superficie Sembrada	Rendimiento	Huella Azul	Volumen cada hectárea	Demanda hídrica potencial
	(ha)	(ton/ha)	(m ³ /ton)	(m ³ /ha)	m ³
Alfalfa	1,117.60	94.03	27.00	2,538.81	2,837,374.06
Avena Forrajera	190.40	35.89	181.00	6,496.09	1,236,855.54

Cebada	51.60	6.89	376.00	2,590.64	133,677.02
Chile Verde	211.70	26.97	42.00	1,132.74	239,801.06
Maíz Grano	936.60	9.17	62.00	568.54	532,494.56
Otros Cultivos	957.80	47.18	85.31	4,024.93	3,855,073.93
Sorgo Grano	88.40	8.99	103.00	925.97	81,855.75
Trigo Grano	19.90	6.36	318.00	2,022.48	40,247.35
Vid Mesa	34.50	12.85	97.00	1,246.45	43,002.53
Total	3,608.50				9,000,381.79
TOTAL ESTATAL	47,334.80				109,589,172.32

Anexo 2 – Plantas de Tratamiento de Agua Residual ubicadas en la región de estudios

Anexo 2 Plantas de Tratamiento de Agua Residual ubicadas en la región						
Municipio	Localidad	Nombre de la Planta	Proceso	Capacida	Cauda	Cuerpo
Amealco	Amealco	San Nicolas de la Torre	RAFA	0	0	NA
Amealco	Amealco	Amealco de Bonfil	LA	20	14.6	Embalse
Amealco	Santiago Mexquititlan	Santiago Mexquititlan	Anaerobio	7	2.9	Riego Agrícola
Colon	La Carbonera	La Carbonera	RAFA	0	0	NA
Colon	Colon	Colon	LA	15	0.7	Riego Agrícola
Colón	Ajuchitlan	Ajuchitlán I	Reactor Enzimático	0	0	NA
Colón	Ajuchitlan	Ajuchitlán I	RAFA	0	0	NA
Colón	Los Benitos	Los Benitos	RAFA	0	0	NA
Colón	Esperanza	La Esperanza	Reactor Enzimático	0	0	NA
Colón	San Ildefonso	San Ildefonso	RAFA	0	0	NA
Colón	San José la Peñuela	Peñuelas	RAFA	0	0	NA
Colón	San Martín	San Martín	RAFA	0	0	NA
Colón	Santa Rosa Finca	Santa Rosa Finca	RAFA	0	0	NA
El Marques	Calamanda	Calamanda	RAFA	0	0	NA
El Marques	Chichimequillas	Chichimequillas	LA	6	2.9	Arroyo SN
El Marques	Saldarriaga	Bernardo Quintana	LA	12	11.5	Arroyo SN
Huimilpan	Los Cues	Los Cues	RAFA	0	0	NA
Huimilpan	Huimilpan	Huimilpan	Filltros	9	3.2	NA
Huimilpan	Huimilpan	La Noria	LA	2.5	1	NA
Huimilpan	El Milagro	El Milagro	Humedales	1.5	1.3	NA
Huimilpan	San Pedro	San Pedro	RAFA	0	0	NA
Huimilpan	Huimilpan	Cumbres del Cimatario	LA	12	1	Bordo
Huimilpan	Lagunillas	Lagunillas	LA	2	1	Riego Agrícola
Huimilpan	El Vegil	El Vegil	LA	2	0.3	NA
Pedro Escobedo	Pedro Escobedo	Pedro Escobedo	LA	15	7.1	Arroyo SN
San Juan del	Arcila	Arcila I	RAFA	0	0	NA
San Juan del	Arcila	Arcila II	RAFA	0	0	NA
San Juan del	El Cazadero	El Cazadero	RAFA	0	0	NA
San Juan del	San Pedro Ahuacatlán	San Pedro Ahuacatlán I	LA	125	97	Riego Agrícola
San Juan del	Laguna de Lourdes	Laguna de Lourdes	RAFA	0	0	NA
San Juan del	Loma Linda	Loma Linda	Reactor Enzimático	5	4	Riego Agrícola
San Juan del	Palmillas	Palmillas I	RAFA	0	0	NA
San Juan del	Palmillas	Palmillas II	RAFA	0	0	NA
San Juan del	San Jose	San José Galindo	RAFA	0	0	NA
San Juan del	San Juan del Río	Granjas Banthi 3°	RAFA	0	0	NA
San Juan del	San Juan del Río	Nuevo San Isidro	RAFA	0	0	NA
San Juan del	San Juan del Río	Prados de Oriente	Reactor Enzimático	0	0	NA
San Juan del	San Juan del Río	San Juan del Río	Filltros	0	0	NA
San Juan del	San Miguel Galindo	San Miguel Galindo	RAFA	10	2.4	Arroyo
San Juan del	Santa Rosa Xajay	Santa Rosa Xajay	Reactor Enzimático	0	0	NA
San Juan del	Senegal de las	Senegal de las Palomas	RAFA	0	0	NA

San Juan del	El Sitio	El Sitio I	RAFA	0	0	NA
San Juan del	El Sitio	El Sitio II	RAFA	0	0	NA
San Juan del	Vista Hermosa	Vista Hermosa	RAFA	0	0	NA
San Juan del	Cuarto Centenario	Cuarto Centenario	RAFA	0	0	NA
San Juan del	La Estancia	La Estancia	LA	10	6	Riego Agrícola
San Juan del	Puerta de Palmillas	Puerta de Palmillas	LA	5	1	NA
San Juan del	San Juan del Río	Real de Nogales	Aerobio	8	2.1	Río San Juan
San Juan del	El Organal	El Organal	LA	5	2.5	NA
San Juan del	San Pedro Ahuacatlán	San Pedro Ahuacatlán	LA	300	280	Río San Juan
Tequisquiapan	La Fuente	La Fuente	LA	5	4	Laguna SN
Tequisquiapan	Tequisquiapan	Tequisquiapan	Dual	60	22	Río San Juan
Total				637	468.5	NA

Anexo 3 - Superficie irrigable por PTAR

Superficie irrigable con efluente tratado PTAR San Pedro Ahuacatlán II											
Núcleos Agrarios Potenciales	Área (ha)	Alfalfa		Avena		Cebada		Maíz		Sorgo	
		m³/ha	Vol. Requerido (m³)	m³/ha	Vol. Requerido (m³)	m³/ha	Vol. Requerido (m³)	m³/ha	Vol. Requerido (m³)	m³/ha	Vol. Requerido (m³)
El Carrizo	209.1	2,178.1	455,372.4	7,868.1	1,644,974.3	2,327.4	486,597.0	718.6	150,233.2	1,049.9	219,500.1
San Pedro Ahuacatlán A	54.5	2,178.1	118,734.0	0.0	0.0	2,327.4	126,875.5	718.6	39,171.9	1,049.9	57,232.5
Vistha	343.6	2,178.1	748,416.5	7,868.1	2,703,558.2	2,327.4	799,734.8	718.6	246,912.2	1,049.9	360,754.1
San Isidro	599.2	2,178.1	1,305,059.3	7,868.1	4,714,358.7	2,327.4	1,394,546.2	718.6	430,555.9	1,049.9	629,068.9
San Pedro Ahuacatlán B	13.4	2,178.1	29,235.3			2,327.4	31,239.9	718.6	9,645.1	1,049.9	14,092.1
Espiritu Santo	153.5	2,178.1	334,270.8			2,327.4	357,191.5	718.6	110,280.3	1,049.9	161,126.3
Santa Matilde Iztacalco	346.4	2,178.1	754,454.1			2,327.4	806,186.5	718.6	248,904.2	1,049.9	363,664.4
San Pedro Ahuacatlán C	188.9	2,178.1	411,468.8			2,327.4	439,682.9	718.6	135,748.9	1,049.9	198,337.5
La Llave Norte	266.8	2,178.1	581,157.3			2,327.4	621,006.9	718.6	191,731.3	1,049.9	280,131.3
La Llave Sur	349.0	2,178.1	760,247.5			2,327.4	812,377.1	718.6	250,815.5	1,049.9	366,457.0
San Pedro Ahuacatlán D	287.9	2,178.1	627,143.0			2,327.4	670,145.8	718.6	206,902.6	1,049.9	302,297.5
Chicontepec el Mirador	407.8	2,178.1	888,196.3			2,327.4	949,099.3	718.6	293,027.4	1,049.9	428,131.3
EL Organal Este	462.1	2,179.1	1,006,960.4			2,327.4	1,075,513.1	718.6	332,056.8	1,049.9	485,155.6
San Clemente	535.9	2,178.1	1,167,249.7					718.6	385,090.7	1,049.9	562,641.5
EL Mirador	506.4							1,051.0	532,231.2	1,888.9	956,540.5
San Isidro Norte	412.6							1,051.0	433,656.4	1,888.9	779,379.1
La Llave Norte 2	103.1							1,051.0	108,400.3	1,888.9	194,820.0
La Valla	965.9							1,051.0	1,015,128.3	1,888.9	1,824,416.4
Morelos	650.6							1,051.0	683,724.5	0.0	0.0
El Carmen	184.8							1,051.0	194,249.9	1,888.9	349,111.2
Ahorcado	185.1							1,051.0	194,578.1	1,888.9	349,701.1
La Fuente	1,103.9							1,051.0	1,160,226.4		
El Organal Oeste	411.8							718.6	295,936.0		
San Clemente B	152.4							718.6	109,495.6		
El Muerto - Ignacio P	551.3							718.6	396,191.8		
San Clemente C	281.4							718.6	202,185.2		
Volumen Total		9 187 965.4		9 062 891.3		8 570 196.4		8 357 079.7		8 882 558.5	
Área Total		4218.1		Área Total 1151.9		Área Total 3682.2		Área Total 9727.6		Área Total 6576.2	

Superficie irrigable con efluente tratado PTAR San Pedro Ahuacatlán I

Núcleos Agrarios Potenciales	Área (ha)	Alfalfa		Avena		Cebada		Maíz		Sorgo	
		m³/ha	Vol. Requerido (m³)	m³/ha	Vol. Requerido (m³)	m³/ha	Vol. Requerido (m³)	m³/ha	Vol. Requerido (m³)	m³/ha	Vol. Requerido (m³)
San Juan del Río I	52.5	2,147.3	112,831.4	4,873.1	256,065.1	2,219.9	116,647.9	1,051.0	55,225.3	1,888.9	99,252.4
San Pedro Ahuacatlán E	42.0	2,147.3	90,215.8	4,873.1	204,740.3	2,219.9	93,267.3	1,051.0	44,156.1	1,888.9	79,358.5
San Pedro Ahuacatlán F	173.6	2,147.3	372,725.6	4,873.1	845,881.7	2,219.9	385,332.8	1,051.0	182,430.3	1,888.9	327,868.7
San Juan del Río B	288.1	2,147.3	618,636.6	0.0	0.0	2,219.9	639,561.6	1,051.0	302,791.3	1,888.9	544,184.8
Santa Cruz Escandón	20.3	2,147.3	43,482.3	4,873.1	98,680.9	2,219.9	44,953.1	1,051.0	21,282.4	1,888.9	38,249.3
Santa Cruz Escandón II	116.3	2,147.3	249,650.1	4,873.1	566,568.1	2,219.9	258,094.3	1,051.0	122,191.1	1,888.9	219,605.1
Nueva Zona de Riego el Siete	186.5	2,147.3	400,512.7	4,873.1	908,943.1	2,219.9	414,059.7	1,051.0	196,030.7	1,888.9	352,311.7
Bantheni I	405.4	2,147.3	870,509.3	0.0	0.0	2,219.9	899,953.7	1,051.0	426,070.2	1,888.9	765,745.1
Bantheni II	22.5	2,147.3	48,403.3	0.0	0.0	2,219.9	50,040.5	1,051.0	23,691.0	1,888.9	42,578.1
Bantheni III	18.6	2,147.3	39,854.6	4,873.1	90,447.9	0.0	0.0	1,051.0	19,506.8	1,888.9	35,058.2
EL Mirador II	68.5	2,147.3	147,041.1	0.0	0.0	2,219.9	152,014.6	1,051.0	71,969.2	1,888.9	129,345.0
Santa Rosa Xajay Oeste	155.8	0.0	0.0	0.0	0.0			1,051.0	163,775.5	1,888.9	294,341.9
Nueva Zona de Riego San Nicolás	588.8	0.0	0.0	0.0	0.0			1,051.0	618,814.2	0.0	0.0
El Mirador III	10.9	2,147.3	23,448.4	4,873.1	53,215.0			1,051.0	11,476.8	1,888.9	20,626.4
El Mirador IV	9.6	0.0	0.0	4,873.1	46,844.5			1,051.0	10,102.9	1,888.9	18,157.2
La Trinidad Sur	20.2	2,147.3	43,474.7					1,051.0	21,278.7	1,888.9	38,242.6
La Trinidad Medio	78.4							1,051.0	82,427.0		
La Trinidad Norte	143.1							1,051.0	150,439.6		
Bordo Blanco I	313.3							1,051.0	329,232.4		
Otra zona	190.0							1,051.0	199,686.2		
Vol. Total		3,060,785.8		3,071,386.7		3,053,925.6		3,052,577.7		3,004,925.0	
Vol. Sobrante o Faltante		-1,793.8		-12,394.7		5,066.4		6,414.3		54,067.0	
Área Total		1,425.4		Área Total 630.3		Área Total 1,375.7		Área Total 2,904.5		Área Total 1,590.9	

Superficie irrigable con efluente tratado PTAR Tequisquiapan

Núcleos Agrarios Potenciales	Área (ha)	Alfalfa		Avena		Cebada		Maíz		Sorgo	
		m³/ha	Vol. Requerido (m³)	m³/ha	Vol. Requerido (m³)	m³/ha	Vol. Requerido (m³)	m³/ha	Vol. Requerido (m³)	m³/ha	Vol. Requerido (m³)
Tequisquiapan Centro	122.6	2,147.3	263,242.7	4,873.1	597,416.0	2,219.9	272,146.8	1,051.0	128,844.0	1,888.9	231,562.0
Tequisquiapan Centro II	22.6	2,147.3	48,582.4	4,873.1	110,255.3	2,219.9	50,225.7	1,051.0	23,778.6	1,888.9	42,735.6
Hacienda Grande	152.9	2,147.3	328,348.1	4,873.1	0.0	2,219.9	339,454.2	1,051.0	160,709.8	1,888.9	288,832.0
Hacienda Grande Este	14.6	2,147.3	0.0	4,873.1	0.0	2,219.9	32,337.1	1,051.0	15,309.5	1,888.9	27,514.7
Hacienda Grande II	140.5	2,147.3	0.0	4,873.1	0.0	0.0	0.0	1,051.0	147,611.7	0.0	0.0
Hacienda Grande Oeste	27.1	2,147.3	58,106.8	4,873.1	0.0	0.0	0.0	1,051.0	28,440.3	1,888.9	51,113.7
Hacienda Grande Norte	14.8	2,147.3	0.0	4,873.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1,888.9	27,995.0
Las Higueras	174.0	2,147.3	0.0	4,873.1	0.0	0.0	0.0	1,051.0	182,897.3	0.0	0.0
Volumen Total			698,279.9		707,671.3		694,163.7		687,591.2		669,752.9
Resta			-4487.9		-13879.3		-371.7		6200.8		24039.05
Área Total	669.1		325.2		145.2		312.7		654.2		354.6

Superficie irrigable con efluente tratado Superficie irrigable con efluente tratado PTAR Saldarriaga – PTAR Pedro Escobedo – PTAR Huimilpan – PTAR La Estancia – PTAR la Fuente											
Núcleos Agrarios Potenciales	Área (ha)	Alfalfa		Avena		Cebada		Maíz		Sorgo	
		m³/ha	Vol. Requerido (m³)	m³/ha	Vol. Requerido (m³)	m³/ha	Vol. Requerido (m³)	m³/ha	Vol. Requerido (m³)	m³/ha	Vol. Requerido (m³)
PTAR Saldarriaga											
Jesús María	483.1	2,147.3	0.0	4,873.1	0.0	2,219.9	0.0	1,051.0	0.0	1,888.9	0.0
Cerrito Colorado	156.9	2,147.3	336,882.2	4,873.1	0.0	2,219.9	348,277	1,051.0	164,887	1,888.9	296,339.0
El Paraíso	62.1	2,147.3	0.0	4,873.1	302,549	2,219.9	0.0	1,051.0	65,250.3	1,888.9	0.0
Jesús María Chico	56.3	2,147.3	0.0	4,873.1	0.0	2,219.9	0.0	1,051.0	59,197.5	1,888.9	106,391.4
Josefa Vergara	90.6	2,147.3	0.0	4,873.1	0.0	2,219.9	0.0	1,051.0	95,205.1	1,888.9	0.0
Volumen Total	NA	336,882.2		302,548.7		348,277.0		384,539.7		402,730.4	
Resta	NA	25,781.8		60,115.3		14,387.0		-21,875.7		-40,066.4	
Área Total	848.9	156.9		62.1		156.9		365.9		213.2	
PTAR Pedro Escobedo											
Ahorcado Sur	26.2	2178.1	57,128.0	7868.1	206,637.6	0.0	0.0	718.6	18,847.3	0.0	0.0
Lira	135.1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	718.6	97,087.5	1049.9	141,850.9
Ahorcado	85.7	2178.1	186,714.6	0.0	0.0	2327.4	199,517.5	718.6	61,599.5	1049.9	90,000.8
Volumen Total	NA	243,842.6		206,367.6		199,517.5		177,534.3		231,851.6	
Resta	NA	-19,937.0		17538.0		24,388.1		46,371.3		-7,946.0	
Área Total	247.0	112.0		26.2		85.7		247.1		220.8	
PTAR La Estancia											
Las Palomas	220.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	718.6	158,175.2	1049.9	231,103.8
Las Palomas	96.8	2178.1	210,862.4	7868.1	761,713.4	2327.4	225,321.1	718.6	69,566.2	0.0	0.0
Volumen Total	NA	210,862.4		761,713.4		225,321.1		227,741.5		231,103.8	
Resta	NA	-21,646.4		-572,497.4		-36,105.1		-38,525.5		-41,887.8	
Área Total	316.93	96.8		96.8		96.8		316.9		220.1	
PTAR La Fuente											
La Fuente	87.31	2147.3	187,478.2	4873.1	425,472.2	2219.9	193,819.5	1051.0	91,761.1	1,888.9	164,915.5
Volumen Total	NA	187,478.2		425,472.2		193,819.5		91,761.1		164,915.5	
Resta	NA	-61,334.2		-299,328.2		-67,675.5		34,382.9		-38,771.5	
Área Total	87.3	87.31		87.31		87.31		87.31		87.31	
PTAR Huimilpan											
Huimilpan	74.19	2147.3	159,319.6	4873.1	361,567.7	2219.9	164,780.5	1050.98	77,978.9	1,888.9	140,145.8
Volumen Total	NA	159,319.6		361,567.7		164,780.5		77,978.9		140,145.8	
Resta	NA	-58,404.4		-260,652.5		-63,793.3		22,936.3		-39,230.6	
Área Total	848.9	74.2		74.2		74.2		74.2		74.2	