

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA



Panorama de la Investigación sobre el Uso de
Aguas Residuales para Riego en México

Por:

MARCO ANTONIO DE JESÚS ORTIZ CRUZ

Monografía

Presentada como Requisito Parcial
para Obtener el Título de:

Ingeniero Agrónomo en Irrigación

Buenavista, Saltillo, Coah., Noviembre de 2006

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA

PANORAMA DE LA INVESTIGACIÓN SOBRE EL USO DE AGUAS
RESIDUALES PARA RIEGO EN MÉXICO

POR:

MARCO ANTONIO DE JESÚS ORTIZ CRUZ

MONOGRAFÍA

QUE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR COMO
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

APROBADA

M.C. CARLOS ROJAS PEÑA
PRESIDENTE DEL JURADO

DR. ISMAEL HERNÁNDEZ
BETANCOURT
VOCAL

M.C. GREGORIO BRIONES
SÁNCHEZ
VOCAL

M.C. LINDOLFO ROJAS PEÑA
VOCAL SUPLENTE

DR. JAVIER DE JESÚS CORTÉS BRACHO
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA

BUENAVISTA, SALTILLO, COAH., MÉXICO

NOVIEMBRE DE 2006

AGRADECIMIENTOS

A DIOS por darme todo lo que tengo.

**A Ismael Hernández Betancourt por su esfuerzo,
su voluntad y su actitud. Y sobre todo a su
familia por el tiempo que les robé.**

**A mis Suegros por el cariño que me tienen y el
amor y respeto que les tengo.**

DEDICATORIA

A mi FAMILIA.....

mi Papá (W) y mi Mamá (Jovita)

**mi esposa Yolanda, mis hijos Rodolfo, Marco y
Jarís**

Por ellos y para ellos

....por su amor, su ayuda y su comprensión

**A mis Hermanos: Martha, Javier, Francisco,
Blanca, José, Fernando, Ignacio y Rutilio**

....un logro juntos más hermanos

ÍNDICE

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Generalidades	4
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo General	4
1.2.2 Objetivos Particulares	4
2. CONSIDERACIONES FUNDAMENTALES EN EL USO DE AGUAS RESIDUALES PARA RIEGO DE CULTIVOS	5
2.1 Normatividad	5
2.2 Normatividad Mexicana	6
2.3 Recomendaciones a la Normatividad	10
2.4 Distritos de Riego que Usan Agua Residual	11
3. PUBLICACIONES RELATIVAS A ASPECTOS AGRONÓMICOS	14
4. PUBLICACIONES RELATIVAS A ASPECTOS DE SALUD PÚBLICA ..	30
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	36
6. BIBLIOGRAFÍA	38

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
2.1 Lineamientos para el Uso de Agua Residual Tratada en Agricultura Según la World Health Organization (WHO 1989)	6
2.2 Límites Máximos Permisibles para Contaminantes Básicos en Aguas Residuales para Uso Agrícola (Adaptado de SEMARNAT 1996)	9
2.3 Límites Máximos Permisibles para Metales Pesados y Cianuros en Aguas Residuales para Uso Agrícola (Adaptado de SEMARNAT 1996)	9
2.4 Límites Máximos Permisibles para Coliformes Fecales (CF) y Huevos de Helminto en Aguas Residuales para Uso Agrícola (Adaptado de SEMARNAT 1996)	10
2.5 Recomendaciones para el Uso de Agua Residual Tratada en Agricultura Según Blumenthal <i>et al.</i> (2000)	11
2.6 Distritos de Riego en México que Comprenden las Superficies más Grandes Irrigadas con Aguas Residuales (Adaptado de Peasey <i>et al.</i> 2000)	12

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
2.1 Localización de los Distritos de Riego que Usan Aguas Residuales ..	13

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

En el tiempo presente, el tema del agua tratado en cualquiera de sus mil y una facetas es algo que involucra siempre muchas necesidades y preocupaciones que son urgentes de atender, en aras de solucionar problemas derivados de su uso y aprovechamiento. Tan es así, que se puede constatar en el ámbito mundial que las investigaciones científicas y la implementación de tecnologías de punta para eficientar su uso, ocupan un primerísimo lugar. En definitiva es palpable que la cultura para el aprovechamiento racional y responsable de este recurso hoy en día está vigente, y corresponde a todos por obligación entenderla y difundirla.

El agua que existe en nuestro planeta desde hace millones de años, hizo nacer la vida, que desde entonces ha dependido de ella. La Tierra contiene aproximadamente 1.4 millones de km³ de agua, de la cual el 97.4% es agua de mar o agua salada; cerca de tres cuartas partes del 2.6% restante están en los casquetes polares; el agua dulce disponible se reduce al 0.001% del total. Aproximadamente el 70% de los cuerpos de los organismos vivos están compuestos por este líquido. En síntesis, el valor del agua está en que es fundamental e irremplazable para el desarrollo de la vida.

A pesar de vivir en un planeta cuyo nombre, debido a la abundancia del elemento, debería de ser Agua en lugar de Tierra, el mundo está experimentando una creciente escasez y no es estrictamente por la falta de este recurso, sino porque no se encuentra en los lugares en donde se le necesita y muchas veces cuando se le encuentra su calidad está tan degradada que es inutilizable. Se sabe que a causa del calentamiento global, en términos generales las lluvias han aumentado, los caudales de los ríos son más erráticos pero no han disminuido y el balance del agua subterránea no ha variado significativamente (Antón y Díaz 2000).

Las ciudades necesitan cantidades enormes de agua para la realización de sus actividades, lo cual produce un caudal de este elemento que es llamado aguas residuales; una definición más precisa de este concepto dice que son una combinación de aguas y líquidos procedentes de casas habitación, instituciones, comercios e industrias; a las que eventualmente se les adicionan aguas subterráneas, superficiales y pluviales. Esta “agua de desecho” lleva consigo contaminación química y biológica (patógenos), así como partículas y sólidos en suspensión, que al ser usada ocasiona problemas muy serios de salud pública.

A causa de la escasez de agua de buena calidad para usarse en las actividades humanas, se precisa de desarrollar tecnologías que permitan reusar de forma segura las aguas residuales, es decir, sin que esto ocasione los consabidos problemas de salud en los seres vivos, de contaminación y de

deterioro del medio; pero aún y cuando existen un buen número de problemas a resolver antes de lograr este fin, es indudable que las aguas residuales son un valioso recurso que se debe emplear siempre que sea posible, pero tomando en cuenta las medidas de protección sanitarias. La preocupación de los gobiernos en este sentido, se refleja en la elaboración de toda una normatividad y reglamentación al respecto, así como de acciones tendientes a eficientar la administración del agua (WHO 1989, Ayres and Mara 1996, SEMARNAT 1996, Peasey *et al.* 2000, Carr 2005, Sandoval-Minero 2005).

Uno de los usos posibles que se pueden dar al agua residual, es el riego agrícola, lo cual está amalgamado con los temas de salud, inocuidad alimentaria y contaminación del medio ambiente. El empleo de esta opción no es reciente, se sabe a través de la historia que las culturas más antiguas en algún momento de su desarrollo aprovecharon este recurso con fines agrícolas, y que por supuesto se desconocía la inmensa mayoría de los inconvenientes que esto implicaba (Metcalf & Heddy, Inc. 1994).

Debido a la creciente necesidad de productos agrícolas y de alimentos en el mundo y al papel fundamental que juega el riego de los cultivos en el proceso de la producción en el campo, se utilizan las aguas residuales para este fin, lo que ha originado toda una disciplina científica para estudiar de forma sistemática la factibilidad de uso, así como los efectos y consecuencias (Cifuentes *et al.* 1993, Srikanth and Naik 2004, Tang *et al.* 2004).

En nuestro país, de la gran cantidad de aguas residuales que producen las ciudades, se usan volúmenes importantes para riego, y en la mayoría de los casos sin ningún tratamiento adecuado que las habilite para ser empleadas con este propósito.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General. El autor aspira a formar una reseña sobre el uso de aguas residuales para riego en la agricultura mexicana, mediante la revisión de artículos científicos publicados en revistas internacionales de alto impacto, dando un énfasis a los trabajos publicados del año 2000 al 2006.

1.2.2 Objetivos Particulares:

- Presentar un panorama histórico y actualizado sobre las aportaciones en este tópico en Nuestro País.
- Poner a disposición de técnicos e investigadores una información que coadyuve a la ejecución de proyectos de desarrollo y de investigación científica.
- Insistirles a los líderes políticos sobre la necesidad de contar con plantas de tratamiento para recuperar las aguas residuales en comunidades que lo ameriten.
- Hacer un llamado a la conciencia de la población para que entienda la gravedad del problema y por consiguiente se comprometa en la medida de sus posibilidades con la solución.

2. CONSIDERACIONES FUNDAMENTALES EN EL USO DE AGUAS RESIDUALES PARA RIEGO DE CULTIVOS

2.1 Normatividad

En el año de 1989 la World Health Organization (WHO) publicó sus lineamientos con el fin de contribuir a normar el uso de aguas residuales con propósitos agrícolas, para el efecto se tomaron en cuenta evidencias de riesgos en la salud humana, generadas a través de estudios científicos llevados a cabo en varias partes del mundo. En la actualidad al no existir una reglamentación propia en cada país, sobre todo tratándose de los menos desarrollados, muchos han optado por tomar en consideración estos lineamientos; haciendo algunos ajustes basados en las particularidades de cada nación (Cuadro 2.1).

Sin embargo también algunos países del primer mundo, específicamente de la Comunidad Económica Europea muestran influencia en la reglamentación presentada en este rubro, un ejemplo es Francia en donde se definieron las categorías de las aguas de forma análoga a las de WHO, incluyendo los límites microbiológicos; y complementando lo anterior con unas reglas muy estrictas en su aplicación, por ejemplo, evitando que el agua residual al ser aplicada tenga contacto directo con frutas y vegetales que se consumen crudos.

Cuadro 2.1 Lineamientos para el Uso de Agua Residual Tratada en Agricultura Según la World Health Organization (WHO 1989)

Condiciones de reuso	Grupo de exposición	Nemátodos intestinales (Media aritmética huevos/L)	Coliformes fecales (Media geométrica CF/100 mL)	Tratamiento necesario para alcanzar el lineamiento
Riego de cultivos que son consumidos crudos	Trabajadores y consumidores	≤ 1	≤ 1 000	Serie de lagunas de estabilización o tratamiento equivalente
Riego de cultivos industriales, cereales, forrajes y árboles	Trabajadores	≤ 1	No hay recomendación	Retención en lagunas de estabilización por 8-10 días o tratamiento equivalente
Mismos cultivos que en la anterior, pero sin exposición de humanos	Ninguno	No aplica	No aplica	Pretratamiento requerido por el sistema de riego o cuando menos sedimentación primaria

2.2 Normatividad Mexicana

En nuestro país se ha trabajado en proponer e implementar una normatividad en torno a los problemas de las descargas de aguas residuales, y como consecuencia se han aprobado diversas normas sobre la materia a través del tiempo, tales como las Normas Oficiales Mexicanas para descargas de aguas residuales a cuerpos receptores: NOM-001-ECOL-1993 a NOM-033-ECOL-1993, publicadas en el Diario Oficial de la Federación el 18 de octubre de

1993; NOM-063-ECOL-1994 a NOM-065-ECOL-1994 publicadas en el Diario Oficial de la Federación el 5 de enero de 1995; NOM-066- ECOL-1994 a NOM-068-ECOL-1994, publicadas en el Diario Oficial de la Federación el 6 de enero de 1995; NOM-069-ECOL-1994 y NOM-070- ECOL-1994, publicadas en el Diario Oficial de la Federación el 9 de enero de 1995; y NOM-071-ECOL-1994 a NOM-073-ECOL-1994, publicadas en el Diario Oficial de la Federación el 11 de enero de 1995.

Una de las normas que tratan específicamente sobre el uso de aguas residuales para el riego y que actualmente está ya abrogada, pero que por un tiempo marcó algunos lineamientos para este propósito fue la Norma Oficial Mexicana NOM-033-ECOL-1993, que establece las condiciones bacteriológicas para el uso de aguas residuales de origen urbano o municipal o de la mezcla de estas con la de los cuerpos de agua, en el riego de hortalizas y productos hortofrutícolas (SEDESOL 1993).

Esta norma fue implementada tomando en cuenta que estas aguas eran utilizadas en gran proporción para el riego de cultivos hortícolas, hortofrutícolas y otros productos que se consumen crudos, y considerando que las mismas contienen microorganismos patógenos que pueden afectar la salud humana, por lo que es necesario determinar las condiciones bacteriológicas para su uso y asegurar una calidad de agua satisfactoria en este sentido.

En relación con la norma anterior, las restricciones de las aguas residuales que se dispusieran a través de su uso en el riego de hortalizas de consumo crudo, en lo relativo a parámetros bacteriológicos se clasificaron en los siguientes tipos para efectos de determinar las clases de cultivos no permitidos: Tipo 1, la que contenía menos de 1 000 coliformes totales por cada 100 mL y ningún huevo de helminto viable por litro de agua; Tipo 2, la que contenía de 1 a 1 000 coliformes fecales por cada 100 mL y cuando más un huevo viable de helminto por litro de agua; Tipo 3, la que contenía de 1 001 a 100 000 coliformes fecales por cada 100 mL; y Tipo 4, la que contenía más de 100 000 coliformes fecales por cada 100 mL.

El documento que actualmente señala los lineamientos para el uso de aguas residuales para riego es la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (SEMARNAT 1996).

La norma mencionada en el párrafo anterior se implementó con el objeto de proteger la calidad y posibilitar los usos de las aguas residuales, y es de observancia obligatoria para los responsables de las descargas; señala prácticamente tres parámetros a considerar para el reuso de estas aguas en el riego de cultivos, y son: (1) contaminantes básicos, (2) metales pesados y cianuros y (3) coliformes fecales y huevos de helminto (Cuadros 2.2, 2.3 y 2.4).

Cuadro 2.2 Límites Máximos Permisibles para Contaminantes Básicos en Aguas Residuales para Uso Agrícola (Adaptado de SEMARNAT 1996)

Parámetros mg/L (Excepto cuando se especifique)	Ríos		Embalses naturales y artificiales		Suelo	
	PM	PD	PM	PD	PM	PD
Temperatura °C	na	na	40	40	na	na
Grasas y aceites	15	25	15	25	15	25
Materia flotante	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
Sólidos sedimentables mL/L	1	2	1	2	na	na
Sólidos suspendidos totales	150	200	75	150	na	na
Demanda bioquímica de oxígeno	150	200	75	150	na	na
Nitrógeno total	40	60	40	60	na	na
Fósforo total	20	30	20	30	na	na

PM: Promedio mensual.

PD: Promedio diario.

na: No aplica.

Cuadro 2.3 Límites Máximos Permisibles para Metales Pesados y Cianuros en Aguas Residuales para Uso Agrícola (Adaptado de SEMARNAT 1996)

Parámetros mg/L (Medidos de manera total)	Ríos		Embalses naturales y artificiales		Suelo	
	PM	PD	PM	PD	PM	PD
Arsénico	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	0.4
Cadmio	0.2	0.4	0.2	0.4	0.05	0.1
Cianuros	1.0	3.0	2.0	3.0	2.0	3.0
Cobre	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0
Cromo	1.0	1.5	1.0	1.5	0.5	1.0
Mercurio	0.01	0.02	0.01	0.02	0.005	0.01
Níquel	2.0	4.0	2.0	4.0	2.0	4.0
Plomo	0.5	1.0	0.5	1.0	5.0	10.0
Zinc	10.0	20.0	10.0	20.0	10.0	20.0

PM: Promedio mensual.

PD: Promedio diario.

Cuadro 2.4 Límites Máximos Permisibles para Coliformes Fecales (CF) y Huevos de Helminto en Aguas Residuales para Uso Agrícola
(Adaptado de SEMARNAT 1996)

Riego	CF/100 mL (NMP)		Helmintos Huevos/L
	Promedio mensual	Promedio diario	
Restringido	1 000	2 000	≤ 5
No Restringido	1 000	2 000	≤ 1

NMP: Número más probable.

2.3 Recomendaciones a la Normatividad

En el año 2000 la London School of Hygiene and Tropical Medicine, en conjunción con Instituciones Mexicanas, Indonecias, Brasileñas y Portuguesas, revisaron los lineamientos de la WHO y basados en estudios más recientes publicaron unas recomendaciones con la intención de aportar elementos para que esta reglamentación se actualice (Blumenthal *et al.* 2000).

De acuerdo a las recomendaciones mencionadas con anterioridad, existen tres puntos a considerar para el establecimiento de los lineamientos de calidad microbiológica y estándares para el reuso de agua residual tratada para riego: (1) La ausencia de organismos fecales indicadores, (2) La población expuesta a los efectos de actividades con esta agua y (3) Un modelo estimador de riesgos que defina un nivel aceptable del mismo. Para el Punto 2, se usaron estudios epidemiológicos y de transmisión de patógenos microbiales; y complementando con el Punto 3, de manera conjunta también se empleó un modelo para evaluar los riesgos de patógenos seleccionados (Cuadro 2.5).

Cuadro 2.5 Recomendaciones para el Uso de Agua Residual Tratada en Agricultura Según Blumenthal *et al.* (2000)

Condiciones de reuso	Grupo de exposición	Nemátodos intestinales (Media aritmética huevos/L)	Coliformes fecales (Media geométrica CF/100 mL)	Tratamiento necesario para alcanzar la recomendación
Riego sin restricciones. Riego de cultivos que son consumidos crudos, campos deportivos y parques públicos	Trabajadores y consumidores	≤ 0.1	$\leq 1\ 000$	Serie de lagunas de estabilización, almacenamientos secuenciales y depósitos de tratamiento o tratamiento equivalente (e. g. filtración y desinfección)
Riego con restricciones. Riego de cultivos industriales, cereales, forrajes y árboles	Trabajadores mayores de 15 años	≤ 1	$\leq 10^5$	Serie de lagunas de estabilización, almacenamientos secuenciales y depósitos de tratamiento o tratamiento equivalente (e. g. filtración)
	Trabajadores incluyendo menores de 15 años	≤ 0.1	$\leq 1\ 000$	Igual que en el primer caso
Mismos cultivos que en la anterior, pero sin exposición de humanos	Ninguno	No aplica	No aplica	Pretratamiento requerido por el sistema de riego o cuando menos sedimentación primaria

2.4 Distritos de Riego que Usan Agua Residual

En México existen más de 40 Distritos de Riego que utilizan aguas residuales para irrigar 350 000 ha de cultivos. En el Cuadro 2.6 están

consignados los Distritos que comprenden las superficies más grandes (a partir de 800 ha); así mismo en la Fig. 2.1, como un complemento al Cuadro antes mencionado se muestran las localizaciones.

Según la Comisión Nacional del Agua (CNA), únicamente el 11% de las aguas residuales que se usan para riego reciben algún tipo de tratamiento y en todos los Distritos que emplean este recurso, se conmina a los usuarios a hacer riego restringido, es decir, regar únicamente forrajes, cultivos industriales, etc. (CNA 2005).

Cuadro 2.6 Distritos de Riego en México que Comprenden las Superficies más Grandes Irrigadas con Aguas Residuales (Adaptado de Peasey *et al.* 2000)

Distrito de Riego	Superficie (ha)	Volumen de Agua Usado (Miles de m ³)		
		Sin tratar	Tratado	Total
010 Culiacán, Sin.	800	4 144	0	4 144
009 Cd. Juárez, Chih.	7 503	117 521	0	117 521
017 Laguna Coah-Dgo	1 600	5 600	0	5 600
029 Xicoténcatl, Tamps.	2 300	19 504	0	19 504
035 La Antigua, Ver.	1 000	12 300	0	12 300
082 Río Blanco, Ver.	13 000	294 123	2 667	296 790
003 Tula, Hgo.	57 973	1 075 979	0	1 075 979
016 Edo. de Morelos	23 000	302 493	34 687	337 180
033 Edo. de México	5 498	18 693	0	18 693
088 Chiconautla, Méx.	3 123	25 202	0	25 202
100 Alfajayucan, Hgo.	24 745	373 649	0	373 649
013 Edo. de Jalisco	13 077	153 702	0	153 702
024 Chapala, Mich.	10 469	6 269	0	6 269
030 Valsequillo, Pue.	20 600	32 766	227 000	259 766
045 Tuxpan, Mich.	4 300	49 497	5 500	54 997
056 Atoyac, Tlax.	3 800	17 504	7 500	25 004
061 Zamora, Mich.	2 000	21 000	0	21 000
087 Rosario, Mich.	33 080	303 013	0	303 013
097 L. Cárdenas, Mich.	21 899	286 439	0	286 439
099 Quitupan, Mich.	5 000	5 550	0	5 550

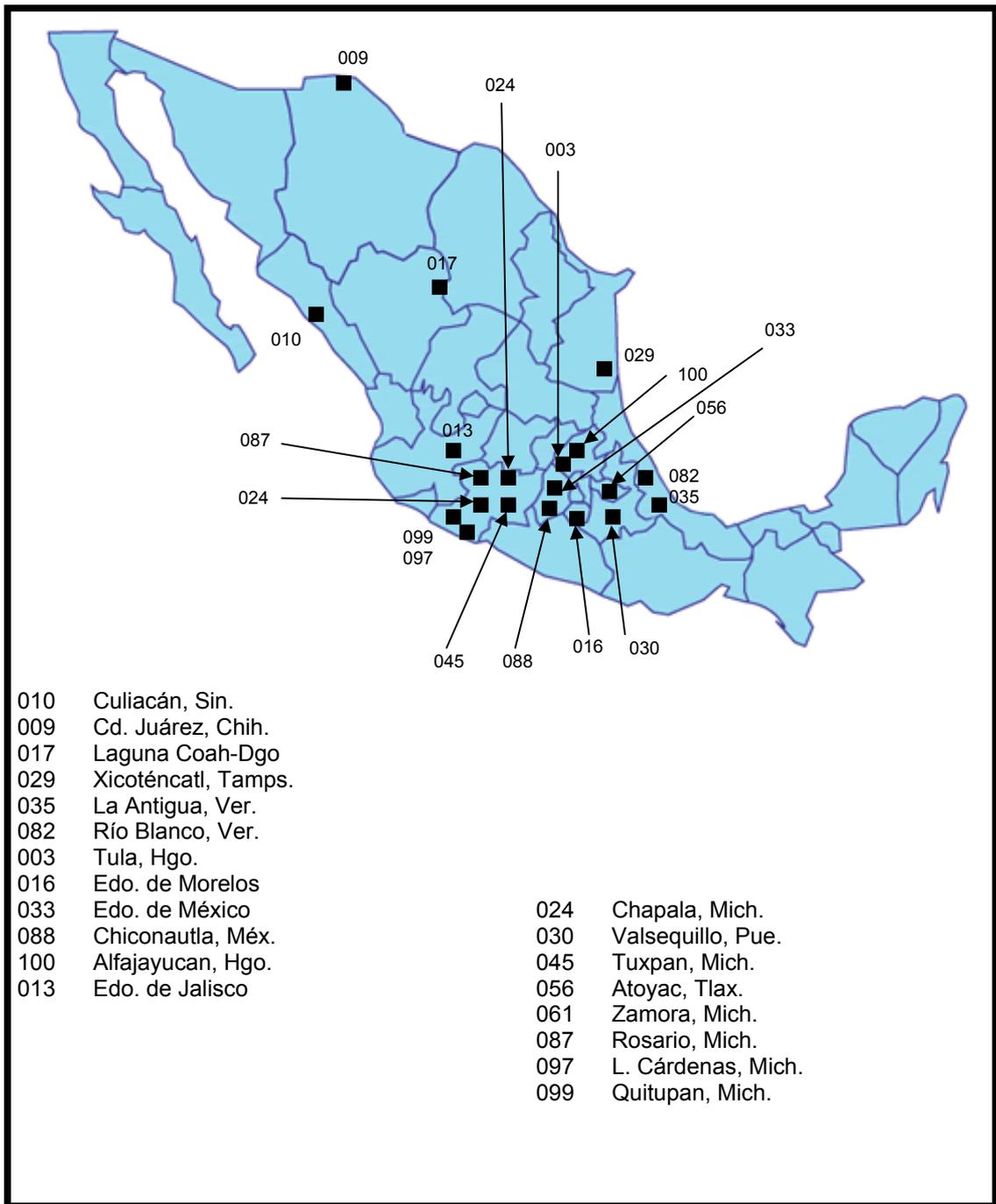


Figura 2.1 Localización de los Distritos de Riego que Usan Aguas Residuales

3. PUBLICACIONES RELATIVAS A ASPECTOS AGRONÓMICOS

Un procedimiento de extracción secuencial fue usado para separar Cu, Cd, Pb y Zn, en cuatro perfiles de suelo obtenidos del Distrito de Desarrollo Rural 063, ubicado en el estado de Hidalgo, el cual ha sido regado por mucho tiempo con aguas residuales de la Ciudad de México.

Los rangos de contenido de metales pesados fueron en Cu de 8.9 a 86.5 mg kg⁻¹; Cd de 0.86 a 5.07 mg kg⁻¹; Pb de 18.1 a 131.7 mg kg⁻¹; y Zn de 101.0 a 235.5 mg kg⁻¹. Las concentraciones más altas de metales pesados se observaron en las capas superficiales de los perfiles. El fraccionamiento químico secuencial señaló que los cuatro metales estuvieron asociados predominantemente con la fracción orgánica de la mayoría de las muestras de suelo.

Los contenidos en todas las fracciones de los cuatro metales mostraron una disminución con la profundidad, lo cual se explica mediante las variaciones de contenido de materia orgánica y CaCO₃ en las diferentes capas del suelo. Esas propiedades del suelo fueron también las variables más importantes en la disponibilidad biológica de los metales (Flores *et al.* 1997).

Se efectuó una evaluación para determinar la efectividad del tratamiento primario avanzado APT, que es una opción para cuando existe variación en la calidad y cantidad de agua residual generada, tal es el caso de la Cd. de México, cuyo flujo varía de 45 a 300 m³/s, dependiendo de la época seca o de lluvia, respectivamente.

Los datos presentados en este trabajo muestran lo apropiado del APT, que consiste en determinar parámetros relacionados con la salud (bacterias y huevos de helminto), más que los contenidos orgánicos y de nutrientes necesarios para propósitos agrícolas. La evaluación indica que se podría usar el agua residual para algunos tipos de cultivos, pero debido a altos contenidos de coliformes fecales 1.2×10^6 CF/100mL, es necesario un proceso adicional de desinfección (Jiménez-Cisneros y Chávez-mejía 1997).

En el Valle de Cd. Juárez, Chih., se estudiaron los efectos de aplicar una mezcla de aguas residuales sin tratar y agua apta para riego del Río Bravo y de pozos profundos; y los resultados señalaron que la dilución reduce muy escasamente los riesgos asociados con el uso de agua residual sin tratar.

Los niveles de coliformes fecales fueron altos ($> 11^7$ coliformes fecales/100 mL); respecto a los metales pesados, las concentraciones fueron bajas, en cambio la mezcla si degradó un volumen significativo de agua de buena calidad, procedente del Río Bravo y de los acuíferos subterráneos, por lo que se concluyó que no es una buena práctica (Vázquez-Montiel *et al.* 1999).

Para determinar el efecto del riego con aguas residuales en la calidad del acuífero profundo, se realizó un estudio en los valles de León, Guanajuato y del Mezquital, tomando en cuenta parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. En sedimentos superficiales de ambos sitios, fueron detectadas coliformes fecales. En el Valle del Mezquital, la contaminación del acuífero profundo fue influida por factores estacionales, con concentraciones elevadas de coliformes fecales durante la época de lluvia.

Por otra parte las concentraciones de nitratos fueron altas, lo cual señala la influencia del riego para lixiviarlos. Se deben tomar medidas para contrarrestar los efectos de esta situación, como por ejemplo construir lagunas de sedimentación, revestimiento de canales y prácticas de manejo del riego (Gallegos *et al.* 1999).

En la región del Valle del Mezquital se estudió la efectividad de los tratamientos naturales que se dan al agua residual que ahí se recibe, lo anterior fue usando los criterios de 24 metales traza, 67 componentes orgánicos semivolátiles objetivo básicos/neutrales/ácidos (BNA), componentes orgánicos semivolátiles no objetivo, nitratos, 23 pesticidas clorados y un conglomerado de 20 bifenilos policlorados (PCB).

Los resultados sugieren que la región está actuando como un enorme sistema de filtro abierto, el depósito principal como una laguna de estabilización de residuos; y los canales son demasiado largos y estrechos. Los

niveles de BNA en la superficie del agua después de pasar por el depósito, fueron mucho menores que antes, mientras que los niveles en el agua profunda fueron significativamente más bajos que en la superficie. Todos los niveles de nitratos en el agua profunda excedieron los estándares establecidos para el agua de beber y fueron más grandes que los de la superficie. Los niveles de metales en el agua profunda estuvieron debajo de los estándares establecidos para el agua potable, y los niveles en la superficie se excedieron únicamente en varios metales. Se encontraron niveles bajos y moderados de pesticidas organoclorados y PCB (Downs *et al.* 2000).

Se evaluaron los niveles de contaminación por metales pesados en suelos de 16 sitios del Valle de Atlixco, en el estado de Puebla que se han sometido al riego con aguas residuales por más de 30 años del Río Atoyac. Se realizó un monitoreo en el trayecto Río Frío-Atlixco durante un año para evaluar la calidad del agua; y se observó que las aguas tienden a la alcalinidad con un pH promedio de 7.7.

Los metales pesados solubles se detectaron en el siguiente orden: Fe>Pb>Mn>Cr>Cd con valores promedio de 0.67, 0.21, 0.11, 0.04 y 0.03 mg L⁻¹, respectivamente. Se encontró que el Mn es el único metal que excede los límites máximos permisibles y que el Cr y el Cd exceden dichos límites solo al final del trayecto monitoreado, después del punto donde se incorporan las aguas residuales de la ciudad de Puebla.

Los suelos por su contenido alto de Ca y Mg se clasifican como alcalinos y la capacidad de intercambio catiónico total, materia orgánica, nitrógeno total y fósforo asimilable fluctuaron de bajos a altos. Los metales pesados extractables se detectaron en el siguiente orden: Mn>Fe>Pb>Cd>Cr con valores promedio de 85.08, 68.63, 4.22 y 0.30 mg kg⁻¹ y no detectable, respectivamente. Llamen la atención los valores de Cd y Pb, los cuales pueden repercutir en la cadena trófica.

Los metales totales se detectaron en el siguiente orden Fe>Mn>Cr>Pb>Cd con valores promedio de 1451.3, 303.6, 195.1, 56.0 y 4.14 mg kg⁻¹, respectivamente; el Cr se encontró en concentraciones fitotóxicas, en todos los sitios y el Cd y Pb solamente se detectaron en cantidades fitotóxicas en la mayoría de los sitios de riego y en aquellos donde se aplican de forma intensa los agroquímicos. Los valores de metales pesados indican que se han acumulado a través del riego aún y cuando su concentración en forma soluble es baja en el agua del río (Méndez-García *et al.* 2000).

Como consecuencia del uso directo del agua residual para riego en el Valle del Mezquital, Hgo., se han acumulado metales pesados en los suelos y en el año de 1996 se realizó un estudio en la región, con la finalidad de diagnosticar el proceso de acumulación y variabilidad en las concentraciones de cadmio, níquel y plomo, en agua y suelo, para los cultivos de maíz, trigo y alfalfa.

Con la información que se obtuvo se destacó la necesidad de normas que establezcan la acumulación tolerable de metales pesados en el suelo; se obtuvieron muestras de agua, suelo, tejido vegetal y grano en las tres especies y en nueve sitios con variación en la antigüedad del uso del agua residual. La concentración total de plomo fue de 0.13 mg L^{-1} en el agua del Gran Canal de Desagüe, mientras que en el agua proveniente de la presa Hendó la concentración fue de 0.054 mg L^{-1} .

En trigo, el cociente que resulto de dividir la concentración de cadmio del tejido foliar entre la del grano, disminuyó al aumentar la edad de la planta en cuatro de siete sitios. En uno de los sitios, el cociente fue de 1.5 en marzo y de 0.9 en abril, lo que muestra que existió transferencia del cadmio al grano y de éste a la cadena alimenticia. El plomo permaneció en el follaje del trigo en cinco de siete sitios; el cociente descrito aumento de 0.8 en marzo a 2.4 en abril. El cociente de níquel aumentó de marzo a abril en los siete sitios de muestreo por lo cual se infiere que hubo una transferencia de níquel hacia el grano (Vázquez-Alarcón *et al.* 2001).

El uso de aguas residuales como fuente de N para cultivos forrajeros se ha usado en el Valle del Mezquital desde hace mucho tiempo, pero su impacto en el ambiente no se ha reportado. Se realizó este estudio para cuantificar los flujos de N del agua residual aplicada a suelos con forrajes e irrigados durante tiempos diferentes.

Se hizo un ensayo de invernadero usando columnas de suelo de la región en las cuales se sembró maíz forrajero; dichas columnas se diseñaron para medir la volatilización y la mineralización del N *in situ*.

Para medir la absorción de N por planta se empleó sulfato de amonio marcado y además en el laboratorio se determinó la desnitrificación, fijación de amonio y mineralización potencial. La desnitrificación ($197.6 \text{ kg de N ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$) y volatilización ($18.6 \text{ kg de N ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$) representó la cantidad mayor de N que aquella total absorbida por el maíz ($126.3 \text{ kg de N ha}^{-1}$). La absorción de nitrógeno del agua residual fue solo del 4% del N acumulado por el cultivo.

No se detectó lixiviación de nitratos pero si se encontró una acumulación en la parte inferior de las columnas. La pérdida gaseosa del N del suelo aumentó con el número de años con riego con agua residual (Vivanco-Estrada *et al.* 2001).

En el Valle del Mezquital, se tomaron muestras de las aguas residuales en 45 estaciones de muestreo, en la primavera y otoño de 1998 y 1999. Se calculó el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) para la relación de adsorción de sodio (RAS_{aj}) y para las constantes de selectividad iónica ($K_{G \text{ MIN}}$ y $K_{G \text{ MAX}}$).

En el cálculo del PSI se utilizaron las reacciones químicas de equilibrio estequiométricas y heterogéneas. Los parámetros medidos y

calculados en cada muestra fueron: (1) Conductibilidad eléctrica 2.0-3.0 dS m⁻¹; (2) Composición iónica Cl-SO₄-HCO₃; la concentración de bicarbonatos fue de 6.14-10.29 mmol_c L⁻¹; (3) Valores de pH = 6.9-8.6.

Estas aguas son de composición Cl⁻-SO₄²⁻-HCO₃⁻, y el alto contenido de bicarbonatos (valor medio = 9.65 mmol_c L⁻¹) modifica los valores de RAS, debido a los procesos de hidrólisis y precipitación del ión calcio Ca²⁺. Evaluar el RAS de las aguas residuales con diferentes esquemas de conceptualización permite establecer una amplitud de valores útiles para el cálculo potencial de PSI en los suelos (Velázquez-Machuca *et al.* 2002).

El riego con aguas residuales causa un efecto fertilizador e incrementa la producción, pero también ocasiona concentraciones de metales pesados y riesgos de patógenos para la población; en general los riesgos asociados con el uso de aguas residuales para riego se reducen si el agua es tratada, pero también repercute en una disminución de la materia orgánica, fósforos y nitrógeno aprovechable para las plantas. Se encontró que si se aplica agua residual tratada, el nivel de nitrógeno es tan bajo que será necesaria una aplicación para cumplir los requerimientos de los cultivos y así mantener la producción (Ramírez-Fuentes *et al.* 2002).

El uso de aguas residuales recuperadas en la agricultura puede permitir a las comunidades que se encuentran a lo largo de la frontera de México y Estados Unidos, eficientar este recurso y reducir costos en los

tratamientos. Sin embargo los metales que descargan las industrias perjudican la calidad de los productos agrícolas, desde el punto de vista de la inocuidad alimentaria.

Se examinaron las concentraciones de metales en sedimentos de sistemas de canales abiertos por donde fluye agua del Río Grande y agua de las descargas de las comunidades fronterizas; del lecho de los canales se colectaron sedimentos de seis segmentos de canal que empiezan en la franja Cd. Juárez-El Paso, con dirección aguas abajo, y divididos en tramos de 9 a 24 km.

Los sedimentos se analizaron para metales pesados Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn, y se observó que raramente sobrepasaron los 20 mg/kg. Los modelos geoestadísticos no señalaron significancia para la variabilidad espacial de los metales. Los picos en las concentraciones de metales frecuentemente coincidieron con el crecimiento de las comunidades rurales, sin embargo la mayoría de las concentraciones de metales estuvieron dentro de lo convencional y no fueron lo suficientemente altos para perjudicar la calidad de los productos agrícolas. Para muestreos posteriores se sugiere que se hagan intervalos de entre 1 y 0.13 km (Assadian *et al.* 2003).

En el Distrito de Riego de Valsequillo, Pue., se ha usado agua residual y agua subterránea para regar cultivos durante 50 años. Se hizo este estudio para evaluar el impacto de esta práctica en el agua subterránea del

acuifero poco profundo, mediante mediciones hidrogeológicas, microbiológicas, hidrogeoquímicas y evidencias isotópicas.

El acuifero poco profundo consiste de rocas volcánicas sedimentarias del terciario superior con una matriz rica en calcita. El agua subterránea de los pozos cercanos al canal de agua residual tuvo concentraciones totales de coliformes, similares a las de la propia agua residual (100 CF/100 mL). En general los datos muestran claramente un proceso de mezclado entre el agua residual y el agua subterránea; lo cual demuestra la interacción y los procesos hidroquímicos entre las dos partes (Domínguez-Mariani *et al.* 2004).

Se realizó un trabajo para determinar la factibilidad técnica y económica de diferentes proyectos de recuperación y reuso de aguas residuales en la cuenca del Río Apatlaco, afluente del Amacuzac, que a su vez es uno de los contribuyentes más importantes del caudaloso Río Balsas.

Se desarrolló una metodología novedosa que permite decidir la conveniencia del proyecto basada en el criterio del valor presente neto del flujo de efectivo durante la vida útil del proyecto. Los resultados obtenidos señalan la factibilidad de un reuso industrial en el municipio de Jiutepec y un reuso agrícola en los municipios de Zacatepec y Emiliano Zapata; ubicados todos en el estado de Morelos (Moeller-Chávez *et al.* 2004).

Ensenada B. C., cuenta con tres plantas de tratamiento de aguas residuales y la más grande produce 316 m³/seg y cumple con los estándares más rigurosos de la legislación mexicana es este sentido. El 2% se usa para regar campos deportivos y jardines públicos, pero el agua recuperada podría también ser usada para riego de cultivos que no sean para consumo humano y/o para recarga del acuífero.

Esta investigación detectó que es el momento para que las instituciones del Gobierno, científicas y organismos no gubernamentales participen conjuntamente para garantizar el correcto y responsable uso del agua residual recuperada de esta ciudad (Mendoza-Espinosa *et al.* 2004).

En el Distrito de Riego 03 (Valle del Mezquital), debido al uso de aguas residuales para irrigación se han acumulado metales pesados en la fracción orgánica del suelo. Con un estudio de campo se evaluó el efecto de este tipo de riego en la calidad de materia orgánica del suelo y la movilidad de Cu y Cd.

En una columna experimental se probó si el agua afecta la lixiviación de ambos metales y si el carbón orgánico disuelto (DOC) puede ser extraído del suelo que ha sido regado con aguas residuales sin tratar durante tanto tiempo.

El estudio muestra que este tipo de riego, a largo plazo incrementa la fracción de carbón mineralizable y las concentraciones de DOC. Las

concentraciones de Cu y Cd extraíbles también se incrementan y se correlacionan con DOC. El tratamiento reduce la lixiviación del Cd, pero no tuvo efecto sustancial en la lixiviación del Cu (Herre *et al.* 2004).

Se realizó un estudio que muestra que la estructura hidogeológica y geológica de la cuenca del Mezquital afecta la calidad del agua subterránea. Una exploración geológica con análisis de aguas subterráneas y estratigrafía explicó la tendencia de la calidad del agua subterránea. Se encontraron altas concentraciones de nitratos, que fueron medidas cerca de fallas y fracturas que actúan como sitios de recarga de aguas residuales en el acuífero poco profundo. (Cervantes-Medel y Armienta 2004).

El presente trabajo fue para evaluar la acumulación de los elementos traza boro, cadmio, cromo, mercurio, plomo y arsénico en suelos agrícolas de la Zona 1 del Distrito de Riego 03 en el estado de Hidalgo; los suelos de esta Zona han sido irrigados con agua residual cruda por un promedio de 20 años. Se observó una correlación positiva entre los contenidos de carbón orgánico en suelos y el tiempo de irrigación.

Las concentraciones totales de los elementos analizados fueron 0.51-1.89 mg Cd kg⁻¹, 11.59-27.42 mg Cr kg⁻¹, 3.99-47.08 mg Pb kg⁻¹ y 9.2-123.8 mg B kg⁻¹. Las muestras del perfil 0-30 cm fueron obtenidas usando un método Tessier modificado para un esquema de seis fracciones (F0) fácilmente soluble (F1) intercambiable (F2) ligado a carbonatos, (F3) asociado con óxidos

de hierro y manganeso, (F4) ligado a materia orgánica y sulfuros y, (F5) la fracción residual.

En general los elementos estuvieron distribuidos en las fracciones F0, F4 y F5 y las concentraciones totales de As y Hg, estuvieron debajo de los límites de detección 0.03 y 0.01 mg kg⁻¹ respectivamente, excepto por un valor de 0.77 mg Hg kg⁻¹ en uno de los suelos. Las concentraciones totales de Cr y Pb no excedieron los niveles máximos permisibles de la regulación de la Unión Europea mientras que del Cd estuvo en el límite. Se encontró una relación lineal creciente en las concentraciones totales de metales y el tiempo de irrigación.

En este estudio varios cultivos fueron cosechados y mostraron contenidos de Cd y Pb más altos que aquellos recomendados por los lineamientos alemanes y holandeses. Se concluyó que los suelos poseen un riesgo potencial en la cadena trófica y se deben imponer restricciones para el cultivo de productos que acumulan metales pesados por ejemplo nopal, cebollas, ajos, lechuga, papa, betabel y nabo (Lucho-Constantino *et al.* 2005).

En el Distrito de Riego 003 en el estado de Hidalgo se evaluó la acumulación y distribución de elementos mayores y elementos traza en los suelos irrigados con agua residual cruda durante un tiempo que promedia los 20 años. Se tomaron muestras de el perfil 0-30 cm y el total de concentraciones medidas estuvieron en los rangos de 675-1 176 mg K kg⁻¹, 277.9-1 001 mg Na

kg⁻¹, 6 708-81 854 mg Ca kg⁻¹, 23 800-106 974 mg Mg kg⁻¹, 9.2-123.8 mg B kg⁻¹, 0.6-1.9 mg Cd kg⁻¹, 11.6-27.4 mg Cr kg⁻¹, 3.9-47.0 mg Pb kg⁻¹.

Las concentraciones de As y Hg fueron muy bajas. Las concentraciones totales de Cd, Cr y Pb fueron generalmente menores a los niveles máximos permisibles de lo que señalan las regulaciones de la Unión Europea excepto para cadmio que estuvo en el rango europeo máximo permitido en dos suelos.

El análisis de datos multivariado (correlación de Pearson y componentes principales) confirman que existe una covarianza marcada entre los contenidos de boro y algunas variables ligadas a la salinidad de los suelos. Al parecer existe un problema de alto contenido de boro en los suelos, a pesar de que la salinidad fue alta solo para uno de ellos.

Se encontró una correlación significativa entre el tiempo de irrigación, el contenido total de plomo y el carbón orgánico; también se observó otra asociación entre el tiempo de riego y los contenidos totales de cadmio, cromo, boro y carbón orgánico (Lucho-Constantino *et al.* 2005).

Se realizó un trabajo en el Valle del Mezquital, Hgo. para evaluar la relación entre la acumulación de metales en suelos y plantas, y las propiedades físico-químicas de suelos irrigados con aguas residuales durante 50 y 100 años respectivamente.

Las propiedades del suelo como el pH y el carbón orgánico total (TOC), fueron determinados con métodos convencionales. Los metales traza Fe, Co, Ni, Cu, Zn y Pb, en plantas y suelo fueron determinados usando emisión de rayos X de partículas inducidas. Los contenidos más bajos de pH y TOC, se obtuvieron para suelos irrigados con aguas residuales durante 100 años, indicando una más alta biodisponibilidad de metales.

Esto no se reflejó en las plantas para la mayoría de los elementos reportados, pero Zn y Pb mostraron una absorción más alta en los terrenos irrigados durante 100 años en contraste con los de 50 años, indicando una dependencia al pH (Solís *et al.* 2005).

En Xochimilco, D. F. se usa desde tiempos remotos el sistema de “chinampas” para la producción agrícola. En la actualidad es un área densamente poblada y urbanizada con varias fuentes de contaminación que contribuyen a la degradación de la calidad del agua. El sistema de canales es recargado mediante una combinación de agua tratada y no tratada, así como de agua de lluvia durante la temporada. Más de cuarenta cultivos agrícolas, incluyendo vegetales, cereales y flores, son producidos en las “chinampas”.

Con el propósito de caracterizar la calidad del agua usada en el riego, se investigó con indicadores de contaminantes espaciales y temporales, tales como microorganismos y metales pesados. Los indicadores bacterianos (coliformes fecales y estreptococos fecales), fueron analizados mediante

procedimientos estándares y los metales pesados (Fe, Cu, Zn y Pb), fueron analizados mediante emisión de rayos X de partículas inducidas. Los sitios más contaminados, coinciden con las áreas más pobladas; se observó una variación en los dos tipos de contaminantes con un valor más alto durante la época lluviosa (Solís *et al.* 2006).

4. PUBLICACIONES RELATIVAS A ASPECTOS DE SALUD PÚBLICA

En este estudio se analizan problemas de salud pública, relacionados con el uso de aguas residuales en la agricultura de los distritos de riego 03 y 100 del centro de México. La investigación tuvo como objetivo evaluar el impacto de esta práctica en las enfermedades diarreicas e infecciones intestinales. La encuesta se aplicó en 2 049 viviendas de familias campesinas de zonas temporaleras, mismas que fueron clasificadas en los siguientes grupos: de alta exposición, exposición intermedia y baja exposición.

Los resultados obtenidos indican que el riesgo de infección por *Ascaris lumbricoides* en la población infantil, es mayor en los grupos de exposición alta e intermedia. Los niños de las familias altamente expuestas también mostraron mayor prevalencia de enfermedades diarreicas que los del grupo de control. Se espera que los resultados del estudio contribuyan a fundamentar las decisiones en los programas de reuso del agua residual (Cifuentes *et al.* 1993).

Se hizo un estudio epidemiológico de infecciones entéricas en comunidades agrícolas que usan agua residual para regar sus cultivos. Los

grupos de estudio fueron viviendas distribuidas en tres grupos, 848 ubicadas en terrenos regados con agua residual sin ningún tratamiento, 544 ubicadas en terrenos regados con afluentes de una serie de depósitos interconectados y 928 ubicadas en terrenos donde sólo se recibe agua de temporal.

Los niños de las comunidades que usan agua residual sin tratar (10^8 coliformes fecales/100 mL y 125 huevos de nemátodos/L), tuvieron un riesgo 33% más alto de enfermedades diarreicas que los niños de los otros dos grupos, que fueron semejantes entre ellos. Los riesgos en los adultos de todos los grupos estudiados no fueron altos pero los hombres tuvieron un riesgo 50% más alto que las mujeres (Cifuentes 1998).

Las aguas residuales sin tratamiento provenientes de la Ciudad de México, se han usado por mucho tiempo para regar cultivos en el Valle del Mezquital, Hgo. Se hizo un estudio para evaluar la calidad de agua del subsuelo en tres fuentes para uso doméstico, lo anterior fue usando los criterios de 24 metales traza, 67 componentes orgánicos semivolátiles objetivo básicos/neutrales/ácidos (BNA), componentes orgánicos semivolátiles no objetivo, nitratos, 23 pesticidas clorados y un conglomerado de 20 bifenilos policlorados (PCB), así como contaminantes microbiales (bacterias coliformes, *Vibrio cholerae* y *Salmonella*).

De las personas que participaron en el estudio, el 10% de la muestra, sufre diarreas frecuentes y el 9% irritaciones en la piel. La detección de *V.*

cholerae en las aguas superficiales señalan un riesgo potencial de enfermedades diarréicas para quienes se bañan en esos lugares y sobretodo por la ingestión accidental de esta agua. Los niveles altos de bacterias coliformes en las aguas superficiales y los niveles aunque bajos de estas mismas bacterias en las aguas profundas indican contaminación fecal, lo cual es un riesgo de enfermedades gastrointestinales para la población expuesta a aguas sin tratamiento sanitario adecuado. Los resultados señalan que el riesgo significativo está en la contaminación microbiana más que en la contaminación química (Downs *et al.* 1999).

Fue realizado un trabajo para evaluar los factores de riesgo de una población agrícola para *Giardia intestinales*. Los grupos de personas participantes fueron 2 257 individuos de comunidades que usan para riego agua residual sin ningún tratamiento, 2 147 individuos de un grupo que usa de la misma agua, pero que es confinada en varios depósitos por un determinado tiempo y 2 344 que usan agua de lluvia.

Las muestras de agua residual que fueron analizadas tuvieron 10^8 coliformes fecales/100 mL y más de 300 *Giardia* sp. cysts/L. La permanencia del agua en los depósitos fue de 3 a 7 meses y las muestras presentaron de 10^1 a 10^4 coliformes fecales/100 mL y más de 5 *Giardia* sp. cysts/L.

Los niños de 1 a 14 años de edad mostraron 20% de incidencia de infecciones y fue la más alta. La gente que compraba los vegetales en las

tiendas de la ciudad, tuvieron tasas de infección más altas que las que hacían sus compras en la misma comunidad. No se encontró un riesgo alto para ningún grupo en comparación con los testigos; por lo tanto prácticamente el riesgo de este patógeno como consecuencia de las actividades agrícolas, no fue detectado (Cifuentes *et al.* 2000).

Se investigó si el uso de aguas residuales para riego estaba asociado con niveles altos de plomo en la sangre entre la población del Valle del Mezquital, Hgo, y cuales eran los factores de riesgo. Los niveles de plomo fueron medidos en muestras de sangre tomadas de 735 individuos y fueron analizadas mediante espectrofotometría de absorción atómica. Los niveles promedio de plomo en la sangre fueron 7.8 microg/dL (estándar 4.66 microg/dL; el rango fue de 1.2-36.7 microg/dL); 23% de la población en estudio tuvo niveles de plomo que excedieron los 10 microg/dL.

El uso de utensilios de cerámica que contenía plomo, fue asociado con niveles de plomo en la sangre altos; otras variables significativas fueron edad, género y ocupaciones no relacionadas con el campo, (*e.g.* técnicos y obreros). Cuando el análisis fue estratificado por el uso de utensilios de cerámica que contenía plomo para cocinar, fue detectado una relación inversa entre un alto contenido de calcio y un alto contenido de plomo, de tal manera que los niveles de plomo estuvieron asociados con el uso de este tipo de utensilios; y el calcio mostró un efecto de protección probablemente debido al

decremento en la absorción de plomo en el tracto gastrointestinal (Cifuentes *et al.* 2000).

Al usar para riego de cultivos las aguas residuales de la Ciudad de México, se ocasiona una recarga de los acuíferos del Valle del Mezquital, Hgo. Se hizo una evolución general para estimar la factibilidad de usar este recurso como fuente de agua potable para la misma Ciudad de México; y se concluyó que debido a las características del acuífero es posible hacerlo si se emplea un sistema de tratamiento avanzado que contemple la detección de contaminantes no convencionales, así como una legislación apropiada (Jiménez y Chávez 2004).

Esta investigación hecha en México, muestra como se desarrolló la tecnología y las regulaciones necesarias para un reuso eficiente y seguro de aguas residuales en la agricultura, considerando las necesidades de la población y las medidas sanitarias establecidas. En lugar de considerar nutrientes y materia orgánica como contaminantes, se desarrolló una nueva legislación que permite la presencia de estos elementos en cantidades apropiadas, mientras que los patógenos especialmente huevos de helminto debían de ser removidos antes del reuso.

El proceso se ilustra mediante el caso del Valle de Tula, que es la región más grande del mundo y en donde se ha usado el agua residual con fines agrícolas durante más de 100 años. Lo cual ha permitido hacer estudios

de corto y largo alcance. La tecnología desarrollada es llamada Tratamiento Primario avanzada (APT), que consiste básicamente en un proceso de coagulación-floculación aunado con un periodo grande de sedimentación.

Se concluye que con una regulación apropiada y con una tecnología de tratamiento es posible hacer un uso seguro a un costo aceptable (Jiménez 2005).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es evidente que las aguas residuales son un recurso susceptible de ser empleado en el riego de los cultivos y en varias opciones más (riego de jardines públicos, recarga de acuíferos, creación de áreas de esparcimiento, etc.), pero se requiere de la participación de todos los sectores de la sociedad para crear la infraestructura física y fortalecer la estructura legal, que permita el aprovechamiento seguro de las aguas que sean recuperadas; teniendo siempre presentes los aspectos de salud y cuidado del medio ambiente.

En diversos lugares del país se han hecho estudios relacionados con el uso del agua residual en la agricultura, sólo que no se han publicado en revistas de alto impacto; y los trabajos han quedado como tesis profesionales o enmarcados en publicaciones de baja difusión; por lo que es necesario concientizar a los investigadores a que se preocupen por dar a conocer su trabajo utilizando revistas científicas especializadas con reconocimiento internacional.

Es necesario desarrollar mejores tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales, a la vez que se estudia la manera de manejar y/o aprovechar los productos resultantes de estos procesos, tales como lodos, elementos químicos, fertilizantes, etc.

El Valle del Mezquital en el estado de Hidalgo, es el área geográfica en donde se han realizado más estudios sobre las implicaciones del uso del agua residual para riego de cultivos; lo cual es consecuencia de ser la superficie más grande del mundo con 90 000 ha y más de 100 años, bajo este esquema de irrigación; y además la cercanía con un buen número de instituciones gubernamentales, no gubernamentales, académicas y científicas, interesadas en estudiar los problemas generados por esta situación.

Es posible que la problemática detectada en el Valle del Mezquital a través de la gama de estudios realizados, esté también presente en otras áreas del país, en donde existe este tipo de irrigación, por lo que es necesario hacer estudios y monitorear estos puntos geográficos. En otras palabras, lo anterior debe servir como un llamado de advertencia para que se atiendan los lugares que están bajo condiciones similares.

Se puede decir que en nuestro país, la recuperación de aguas residuales para usos diversos es aún una asignatura pendiente que el gobierno en sus distintos niveles debe atender. Sería de gran utilidad que los gobernantes en turno o los candidatos a sucederles, incluyeran en sus propuestas técnicas como una prioridad, la recuperación de las aguas residuales, por ser esto un asunto de mucha preocupación para nuestro presente y para el futuro de las generaciones venideras.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Antón, D. y C. Díaz D. (Editores). 2000. Sequía en un mundo de agua. San José/Toluca, Piriguazú Ediciones/CIRA-UAEM. 420 p.
- Assadian, N. W., C. Vogel, Z. Sheng, U. V. Figueroa and M. Palomo. 2003. Heavy metal distribution in open canals and drains in the Upper Rio Grande basin. *Soil & Sediment Contamination* 12(3): 305-323.
- Ayres, R. M. and D. D. Mara. 1996. Analysis of wastewater for use in agriculture: A laboratory manual of parasitological and bacteriological techniques. WHO. Geneva, Switzerland. 35 p.
- Blumenthal, U. J., A. Peasey, G. Ruiz-Palacios, and D. D. Mara. 2000. Guidelines for wastewater reuse in agriculture and aquaculture: recommended revisions based on new research evidence. Task No. 68 Part 1. London School of Hygiene & Tropical Medicine, Loughborough University, UK.
- Carr, R. 2005. Who guidelines for safe wastewater use – more than just numbers. *Irrigation and Drainage* 54(S1): S103–S111.
- Cervantes-Medel, A. and Armienta, M. A. 2004. Influence of faulting on groundwater quality in Valle del Mezquital, Mexico. *Geofísica Internacional* 43(3): 477-493.
- Cifuentes, E. 1998. The epidemiology of enteric infections in agricultural communities exposed to wastewater irrigation: perspectives for risk control. *International Journal of Environmental Health Research* 8, 203-213.
- Cifuentes, E., M. Gómez, U. Blumenthal, M. M. Téllez-Rojo, I. Romieu, G. Ruíz-Palacios, and S. Ruíz-Velasco. 2000. Risk factors for Giardia intestinales infection in agricultural villages practicing wastewater irrigation in México. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 62(3): 388-392.
- Cifuentes E., U. Blumenthal, G. Ruiz-Palacios, S. Bennett, M. Quigley, A. Peasey, and H. Romero-Alvarez. 1993. Problemas de salud

- asociados al riego agrícola con agua residual en México. *Salud Pública de México* 35, 614-619.
- Cifuentes E., J. Villanueva and L. H. Sanin. 2000. Predictors of blood lead levels in agricultural villages practicing wastewater irrigation in Central Mexico. *International Journal of Occupational and Environmental Health* 6(3): 177-182.
- CNA. Comisión Nacional del Agua. 2005. *Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento de aguas residuales*. México.
- Domínguez-Mariani E., A. Carrillo-Chávez, A. Ortega and M. T. Orozco-Esquivel. 2004. Wastewater reuse in Valsequillo agricultural area, Mexico: Environmental impact on Groundwater. *Water, Air, & Soil Pollution*. 155(1-4): 251-267.
- Downs, T. J., E. Cifuentes, E. Ruth, and I. M. Suffet. 2000. Effectiveness of natural treatment in a wastewater irrigation district of the Mexico city region: A synoptic field survey. *Water Environmental Research* 72(1): 4-21(18).
- Downs, T. J., E. Cifuentes-García, and I. M. Suffet. 1999. Risk screening for exposure to groundwater pollution in a wastewater irrigation district of the Mexico city region. *Environmental Health Perspectives* 107(7): 553-561.
- Flores L., G. Blas, G. Hernández and R. Alcalá. 1997. Distribution and sequential extraction of some heavy metals from soils irrigated with wastewater from México city. *Water, Air & Soil Pollution* 98(1-2): 105-117
- Gallegos E., A. Warren, E. Robles, E. Campoy, A. Calderón, M. G. Sainz, P. Bonilla, and O. Escolero. 1999. The effects of wastewater irrigation on groundwater quality in Mexico. *Water Science & Technology* 40(2): 45-52
- Herre A., C. Siebe, and M. Kaupenjohann. 2004. Effect of irrigation water quality on organic matter, Cd and Cu mobility in soils of central Mexico. *Water Science and Technology* 50(2): 277-284.
- Jimenez B., 2005. Treatment technology and standars for agricultural wastewater reuse: a case study in Mexico. *Irrigation and Drainage* 54(S1): S23-S33.
- Jimenez B., and Chávez. 2004. Quality assessment of an aquifer recharged with wastewater for its potential use as drinking source: "El Mezquital Valley" case. *Water Science and Technology* 50(2): 269-276.

- Jiménez-Cisneros., B. and Chávez-Mejía, A. 1997. Treatment of México city wastewater for irrigation purposes. *Environmental Technology* 18(7): 721-729.
- Lucho-Constantino, C. A., M. Alvarez-Suarez, R. I. Beltran-Hernandez, F. Prieto-García and H. M. Poggi-Varaldo. 2005. A multivariate análisis of the accumulation and fractionation of major and trace elements in agricultural soils in Hidalgo State, Mexico irrigated with raw wastewater. *Environmental International* 31(3): 313-323.
- Lucho-Constantino, C. A., F. Prieto-García, L. M. del Razo, R. Rodríguez-Vazquez, and H. M. Poggi-Varaldo. 2005. Chemical fractionation of boron and heavy metals in soils irrigated with wastewater in central Mexico. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 108(1): 57-71.
- Méndez-García T., L. Rodríguez-Dominguez y S. Palacios-Mayorga. 2000. Impacto del riego con aguas contaminadas, evaluado a través de la presencia de metales pesados en suelos. *Terra Latinoamericana* 18(004): 277-288.
- Mendoza-Espinosa L., M. V. Orozco-Borbón, and P. Silva-Nava. 2004. Quality assessment of reclaimed water for its possible use for crop irrigation and aquifer recharge in Ensenada, Baja California, México. *Water Science and Technology* 50(2): 285-291.
- Metcalf & Heddy, Inc. 1994. *Ingeniería sanitaria. Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales*. Editorial Laber, S.A. Colombia. 969 p.
- Moeller-Chávez G., L. Seguí-Amórtegui, O. Alfranca-Burriel, V. Escalante-Estrada, F. Pozo-Román, and A. Rivas-Hernández. 2004. Water reuse in the Apatlaco River Basin (México): a feasibility study. *Water Science and Technology* 50(2): 329-337.
- Peasey, A., U. Blumenthal, D. Mara, and G. Ruíz-Palacios. 2000. A review of policy and standards for wastewater reuse in agriculture: A latin american perspective. London School of Hygiene & Tropical Medicine, Loughborough University, UK.
- Ramírez-Fuentes, E., C. Lucho-Constantino, E. Escamilla-Silva, and E. Dendooven. 2002. Characteristics, and carbon and nitrogen dynamics in soil irrigated with wastewater for different lengths of time. *Bioresource Technology* 85(2): 179-187.
- Sandoval-Minero, R. 2005. Participation of the private sector in water and sanitation services: assessment of Guanajuato, México. *Water Resources Development* 21(1): 181-197.

- SEDESOL, Secretaría de Desarrollo Social. 1993. Norma Oficial Mexicana NOM-033-ECOL-1993, que establece las condiciones bacteriológicas para el uso de aguas residuales de origen urbano o municipal o de la mezcla de estas con la de los cuerpos de agua, en el riego de hortalizas y productos hortofrutícolas. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 18 de octubre de 1993.
- SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 1996. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de enero de 1997.
- Solís C., E. Andrade, A. Mireles, I. E. Reyes-Solís, N. García-Calderón, M. C. Lagunas-Solar, C. U. Piña, and R. G. Flocchini. 2005. Distribution of heavy metals in plants cultivated with wastewater irrigated soils during different periods of time. *Nuclear Instrumentes and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 241(1-4): 351-355.
- Solís C., J. Sandoval, H. Pérez-Vega, and M. Mazari-Hiriart. 2006. Irrigation water quality in southern Mexico City based on bacterial and heavy metal analices. *Nuclear Instrumentes and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 249(1-2): 592-595.
- Srikanth R., and D. Naik. 2004. Prevalence of giardiasis due to wastewater reuse for agriculture in the suburbs os Asmara City, Eritrea. *International Journal of Environmental Health Research* 14(1): 43-52.
- Tang C., J. Chen, S. Shindo, Y. Sakura, W. Zhang, and Y. Shen. 2004. Assessment of groundwater contamination by nitrates associated with wastewater irrigation: A case study in Shijiazhuang region, China. *Hydrological Processes* 18(12): 2303-2312.
- Vázquez-Alarcón A., L. Justin-Cajuste, C. Siebe-Grabach, G. Alcántar-González y M. L. de la Isla de Bauer. 2001. Cadmio, níquel y plomo en agua residual, suelo y cultivos en el Valle del Mezqital, Hidalgo, México. *Agrociencia* 35(003): 267-274.
- Vázquez-Montiel O., J. Gardea-Torresdey and J. Vanderslice. 1999. Dilution effects on the quality of untreated wastewater used for irrigation along the USA-México border. *International Journal of Enviromental Health Research* 9, 125-129.
- Velázquez-Machuca M. A., M. Ortega –Escobar, A. Martínez-Garza, J. Kohashi-Shibata y N. García-Calderón. 2002. Relación funcional PSI-RAS en

las aguas residuales y suelos del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Terra Latinoamericana* 20(004): 459-464.

Vivanco-Estrada R. A., F. Gavi-Reyes, J. J. Peña-Cabriales y J. J. Martínez-Hernández. 2001. Flujos de nitrógeno en un suelo cultivado con forrajes y regado con agua residual urbana. *Terra Latinoamericana* 19(004): 301-308.

WHO. 1989. Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture. Technical Report Series No. 778, Geneva, Switzerland.