



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA
DEL AGUA

SEMARNAT
SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES



Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Coordinación de Riego y Drenaje



Reúso de aguas residuales en la agricultura

Olga Xóchitl Cisneros Estrada

Heber Saucedo Rojas

Diciembre 2016

IMTA
Coordinación de Riego y Drenaje

Reúso de aguas residuales en la agricultura

Olga Xóchitl Cisneros Estrada
Heber Saucedo Rojas

México 2016

628.3623 Cisneros Estrada, Olga Xóchitl

C19 *Reúso de aguas residuales en la agricultura* / Olga Xóchitl Cisneros Estrada / Heber Saucedo Rojas. - - Jiutepec, Mor. : Instituto Mexicano de Tecnología del Agua © 2016.

170 pp.

ISBN 978-607-9368-76-0

1. Aguas 2. Uso de aguas residuales 3. Uso eficiente del agua

Autores:

Olga Xóchitl Cisneros Estrada

Heber Saucedo Rojas

Responsable de la edición:

Rebeca Gerardo Tavira

Coordinación editorial:

Fátima Sánchez Bonilla

Primera edición: 2016

D.R.© Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Paseo Cuauhnáhuac 8532

62550 Progreso, Jiutepec, Morelos

México

www.gob.mx/imta

ISBN 978-607-9368-76-0

Prohibida la reproducción parcial o total, por cualquier medio mecánico, electrónico, de fotocopias, térmico u otros, sin permiso de los autores

Impreso en México – Printed in Mexico

PRÓLOGO

El paradigma del nuevo milenio a nivel mundial en torno al tema del agua necesariamente deberá involucrar la gestión para el uso eficiente de los volúmenes disponibles y la utilización de fuentes alternas que permitan disminuir la presión social por el uso del agua limpia. Respecto de las fuentes alternas, las aguas residuales se erigen como la fuente inmediata de aprovechamiento en dos vertientes: las aguas crudas y las aguas tratadas según nivel de tratamiento.

La generación de aguas residuales es un fenómeno ligado al crecimiento poblacional y al desarrollo de las actividades económicas, que en su mayoría desechan agua debido a sus procesos productivos. Estas aguas requieren ser colectadas en el sistema de alcantarillado y conducidas a plantas de tratamiento, donde se puede mejorar su calidad y se posibilita su reúso.

El total de aguas residuales de tipo municipal anualmente generado en México se estiman en 228.7 m³/s, y el caudal tratado en 111.3m³/s (CONAGUA, 2015), lo que representa que en promedio solo el 48.66 % del total generado recibe un tratamiento que permite mejorar su calidad. Ante tal evidencia es claro que aún falta camino por recorrer para que las aguas residuales generadas se traten en su totalidad para potenciar su reúso.

El contexto antes expuesto manifiesta la importancia de realizar investigación, desarrollar metodologías, adaptar tecnologías y transferirlas a los productores, para que el reúso de las aguas residuales (preferentemente tratadas) se materialice en un marco de planeación integral que permita aprovecharlas eficientemente y sin riesgos de contaminación para los suelos, los acuíferos, y los cultivos, manteniendo riesgos mínimos y controlados para evitar problemas de salud pública.

El consumo de agua en México se distribuye de la siguiente manera: un 76.3 % se destina a suplir la demanda de la actividad agrícola y pecuaria, el 17 % para abastecer a la población, el 5.1 % para atender a la industria, el 1.4 % para el desarrollo de la acuicultura, y el 0.2 % para las termoeléctricas. Dicha distribución indica por sí misma la necesidad de enfocar el desarrollo de la política hídrica en una de sus vertientes hacia el uso eficiente del agua en la agricultura, que es el sector que mayor consumo tiene, además de gestionar y fomentar el reúso de aguas residuales que permitan el intercambio de aguas tratadas por aguas limpias (de primer uso).

De esta manera se contribuirá a liberar importantes volúmenes para abastecer a la población y a aprovechar la materia orgánica presente en el agua residual como fuente de nutrientes para la producción de cultivos, lo que traerá como beneficio una reducción en los costos de producción y mejores rendimientos.

Los autores

Agradecimiento

Al Colegio de Postgraduados y a la Asociación de Especialistas en Irrigación, A.C., quienes facilitaron los croquis de los Distritos de Riego que aparecen en el capítulo 5, en el Apartado 5.3.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1	3
REVISIÓN DE CONCEPTOS ASOCIADOS AL REÚSO	3
1.1 ¿QUE ES EL REÚSO?	3
1.2 ¿QUÉ SON LAS AGUAS RESIDUALES (AR)?	3
1.3 ¿QUÉ ES EL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA?	3
1.4 ¿QUÉ ES EL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL?	3
1.5 ¿QUÉ ES EL AGUA RESIDUAL MUNICIPAL?	4
1.6 ¿QUÉ ES EL AGUA RESIDUAL TRATADA?	4
1.7 ¿QUÉ SON LAS AGUAS RESIDUALES DE REÚSO?	4
CAPÍTULO 2	7
CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES	7
2.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES CON FINES DE REÚSO	8
2.2 IMPORTANCIA DE LA CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	8
CAPÍTULO 3	15
BREVE HISTORIA DE LA REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES	15
CAPÍTULO 4	23
REVISIÓN DE ALGUNAS EXPERIENCIAS SOBRE REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN EL ÁMBITO INTERNACIONAL	23
4.1 EXPERIENCIA DEL REÚSO EN ARGENTINA	23
4.2 EXPERIENCIA DEL REÚSO EN ESPAÑA.....	24
4.3 EXPERIENCIA DEL REÚSO EN ISRAEL	30
4.4 EXPERIENCIA DEL REÚSO EN ESTADOS UNIDOS	34
CAPÍTULO 5	39
EL REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN MÉXICO	39
5.1 INICIOS DEL REÚSO PARA AGRICULTURA.....	39
5.2 REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN EL VALLE DEL MEZQUITAL	42
5.2.1 <i>Desarrollo histórico</i>	42
5.2.2 <i>Perspectiva futura</i>	44
5.3 PRINCIPALES DISTRITOS DE RIEGO QUE USAN LAS AGUAS RESIDUALES EN EL VALLE DEL MEZQUITAL	46
5.3.1 <i>Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo</i>	46
5.3.2 <i>Distrito de Riego 100 Alfajayucan, Hidalgo</i>	48
5.4 OTROS DISTRITOS DE RIEGO CON REÚSO DE AGUAS RESIDUALES EN MÉXICO	50
5.4.1 <i>Distrito de Riego 009 Valle de Juárez, Chihuahua</i>	52
5.4.2 <i>Distrito de Riego 088 Chiconautla</i>	57
5.4.3 <i>Distrito de Riego 030 Valsequillo, Puebla</i>	59

ÍNDICE DE CONTENIDO

5.4.4 Distrito de Riego 016 Morelos.....	61
5.4.5 Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro, Michoacán.....	65
5.4.6 Distrito de Riego 025 Bajo Río Bravo, Tamaulipas	68
5.4.7 Distrito de Riego 001 Pabellón, Aguascalientes	70
5.4.8 Distrito de Riego 052 Durango, Dgo.....	73
CAPÍTULO 6	79
AGUAS RESIDUALES Y SU REÚSO EN AGRICULTURA	79
6.1 CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO.....	79
6.2 CÓMO EVALUAR E INTERPRETAR LA CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO	80
6.3 RIESGOS DE AFECTACIÓN A LOS SUELOS POR EL RIEGO CON AGUAS RESIDUALES	84
6.3.1 Salinización de terrenos.....	84
6.3.2 Pérdida de infiltración de los suelos	86
6.4 MEDIDAS QUE SE PUEDEN IMPLEMENTAR PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AGUA EN LA PARCELA	90
6.4.1 Desinfección con rayos ultravioleta (UV)	90
6.4.2 Desinfección con ozono.....	91
6.4.3 Micro y ultrafiltración con membranas	92
CAPÍTULO 7	97
CONDICIONES NECESARIAS PARA REUSAR LAS AGUAS RESIDUALES PARA EL RIEGO AGRÍCOLA	97
7.1 SELECCIÓN DE CULTIVOS	97
7.1.1 Selección de cultivos de acuerdo con la calidad del agua	97
7.1.1.1 Cultivos alternativos para reusar las aguas residuales con cierto grado de salinidad	98
7.1.1.2 Alternativas de cultivos para aprovechar aguas residuales con cierto grado de toxicidad (sodio, cloruro y boro)	103
7.1.2 Selección de cultivos considerando los riesgos de salud pública	105
7.1.3 Selección de cultivos considerando las restricciones legales o normativas	107
7.2 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE RIEGO PARA EL REÚSO DE AGUAS RESIDUALES	108
7.2.1 Método de riego por gravedad en surcos y melgas	113
7.2.2 Método de riego presurizado	115
7.3 PRÁCTICAS DE PREPARACIÓN DE TERRENOS Y MANEJO DEL CULTIVO.....	116
7.3.1 Prácticas de manejo de cultivos.....	117
7.3.2 Siembra en camas.....	118
7.3.3 Uso de acolchados plásticos.....	119
7.3.4 Entutorado o envarado.....	121
7.4 MANEJO DEL AGUA DE RIEGO PARA REDUCCIÓN DE RIESGOS DE SALUD	122

ÍNDICE DE CONTENIDO

7.4.1 Riego alterno	123
7.4.2 Supresión del último riego antes de la cosecha.....	124
CAPÍTULO 8	129
INTEGRACIÓN DE PROYECTOS DE REÚSO Y ESTRATEGIAS PARA REDUCCIÓN DE RIESGOS DE SALUD.....	129
8.1 BASES DE LOS PROYECTOS DE REÚSO	129
8.2 ESTRATEGIAS PARA REDUCIR RIESGOS DE SALUD EN ZONAS CON REÚSO	130
8.2.1 Uso de prendas de protección.....	132
8.2.2 Higiene durante la jornada de trabajo y después de ella.....	134
8.2.3 Recomendaciones generales para preservar la salud de las familias.....	135
8.2.4 Recomendaciones generales para mejorar la calidad sanitaria de los productos de consumo	135
9 GLOSARIO	141
REFERENCIAS.....	149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Composición del agua residual.....	7
Figura 2.2 Toma de muestra de agua residual para su caracterización	8
Figura 2.3 Tanques elevados de almacenamiento de agua tratada para reúso en servicios al público	9
Figura 2.4 Entrega de muestras de aguas residuales para su caracterización.....	11
Figura 3.1 Primer modelo de reúso de las aguas residuales en tiempos antiguos	15
Figura 3.2 Eucaliptos regados con aguas residuales	16
Figura 3.3 Cultivo de alfalfa regado con aguas residuales	16
Figura 3.4 Campo deportivo regado con aguas residuales	18
Figura 4.1 Lagunas para tratar aguas residuales en Campo Espejo, provincia de Mendoza, Argentina	23
Figura 4.2 Campos de vid con aprovechamiento de aguas residuales en Mendoza, Argentina.....	23
Figura 4.3 Franjas de árboles regados con aguas residuales, proyecto para estabilizar taludes de ríos en España.....	25
Figura 4.4 Mezcla de aguas superficiales con agua residual	25
Figura 4.5 Distribución del reúso en Andalucía, España (2007).....	28
Figura 4.6 Campo de golf regado con aguas residuales tratadas.....	28
Figura 4.7 Ejemplo de planta regada con aguas residuales para producir biocombustible en España	29
Figura 4.8 Restos de acequias que eran usadas para sacar las aguas residuales de Jerusalén.....	30
Figura 4.9 Cultivo de algodón regado con aguas residuales	31
Figura 4.10 Ejemplos de cultivos en los que son actualmente reusadas las aguas residuales en Israel	31
Figura 4.11 Ubicación de algunos reservorios para pulimento de aguas residuales en Israel.....	32
Figura 4.12 Reservorio para pulimento de aguas residuales para riego.....	33
Figura 4.13 Planta depuradora para tratar aguas residuales con fines de reúso.....	34
Figura 4.14 Diversificación de los cultivos regados con agua residual en Estados Unidos	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.15 Aprovechamiento de aguas residuales porcinas para riego de zacate bermuda	36
Figura 4.16 Distribución en porcentaje sobre el aprovechamiento de las aguas residuales en Estados Unidos	36
Figura 5.1 Vista del último tramo del Tajo de Nochistongo.....	40
Figura 5.2 El Tajo de Nochistongo tuvo una longitud de 2 241 m.....	40
Figura 5.3 Ubicación del Tajo de Nochistongo y del túnel de Tequixquiac.....	40
Figura 5.4 Aguas residuales provenientes de la Ciudad de México entrando por el emisor central hacia Hidalgo	41
Figura 5.5 Vista de un canal a cielo abierto con estructuras de control en el D.R. 003 Tula, Hidalgo	41
Figura 5.6 Croquis del D.R. 003 Tula, Hidalgo	41
Figura 5.7 Ubicación de los Distritos de Riego 003 y 100 Alfajayucan en el estado de Hidalgo	42
Figura 5.8 Cultivo de maíz forrajero regado con aguas residuales.....	43
Figura 5.9 Avances en la construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Atotonilco	45
Figura 5.10 Trabajadores en labores agrícolas	45
Figura 5.11 D.R. 003 Tula, Hidalgo	47
Figura 5.12 D.R. 100 Alfajayucan, Hidalgo	49
Figura 5.13 D.R. 009 Valle de Juárez, Chihuahua.....	53
Figura 5.14 Unidades de riego que conforman el D.R. 009.....	54
Figura 5.15 Sorgo forrajero regado con aguas residuales en el D.R. 009.....	54
Figura 5.16 Vista de la entrada a la Planta de Tratamiento Norte de Ciudad Juárez, Chihuahua	56
Figura 5.17 Agua residual tratada para riego agrícola en el Valle de Juárez, Chihuahua	56
Figura 5.18 Nogales regados con aguas residuales tratadas en el D.R. 009.....	56
Figura 5.19 D.R. 088 Chiconautla.....	57
Figura 5.20 D.R. 030 Valsequillo, Puebla	59
Figura 5.21 Módulos que integran el D.R. 030 Valsequillo	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5.22 D.R. 016 Morelos.....	62
Figura 5.23 Calidad del agua de las principales fuentes de agua de riego del D.R. 016	62
Figura 5.24 Cultivo de caña de azúcar regada con aguas residuales en el D.R. 016...	63
Figura 5.25 Cultivo de arroz regado con aguas residuales en el D.R. 016, Morelos	63
Figura 5.26 D.R. 020 Morelia-Queréndaro, Mich.	66
Figura 5.27 Sorgo grano regado con aguas residuales en el D.R. 020	66
Figura 5.28 D.R. 025 Bajo Río Bravo, Tamps.....	68
Figura 5.29 Cultivo de sorgo regado con aguas residuales en el D.R. 025	69
Figura 5.30 Zacate buffel regado con aguas residuales en el D.R. 025	69
Figura 5.31 D.R. 001 Pabellón, Aguascalientes	71
Figura 5.32 D.R. 052 Durango, Dgo.	74
Figura 5.33 Nogales regados con aguas residuales en el D.R. 052	75
Figura 6.1 Terreno agrícola con afloramiento de sales.....	84
Figura 6.2 Aplicación de agua de riego en exceso	84
Figura 6.3 Práctica de lavado de suelos para bajar salinidad.....	85
Figura 6.4 Prueba de infiltración de suelos.....	87
Figura 7.1 Cultivo de frijol yorimon	101
Figura 7.2 Pasto Taiwan	101
Figura 7.3 Cultivo de nopal.....	102
Figura 7.4 Zanjeado para instalar drenaje subterráneo	104
Figura 7.5 Instalación de un sistema de drenaje subterráneo	104
Figura 7.6 Alfalfa para corte y ensilaje.....	107
Figura 7.7 Riego rodado por gravedad en surcos.....	113
Figura 7.8 Riego rodado por gravedad en melgas.....	113
Figura 7.9 Riego aplicado por gravedad en surcos mediante sifones	114
Figura 7.10 Riego presurizado por aspersion	115
Figura 7.11 Sistema de riego con microaspersión en huerta de naranja.....	115
Figura 7.12 Sistema de riego por goteo en cultivo de girasol	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 7.13 Cultivo de frijol sembrado en surcos anchos	117
Figura 7.14 Siembra de frijol ejotero en camas con acolchado	118
Figura 7.15 Preparación de terreno con acolchado plástico	120
Figura 7.16 Otro tipo de acolchado plástico.....	120
Figura 7.17 Cultivo de chile con uso de acolchado plástico	120
Figura 7.18 Uso de entutorado en parcela a cielo abierto	122
Figura 7.19 Uso de entutorado en invernadero	122
Figura 7.20 Primer riego en surco alterno.....	123
Figura 7.21 Cultivo de maíz regado bajo la modalidad de surco alterno	123
Figura 7.22 Caña de azúcar con supresión del riego antes de la cosecha.....	125
Figura 8.1 Bases generales para proyectos de reúso en agricultura	129
Figura 8.2 Esquema de información requerida para integrar proyectos de reúso	130
Figura 8.3 Regadores, primer eslabón de riesgo por el reúso de aguas residuales... ..	131
Figura 8.4 Uso de prendas de protección en un regador donde se reúsan aguas residuales para el riego agrícola	134
Figura 8.5 Compra de productos agrícolas en los mercados	136
Figura 8.6 Lavado y pelado de vegetales	137

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Parámetros más importantes para caracterizar el agua residual para reúso ..	9
Tabla 2.2 Importancia de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos que caracterizan las aguas residuales	10
Tabla 3.1 Registros documentados del reúso de agua residual.....	17
Tabla 3.2 Surgimiento de las granjas de aguas residuales	18
Tabla 3.3 Sitios con campos de aplicación de aguas residuales para riego de árboles forestales.....	19
Tabla 3.4 Ejemplos de aprovechamiento del agua residual en distintos lugares del mundo	19
Tabla 4.1 Criterios de calidad para la reutilización de las aguas residuales, según sus usos.....	25
Tabla 4.2 Valores máximos admisibles para usos agrícolas en España.....	26
Tabla 4.3 Reúso de las aguas residuales tratadas por provincia en Andalucía, España	29
Tabla 4.4 Comparativo del costo del tratamiento de aguas residuales con fines de reúso	33
Tabla 5.1 Desarrollo histórico de las superficies con aprovechamiento de aguas residuales en el Valle del Mezquital	43
Tabla 5.2 Estadística agrícola del ciclo otoño-invierno 2012-2013 del D.R. 003 Tula, Hidalgo	47
Tabla 5.3 Estadística agrícola del ciclo primavera-verano 2012-2013 del D.R. 003 Tula, Hidalgo	48
Tabla 5.4 Estadística agrícola de perennes 2012-2013 del D.R. 003 Tula, Hidalgo	48
Tabla 5.5 Estadística agrícola de segundos cultivos 2012-2013 del D.R. 003 Tula, Hidalgo	48
Tabla 5.6 Estadística agrícola del ciclo otoño-invierno 2012-2013 del D.R. 100 Alfajayucan, Hidalgo.....	50
Tabla 5.7 Estadística agrícola del ciclo primavera-verano 2012-2013 del D.R. 100 Alfajayucan, Hidalgo.....	50
Tabla 5.8 Estadística agrícola de perennes 2012-2013 del D.R. 100 Alfajayucan, Hidalgo	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.9 Aprovechamiento de agua residual para riego agrícola en distritos de riego de México	51
Tabla 5.10 Estadística agrícola de otoño-invierno 2012-2013 del D.R. 009	55
Tabla 5.11 Estadística agrícola de primavera-verano 2012-2013 del D.R. 009	55
Tabla 5.12 Estadística agrícola de perennes 2012-2013 del D.R. 009	55
Tabla 5.13. Estadística agrícola de segundos cultivos 2012-2013 del D.R. 009.....	56
Tabla 5.14 Estadística agrícola de otoño-invierno 2012-2013 del D.R. 088 Chiconautla, Edo. de México.....	58
Tabla 5.15 Estadística agrícola de primavera-verano 2012-2013 del D.R. 088 Chiconautla, Edo. de México	58
Tabla 5.16 Estadística agrícola de perennes 2012-2013 del D.R. 088 Chiconautla, Edo. de México	58
Tabla 5.17 Estadística agrícola de primavera-verano 2012-2013 del D.R. 030 Valsequillo, Puebla.....	61
Tabla 5.18 Estadística agrícola de perennes 2012-2013 del D.R. 030 Valsequillo, Puebla	61
Tabla 5.19 Estadística agrícola de otoño-invierno 2012-2013 del D.R. 016, Morelos...	63
Tabla 5.20 Estadística agrícola de primavera-verano 2012-2013 del D.R. 016 Morelos	64
Tabla 5.21 Estadística agrícola de perennes 2012-2013 del D.R. 016 Morelos.....	64
Tabla 5.22 Estadística agrícola de segundos cultivos 2012-2013 del D.R. 016 Morelos	65
Tabla 5.23 Estadística agrícola de otoño-invierno 2012-2013 del D.R. 020	67
Tabla 5.24 Estadística agrícola de primavera-verano 2012-2013 del D.R. 020	67
Tabla 5.25 Estadística agrícola de perennes 2012-2013 del D.R. 020	67
Tabla 5.26 Estadística agrícola de segundos cultivos 2012-2013 del D.R. 020.....	68
Tabla 5.27 Estadística agrícola de primavera-verano 2012-2013 del D.R. 025	70
Tabla 5.28 Estadística agrícola de otoño-invierno 2012-2013 del D.R. 025	70
Tabla 5.29 Estadística agrícola de perennes 2012-2013 del D.R. 025	70
Tabla 5.30 Estadística agrícola de otoño-invierno 2012-2013 del D.R. 001 Pabellón, Aguascalientes	72

ÍNDICE DE TABLAS

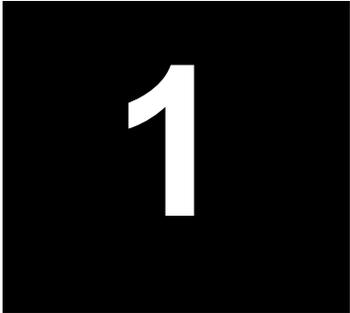
Tabla 5.31 Estadística agrícola de primavera-verano 2012-2013 del D.R. 001 Pabellón, Aguascalientes	72
Tabla 5.32 Estadística agrícola de perennes 2012-2013 del D.R. 001 Pabellón, Aguascalientes	72
Tabla 5.33 Estadística agrícola de segundos cultivos 2012-2013 del D.R. 001 Pabellón, Aguascalientes	73
Tabla 5.34 Estadística agrícola de otoño-invierno 2012-2013 del D.R. 052, Durango..	75
Tabla 5.35 Estadística agrícola de primavera-verano 2012-2013 del D.R. 052, Durango	75
Tabla 5.36 Estadística agrícola de perennes 2012-2013 del D.R. 052, Durango.....	76
Tabla 6.1 Directrices para interpretar la calidad de las aguas para riego	81
Tabla 6.2 Tolerancia relativa de algunos cultivos al sodio intercambiable	82
Tabla 6.3 Tolerancia relativa al boro de algunos cultivos.....	83
Tabla 6.4 Factores que afectan la infiltración del agua en el suelo.....	87
Tabla 6.5 Clasificación de la permeabilidad de suelos.....	88
Tabla 6.6 Grado de restricción de uso de agua de riego por presencia de sólidos.....	89
Tabla 6.7 Límites de contaminantes de grasas y aceites, para aguas residuales especificados en la normativa mexicana	89
Tabla 6.8 Remoción de patógenos usando microfiltración.....	92
Tabla 7.1 Grado de restricción del agua de riego por iones tóxicos.....	104
Tabla 7.2 Clasificación de riesgos de salud por el uso de aguas residuales; asociados a cultivos y prácticas de manejo.....	106
Tabla 7.3 Límites de contaminantes patógenos.....	108
Tabla 7.4 Factores a considerar en la elección del método de riego	109
Tabla 7.5 Matriz de variables para la selección del método de riego	109
Tabla 7.6 Condicionantes para sistemas de riego con agua residual	110
Tabla 7.7 Guía para la selección del método de riego	112
Tabla 7.8 Características de los acolchados plásticos y sus usos	119
Tabla 7.9 Tiempo (en días) de supervivencia de patógenos en suelo, agua y cultivos	124

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 8.1 Riesgos a la salud por grupo expuesto al contacto con las aguas residuales en zonas de reúso	131
---	-----

“El agua residual ya no debe ser vista como un producto de desecho, sino como un recurso hídrico que mediante el tratamiento potencia su reúso productivo”

Revisión de conceptos asociados al reúso



1

Capítulo 1

REVISIÓN DE CONCEPTOS ASOCIADOS AL REÚSO

1.1 ¿Que és el reúso?

El reúso del agua se define como el aprovechamiento de las aguas residuales tratadas en actividad diferente a la que las originó, y se ha clasificado de acuerdo con el uso o sector donde se establece su aprovechamiento: urbano, industrial, agrícola, usos urbanos no potables, recargas de aguas subterráneas, recreativos, piscicultura y usos potables (Brega Filho y Mancuso, 2003).

1.2 ¿Qué son las aguas residuales (AR)?

Son las aguas de composición variada, provenientes de las descargas de usos domésticos, municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuario y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas.

1.3 ¿Qué es el agua residual doméstica?

Es el agua de desecho que proviene del uso residencial (de las casas de una población). Sus principales contaminantes son microorganismos patógenos y alta carga de sólidos disueltos y en suspensión, y concentraciones variables de nitrógeno y fósforo.

1.4 ¿Qué es el agua residual industrial?

Es el agua de desecho proveniente de los diferentes procesos de transformación industrial de materia prima para la obtención de satisfactores tanto para la sociedad, como para el desarrollo de otras actividades económicas. Los contaminantes presentes en estas aguas son muy variados y dependiendo del giro industrial de que se trate, se pueden encontrar grasas y aceites, metales pesados y sustancias tóxicas.

1.5 ¿Qué es el agua residual municipal?

Es el agua de desecho que se genera en un municipio compuesta por las aguas residuales de los hogares más el agua de desecho proveniente de actividades comerciales y de servicios, más la escorrentía del agua de lluvia. En la mayoría de los casos estas aguas se colectan en un mismo sistema de alcantarillado.

1.6 ¿Qué es el agua residual tratada?

Es el agua residual que se colecta en un sistema de alcantarillado y es conducida hasta una planta de tratamiento, donde pasa por un tren de tratamiento con procesos que pueden ser fisicoquímicos o biológicos, con el objetivo de remover contaminantes para mejorar su calidad y hacerla apta para reúso.

1.7 ¿Qué son las aguas residuales de reúso?

Son las aguas residuales que han sido tratadas y que cumplen con la calidad (según la normatividad vigente), para ser reutilizadas en diversas actividades productivas, entre ellas la agricultura de riego. Estas aguas también son aprovechadas en servicios al público.

*“Para muchos países las aguas residuales son un desecho y un problema,
para otros, abren un mundo de posibilidades de reúso”*

Características de las aguas residuales



2

Capítulo 2

CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales poseen una composición variada dependiendo de la actividad y uso que les dio origen y por lo tanto las concentraciones de contaminantes presentes también varían. Sin embargo, de manera general se puede decir que las aguas residuales contienen materia orgánica, organismos patógenos, grasas y aceites, nutrientes, contaminantes tóxicos orgánicos e inorgánicos y minerales disueltos.

En promedio el agua residual cruda contiene alrededor de 1 000 mg / L de sólidos en solución y suspensión, lo que equivale a decir que es agua en un 99.9 %, como se puede observar en la **Figura 2.1**. Esta característica hace que, una vez tratadas, las aguas residuales constituyan un valioso recurso con mucho potencial de reúso en distintas actividades.

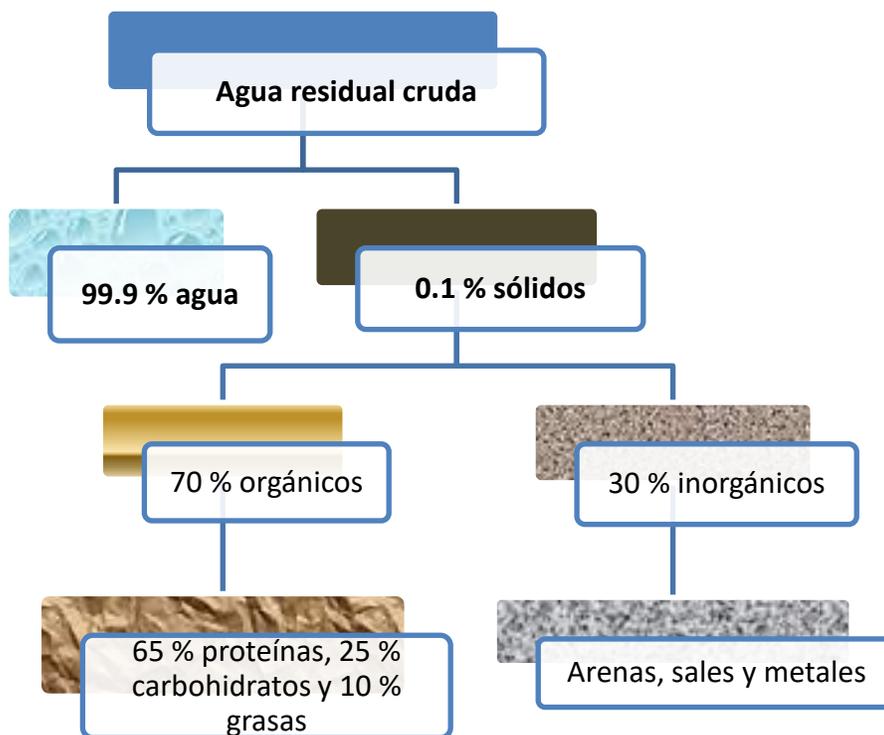


Figura 2.1 Composición del agua residual (Adaptado de Noyola *et al.*, 2000)

2.1 Caracterización de las aguas residuales con fines de reúso

Caracterizar el agua residual debe ser el primer paso en todo proyecto de reúso. Este proceso se realiza a través del monitoreo de muestras de agua (**Figura 2.2**) para determinar los parámetros físicos, químicos y biológicos que indicarán su calidad y por lo tanto su potencialidad de aprovechamiento. Los parámetros de mayor importancia se muestran en la **Tabla 2.1**.



Figura 2.2 Toma de muestra de agua residual para su caracterización

2.2 Importancia de la caracterización de las aguas residuales

Determinar los contaminantes presentes en el agua residual y su concentración resulta importante debido a los riesgos de salud y ambientales que pueden generarse durante su reúso en las actividades productivas o de servicios. Por ello, en muchas normas oficiales vigentes en distintos países se especifican los límites máximos de contaminantes para aguas residuales, ya sea que se descarguen a receptores como cuerpos de agua o suelos, se reúsen con fines productivos en la agricultura, acuicultura, ganadería, etc., o se reúsen en servicios al público (**Figura 2.3**).



Figura 2.3 Tanques elevados de almacenamiento de agua tratada para reúso en servicios al público

La **Tabla 2.1** resume la importancia de cada uno de los parámetros que normalmente se piden para caracterizar las muestras de agua residual tomadas en cada uno de los sitios seleccionados para tal fin (**Figura 2.4**).

Tabla 2.1 Parámetros más importantes para caracterizar el agua residual para reúso

Parámetros físicos	Parámetros químicos	Parámetros biológicos
Turbiedad	pH	Coliformes totales
Sólidos totales	Alcalinidad	Coliformes fecales
Sólidos sedimentables	Acidez	Huevos de helminto
Sólidos disueltos totales	Oxígeno disuelto	Protozoarios
Color	Demanda de oxígeno	Virus
Olor	Nitrógeno total	
Temperatura	Nitrógeno amoniacal	
	Nitrógeno de nitritos	
	Nitrógeno de nitratos	
	Fósforo	
	Cloruro	
	Grasas y aceites	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.2 Importancia de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos que caracterizan las aguas residuales

Parámetro	Importancia
Temperatura	Cuando rebasa los valores establecidos en la normatividad vigente puede dañar o provocar la muerte de fauna acuática. Lo más recomendable es que la temperatura del agua en el sitio de descarga no rebase los 25° C.
Turbidez	Afecta principalmente la efectividad de los procesos de desinfección utilizados para tratar el agua, por lo que en el efluente pueden sobrevivir microorganismos patógenos que ponen en riesgo tanto la salud de los trabajadores agrícolas que entren en contacto con el agua de riego como la de los consumidores de productos regados con las aguas residuales.
Color	Limita la aceptación de los usuarios interesados en el reúso del agua. Puede ser indicativo de algunos contaminantes disueltos.
Sólidos	Provocan azolvamientos que pueden reducir el caudal del canal de distribución o azolvamiento en el sitio de descarga. Cuando su concentración supera los límites máximos permisibles que marca la normatividad vigente, pueden provocar obstrucciones en sistemas de riego presurizado, reduciendo su vida útil.
Grasas y aceites	En cuerpos de agua forman películas superficiales que impiden la transferencia de oxígeno y luz; aumentan la demanda bioquímica de oxígeno. En los suelos afectan la permeabilidad provocando reducción en la velocidad de infiltración del agua.
Sales solubles (Ca, Na, Mg, Cl o B)	En los suelos crean costras superficiales, se afecta la presión osmótica por lo que la planta no puede absorber eficientemente el agua. En el cultivo puede provocar daño como necrosis o clorosis.
Metales pesados y plaguicidas	Provocan toxicidad, pueden afectar la estructura celular de los microorganismos presentes en los sitios de descarga o en la zona de aprovechamiento, se puede presentar traslocación de estos contaminantes hacia el interior de las plantas o cultivos regados.
pH	Valores fuera del rango conocido como neutro pueden condicionar la disponibilidad de nutrientes para los cultivos y pueden hacer solubles ciertos metales.
Cloro residual	Valores por encima de 0.5 mg / L pueden afectar a cultivos sensibles.
Nitrógeno, fósforo o potasio	En concentraciones arriba de los límites marcados por la normatividad, pueden afectar el suelo, plantas o cuerpos de agua a donde lleguen las descargas de aguas residuales.
Patógenos (bacterias, virus protozoarios o helmintos)	Su presencia incrementa el riesgo de salud pública entre trabajadores agrícolas que entran en contacto con el agua residual o en consumidores de productos regados.

Fuente: Adaptado de Pescot (1992)



Figura 2.4 Entrega de muestras de aguas residuales para su caracterización

“El aprovechamiento o reúso de las aguas residuales no es un concepto nuevo”

Breve historia de la reutilización de las aguas residuales



3

Capítulo 3

BREVE HISTORIA DE LA REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

La historia del reúso de las aguas residuales se remonta a casi 3 000 años. Algunos hallazgos arqueológicos han revelado que en la isla de Creta, en Grecia, las aguas residuales de los palacios eran desalojadas por un sistema de alcantarillado primitivo y eran descargadas en zanjas a las afueras de la ciudad, de donde se distribuían para el riego de huertas de olivares y en campos agrícolas donde se cultivaba trigo y cebada (**Figura 3.1**).

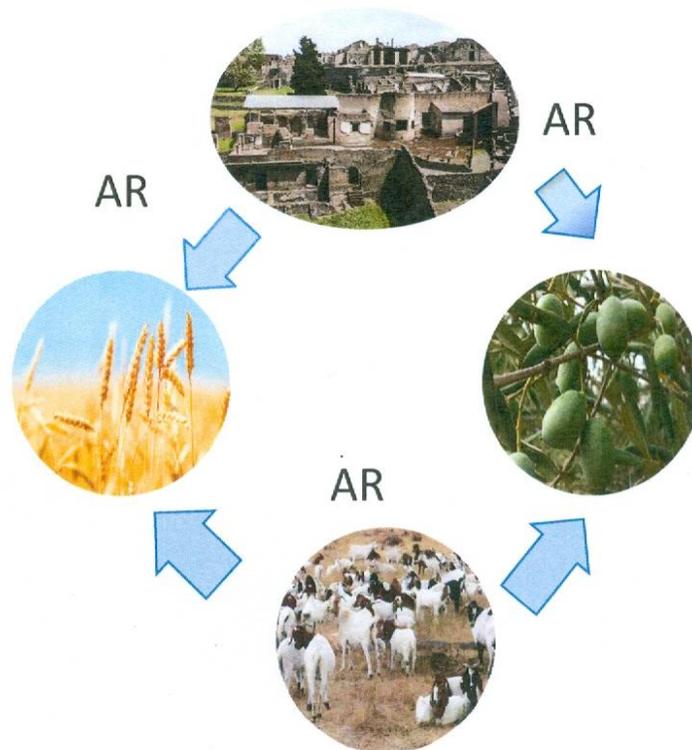


Figura 3.1 Primer modelo de reúso de las aguas residuales en tiempos antiguos

El historiador griego Herodoto (484-425 a.C.) registró en sus escritos que, en la ciudad de Babilonia (ubicada en la Baja Mesopotamia), el agua de desecho de la ciudad se canalizaba a un sumidero, donde decantaba y sedimentaba para evitar la contaminación del río (Moreno *et al.*, 2003). Esto evidencia que en aquella civilización existía un grado de conciencia entre la sociedad sobre los riesgos de verter las aguas residuales directamente a cuerpos de agua. Aunque no se menciona de forma explícita, se cree que este hecho fue lo que llevó al reúso de las aguas residuales con fines productivos, principalmente en la actividad agrícola.

Existen indicios de que en el siglo XVI las aguas residuales ya se aprovechaban para riego agrícola en Inglaterra y Alemania, aunque de manera incipiente y en pequeñas superficies. Las aguas residuales se conducían de las zonas pobladas hacia zonas sembradas con árboles de eucalipto (*Eucalyptus globulus*), los cuales suministraban madera para la construcción (**Figura 3.2**).

Fue en el siglo XVIII cuando se comenzó a intensificar y a registrar el aprovechamiento de las aguas residuales con fines productivos para agricultura de riego en países como Malta, Italia, Francia, México, China, Egipto y Líbano (Asano y Levine, 1996). Los principales cultivos regados con estas aguas fueron de tipo forrajero, entre los que sobresalen pastos y alfalfas (**Figura 3.3**).



Figura 3.2 Eucaliptos regados con aguas residuales



Figura 3.3 Cultivo de alfalfa regado con aguas residuales

En el periodo de la posguerra la creciente necesidad de optimizar los recursos hídricos renovó el interés por el aprovechamiento de las aguas residuales en países como África del Sur, Alemania, Arabia Saudita, Argentina, Australia, Chile, China, Estados Unidos, India, Israel, Kuwait, México, Perú, Sudán y Túnez (Parreiras, 2005, citado por Silva *et al.*, 2008). Sin embargo, esta práctica se ha ido generalizando con mayor énfasis durante la segunda mitad del siglo XIX. Se ha documentado el reúso y su tipo de aplicación en distintos lugares alrededor de todo el mundo, tal como puede observarse en las tablas **3.1** y **3.2**.

Tabla 3.1 Registros documentados del reúso de agua residual

País o localidad	Fecha de inicio	Superficie (ha)	Caudal usado (m³/s)
Berlín, Alemania	1874	2 720	N.d.
Braunchweig, Alemania	1896	4 400	0.7
Croydon-Beddington, Inglaterra	1860	252	0.2
Leamington, Inglaterra	1870	160	0.04
Melbourne, Australia	1893	4 160	2.19
Valle del Mezquital, México	1890	90 000	N.d.
París, Francia	1869	640	3.46
Wroclaw, Polonia	1882	800	1.23
Calumet City, MI, EUA	1888	4.8	0.05
Ely, Nevada, EUA	1908	160	0.07
Fresno, CA, EUA	1891	1 600	1.14
San Antonio, TX, EUA	1895	1 600	0.88
Vineland, NJ, EUA	1901	5.6	0.04
Woodland, CA, EUA	1889	96	0.18

Fuente: Adaptado de Metcalf & Eddy (1994)

Fue a mediados del siglo XVII que se acuñó el término “granjas de aguas residuales”, porque en ellas se usaban las aguas residuales que provenían de las ciudades para el riego de cultivos agrícolas en muchos países. Estas granjas representaron el medio por el cual pequeños caudales de aguas residuales podían ser descargados sobre terrenos agrícolas para reúsarlos en el riego y de esta manera evitar la contaminación de los ríos, principal fuente de abastecimiento para la población. Así surgió la práctica del reúso a pequeña escala en sitios periféricos a las ciudades.

Tabla 3.2 Surgimiento de las granjas de aguas residuales

País	Año
Reino Unido	1865
Estados Unidos de América	1871
Francia	1872
Alemania	1876
India	1877
Australia	1893
México	1904

Fuente: Adaptado de Mara y Cairncros (1990)

A medida que la población fue aumentando y las ciudades fueron creciendo, la oferta de agua residual se fue intensificando, de manera que las granjas de aguas residuales ya no podían recibir más pues no contaban con la superficie requerida para este fin. A principios de 1900 surgió el término “campos de aplicación”, que involucraba mayores superficies adonde el agua residual se canalizaba a través de acequias construidas específicamente para tal fin, y de ahí se distribuía para el riego de plantaciones forestales principalmente (**Tabla 3.3**). A partir de 1910, al mismo tiempo que las ciudades crecían y los volúmenes de aguas residuales también se incrementaban, la práctica del reúso del agua comenzó a diversificarse dentro de las propias ciudades. De esta manera surgió el reúso en servicios al público (para el riego de parques, jardines, campos deportivos, etc.) (**Figura 3.4**) y solo en algunos sitios se destinaba únicamente para riego agrícola (**Tabla 3.4**).

**Figura 3.4** Campo deportivo regado con aguas residuales

Tabla 3.3 Sitios con campos de aplicación de aguas residuales para riego de árboles forestales

Sitio	Año	Árboles regados
El-Gabal El-Asfar, El Cairo, Egipto	1911	Casuarina glauca, Eucalyptus camuldulensis y Tamarix aphylla, 200 ha
Pensilvania, EUA	1963	Quercus spp; Pinus resinosa y Picea glauca
España (municipalidad de Monzón)	1983	Populus euroamericana, en 245 ha
Kuwait	1985	Tamarix aphylla, Eucalyptus camaldulensis y Acacia salicina, usados en cortina rompevientos a lo largo de la carretera Kuwait-Jahara y Jahara

Fuente: Adaptado de S. Braatz y A. Kandiah. s.f. –FAO-Unasylya- Núm.185. Vol. 47

Tabla 3.4 Ejemplos de aprovechamiento del agua residual en distintos lugares del mundo

Año	Localidad	Tipo de aprovechamiento
1889	Valle del Mezquital, Hidalgo, México	Riego de cultivos forrajeros y granos principalmente
1912-1985	Golden Gate Park, San Francisco	Riego de prados y llenado de lagos
1926	Pomona City CA, EUA	Riego de prados y jardines
1960	Colorado Springs, CO, EUA	Riego de campos de golf, parques, cementerios y camellones de autopistas
1987	Monterrey, CA, EUA	Riego de cultivos que se comen crudos (alcachofas, lechuga, apio y coliflor)
1962	Túnez	Riego para huertas de cítricos y recarga de aguas subterráneas
1968	City of Windhoek, Namibia	Para aumentar la disponibilidad de agua potable, después de su tratamiento terciario
1969	City of Wagga Wagga (Nuevo Gales del Sur), Australia	Riego de campos deportivos, parques y cementerios
1977	Proyecto en la Región de Dan. Tel Aviv, Israel.	Riego irrestricto de cultivos agrícolas y recarga de acuíferos
1984	Tokio Metropolitan Government, Japón	Reúso no potable en 19 edificios del centro de Tokio
1989	Consortio de la Costa Brava, Girona, España	Riego de campos de golf

Fuente: Adaptado de Metcalf & Eddy (2004)

*“Muchos países están apostando al aprovechamiento o reúso de las aguas residuales
con distintos fines por sus grandes beneficios”*

**Revisión de algunas experiencias sobre
reúso de las aguas residuales en el ámbito
internacional**

4

Capítulo 4

REVISIÓN DE ALGUNAS EXPERIENCIAS SOBRE REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN EL ÁMBITO INTERNACIONAL

4.1 Experiencia del reúso en Argentina

El reúso planeado en Argentina comenzó en 1976 en la provincia de Mendoza, donde el agua residual de la ciudad era conducida a través del alcantarillado para su tratamiento en un sistema de lagunaje. La provincia de Mendoza cuenta con más de 9 408 ha regadas en áreas de cultivo restringidos especiales (ACRE) a partir de una recuperación de aguas de casi el 90 % del sistema cloacal que da servicio a una población de 800 000 habitantes (Garduño, 2003; Mastrantonio, 2006). La provincia aplica un complejo normativo que determina la calidad de efluentes y categorías de reúso de los efluentes cloacales, según la Resolución 715/00 en las ACRE (Fasciolo, 2001).

El primer sitio con reúso en la provincia de Mendoza fue Campo Espejo (**Figura 4.1**), ubicado en el departamento de Las Heras, donde se trata un volumen de 120 000 m³/día a través de un sistema de lagunas facultativas. La calidad del agua obtenida cumple con las directrices de las aguas residuales empleadas en agricultura para riego restringido, lo que permite su reúso directo a través de convenios tripartita entre la Empresa Operadora de las Lagunas, el Departamento General de Irrigación (máxima autoridad del agua en la provincia) y la organización de regantes de la zona.



Figura 4.1 Lagunas para tratar aguas residuales en Campo Espejo, provincia de Mendoza, Argentina



Figura 4.2 Campos de vid con aprovechamiento de aguas residuales en Mendoza, Argentina

Los resultados de una evaluación hecha a las aguas residuales tratadas en Campo Espejo, de enero a diciembre del año 2000, mostraron eficiencias de remoción de contaminantes en 49.66 % de sólidos suspendidos, 76.26 % de materia orgánica (DBO5), 99.99 % de *Escherichia coli*, 100 % de parásitos (nematodos), 36.2 % de nitrógeno amoniacal y 5.44 % de fósforo total. La superficie beneficiada con el reúso de las aguas residuales tratadas en Campo Espejo es de 2 000 ha, lo que beneficia a 100 unidades productivas donde se cultivan 655 ha de vid para vino de mesa (**Figura 4.2**), 548 ha de hortalizas varias (pimiento, zapallo, zanahoria, cebolla, papa y tomate), 107 ha de árboles forestales y 118 ha de árboles frutales (CEPIS, 2001).

4.2 Experiencia del reúso en España

Los historiadores sitúan al reúso de aguas residuales en España a partir del siglo XV, específicamente en la periferia de las ciudades de Madrid, Salamanca y Toledo, donde surgió como consecuencia de una necesidad, no de un uso planeado. Se requería alejar las aguas residuales de las ciudades, pero al mismo tiempo se presentó el problema de no contaminar los cuerpos de agua con esos vertidos, por lo que se buscó conducirlos hacia terrenos arbolados.

El primer intento planeado de aprovechar las aguas residuales en España fue en 1955, cuando se estableció un programa de reforestación para estabilizar riveras de ríos (**Figura 4.3**), y durante el cual se plantaron franjas de especies forestales, como álamos (*Populus euroamericana*), establecidas en los límites de las riveras de los ríos. Estas zonas forestadas eran regadas con aguas residuales provenientes de una planta de tratamiento, experiencia que en los años 80 se retomó con el nombre de “filtros verdes”. que eran estas mismas franjas de terreno reforestado que aprovechaban las aguas residuales tratadas para riego.

En los 90 el problema de la sobreexplotación de los acuíferos subterráneos llevó a España a reconocer que las aguas residuales son un recurso hídrico que puede mejorar su calidad fisicoquímica y bacteriológica a través del tratamiento, y que podían ser útiles para complementar la demanda de agua para uso agrícola si se mezclaban con aguas superficiales de ríos. Así se redujo la extracción de volúmenes del acuífero que se usaban para complementar la demanda de riego, lo que representó un primer paso para buscar la recuperación de los acuíferos. Las proporciones de mezclas de agua que se utilizaron fueron 75 % de aguas superficiales y 25 % de aguas residuales tratadas, usadas en el riego agrícola (**Figura 4.4**).



Figura 4.3 Franjas de árboles regados con aguas residuales, proyecto para estabilizar taludes de ríos en España



Figura 4.4 Mezcla de aguas superficiales con agua residual

Fue hasta el 2006 que en España la reutilización de aguas regeneradas se reguló con la Ley de Aguas y el proyecto del Real Decreto, que establecen que toda reutilización precisa de autorización administrativa y un convenio entre el gestor de la instalación y los usuarios. En el proyecto del Real Decreto de fecha 22 de mayo de 2006 se establecen las condiciones básicas para la reutilización de las aguas depuradas y se modifica parcialmente el reglamento del dominio público hidráulico aprobado por el Real Decreto 849/1986 del 11 de abril. Según el proyecto de Real Decreto del 22 de mayo de 2006, las aguas regeneradas podrán utilizarse según los criterios y valores máximos admisibles (**Tabla 4.1**).

Tabla 4.1 Criterios de calidad para la reutilización de las aguas residuales, según sus usos

Calidad	Valor máximo admisible			
	Nematodos intestinales	Escherichia coli	Sólidos en suspensión	Turbidez
1.1	1 huevo /10 L	0 UFC /100 ml	10 mg /L	2 UNT
1.2	1 huevo /10 L	200 UFC /100 ml	20 mg /L	10 UNT
2.1	1 huevo /10 L	200 UFC /100 ml	20 mg /L	10 UNT
2.2	10 huevos /10 L	1000 UFC /100 ml	35 mg /L	No se fija límite

	Valor máximo admisible			
Calidad	Nematodos intestinales	Escherichia coli	Sólidos en suspensión	Turbidez
2.3	10 huevos /10 L	10000 UFC /100 ml	35 mg /L	No se fija límite
3.1	No se fija límite	10000 UFC /100 ml	35 mg /L	15 UNT
4.1	1 huevo /10 L	200 UFC /100 ml	20 mg /L	10 UNT
4.2	1 huevo /10 L	200 UFC /100 ml	20 mg /L	10 UNT
4.3	No se fija límite	10000 UFC /100 ml	35 mg /L	No se fija límite
5.1	No se fija límite	1000 UFC /100 ml	35 mg /L	No se fija límite
5.2	1 huevo /10 L	0 UFC /100 ml	10 mg /L	2 UNT
5.3	No se fija límite	No se fija límite	35 mg /L	No se fija límite
5.4	Calidad mínima requerida se estudiará por caso			

Fuente: Anexo 1 A. Proyecto del Real Decreto del 22 de mayo de 2006. España

El 7 de diciembre de 2007 fue aprobado el Real Decreto 1620/2007 en España, donde se estableció el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas y se determinaron los requisitos para reutilizar las aguas regeneradas, los procedimientos a seguir para obtener la concesión exigida en la Ley, así como la calidad del agua requerida en cada caso (BOE, 2007). En el caso del riego agrícola, el Real Decreto 1620/2007 estableció 3 calidades de agua, y es el que hasta la fecha (2016) sigue rigiendo en cualquier proyecto de reúso de aguas residuales para agricultura (**Tabla 4.2**).

Tabla 4.2 Valores máximos admisibles para usos agrícolas en España

Usos agrícolas	Valor máximo admisible				Otros criterios *
	Nematodos intestinales	Escherichia coli	Sólidos en suspensión	Turbidez	
Calidad 2.1 Riego de cultivos con sistema de aplicación del agua que permita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles para alimentación humana en fresco	1 huevo/10 L	100 UFC/100 mL	20 mg /L	10 UNT	Legionella spp. 1000 UFC/L (Si existe riego de aerosolización)

Reúso de aguas residuales en la agricultura	4. Revisión de algunas experiencias sobre reúso de las aguas residuales en el ámbito internacional
---	--

Usos agrícolas	Valor máximo admisible				
	Nematodos intestinales	Escherichia coli	Sólidos en suspensión	Turbidez	Otros criterios *
Calidad 2.2 a) Riego de productos para consumo humano con sistema de aplicación de agua que no evita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles, pero el consumo no es en fresco sino con un tratamiento industrial posterior b) Riego de pastos para consumo de animales productores de leche o carne c) Acuicultura	1 huevo /10 L	1000 UFC/100 mL	35 mg /L	No se fija límite	Taenia saginata y Taenia solium 1 huevo/L (Si se riegan pastos para consumo de animales productores de carne)
Calidad 2.3 a) Riego localizado de cultivos leñosos que impida el contacto del agua regenerada con los frutos consumidos en la alimentación humana b) Riego de cultivos de flores ornamentales, viveros, invernaderos sin contacto directo del agua regenerada con las producciones c) Riego de cultivos industriales no alimentarios, viveros, forrajes ensilados, cereales y semillas oleaginosas	1 huevo /10 L	1000 UFC/100 ml	35 mg/L	No se fija límite	Legionella spp. 100 UFC/L
Adicionales					
Conductividad 3.0 dS/m; RAS 6 meq/L, Boro 0.5 mg/L, Arsénico 0.1 mg/L, Berilio 0.1 mg/L, Cadmio 0.01 mg/L, Cobalto 0.05 mg/L, Cromo 0.1 mg/L, Cobre 0.2 mg/L, Manganeso 0.2 mg/L, Molibdeno 0.01 mg/L, Níquel 0.2 mg/L, Selenio 0.02 mg/L, Vanadio 0.1 mg/L					

Fuente: Elaborado con datos del Real Decreto 1620/2007 (BOE, 2007)

*Solo se mencionan los más importantes, aunque existen otros que pueden ser consultados en el documento fuente

El fomento que se ha hecho para el reúso de las aguas residuales tratadas, conocidas comúnmente como aguas regeneradas, reconoce que estas han mejorado su calidad a través del tratamiento, haciéndolas aptas para el reúso en distintas actividades y en distintas zonas. En este marco, por ejemplo, en la provincia de Andalucía se reutilizan 53 Hm³ de aguas residuales tratadas, y de este volumen, el 32.2 % va directamente al riego agrícola donde se beneficia una superficie de 3 500 ha de cultivo bajo invernadero localizados en la subcomarca del bajo Andarax en Almería (Junta de Andalucía, 2007) (**Figura 4.5**).

Una de las razones que justifica la reutilización de las aguas residuales para riego de cultivos hortícolas en las condiciones de Almería es su moderada concentración de sales y su alto contenido en nutrientes, especialmente N, P y K, elementos esenciales para la nutrición de las plantas (Baeza *et al.*, 2012). Estas condiciones han reforzado la aceptabilidad de los productores agrícolas españoles. El Distrito Hidrográfico Mediterráneo de Andalucía va a la vanguardia en el aprovechamiento de las aguas

residuales tratadas. Su principal destino es abastecer la demanda de 29 campos de golf situados en la Costa del Sol (**Figura 4.6**).

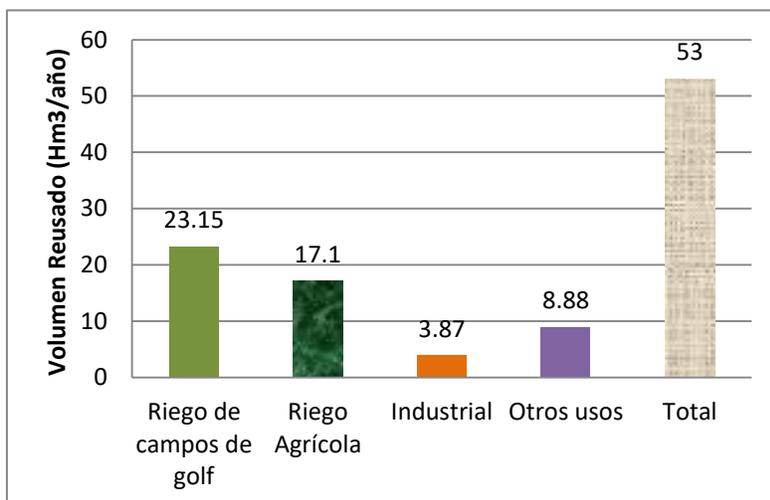


Figura 4.5 Distribución del reúso en Andalucía, España (2007)



Figura 4.6 Campo de golf regado con aguas residuales tratadas

En la **Tabla 4.3** se puede observar el reúso del agua tratada de Andalucía en cada provincia que la integra, así como el destino de los aprovechamientos.

Tabla 4.3 Reúso de las aguas residuales tratadas por provincia en Andalucía, España

Reúso del agua tratada (Hm ³ /año)							
Organismo de cuenca	Provincia	Riego agrícola	Riego campos de golf	Industriales	Urbanos	Otros	Total general
D.H. Guadalete-Barbate	Cádiz	8.17	1.22				9.38
D.H. Mediterráneo	Almería	6.00					6.00
	Málaga		21.35				21.35
D.H. Guadalquivir	Córdoba			0.78			0.78
	Granada	0.04			0.01		0.05
	Jaén	1.58					1.58
	Sevilla	1.18	0.21	2.78			4.17
Segura	Almería	0.14	0.37	0.31	0.64		1.46
Total Andalucía		17.10	23.16	3.87	0.65	8.88	53.66

Fuente: Elaborado con datos de la Junta de Andalucía (2007). D.H.=Distrito Hidrológico

A partir del 2011 en España se inició el aprovechamiento de las aguas residuales para el riego de cultivos con fines de producción de combustibles alternativos, llamados comúnmente biocombustibles. Uno de los cultivos sembrados para tal fin es la *Jatropha curca* (**Figura 4.7**), conocida localmente como “coquillo”. Es una planta de origen tropical, de la familia *Euphorbiaceae*, de cuyas semillas se puede extraer aceite. Por su calidad este aceite puede reemplazar al keroseno, al petróleo y a la leña/carbón, por lo que se promueve su uso internacionalmente (Toral *et al.*, 2008).

**Figura 4.7** Ejemplo de planta regada con aguas residuales para producir biocombustible en España

España ha ido avanzando paulatinamente en el aprovechamiento de sus aguas residuales tratadas, de manera que pasó de reusar un 9 %, equivalente a 230 Hm³/año en el 2000, a un 14 % que representó 450 Hm³/año en el 2010. En el 2015 ocupa el segundo lugar a nivel mundial en el reúso de sus aguas tratadas, con una tasa de aprovechamiento del 17 % del total tratado.

4.3 Experiencia del reúso en Israel

Restos arqueológicos de pequeñas acequias encontradas en los alrededores de Jerusalén, correspondientes a un periodo ubicado alrededor de 1000 a.C., han permitido deducir que las aguas residuales de la ciudad eran canalizadas a través de estas acequias (pequeños canales construidos con piedra), para enviarla a reservorios (con forma muy similar a lagunas pequeñas), donde se sedimentaban y después de algunos días, eran aprovechadas para regar árboles de oliva (también llamados “aceitunos”), muy apreciados por la cultura judía (**Figura 4.8**).



Figura 4.8 Restos de acequias que eran usadas para sacar las aguas residuales de Jerusalén

Para muchos países las aguas residuales son consideradas como un problema, sin embargo, para Israel son un recurso muy apreciado. Este país cuenta con una política hídrica de gestión integral del recurso agua que valora y fomenta el reúso, enmarcándolo en tres vertientes: protección de la salud, cuidado del medio ambiente y reciclaje en producción agrícola.

A comienzos de 1970 Israel comenzó a aplicar el riego con aguas residuales en forma masiva para la producción de algodón (**Figura 4.9**). Para 1990, al mejorarse el tratamiento y la calidad del agua, el riego se diversificó a un mayor patrón de cultivos, entre los que destaca el riego de vid (que produce uva para vino), aceituna para producir aceite y para consumo en salmuera, dátiles, trigo, jojoba, flores de corte y algunas hortalizas como pimientos y tomates (**Figura 4.10**). La metodología israelí para aprovechar las aguas residuales consiste básicamente en usar reservorios como

unidades de tratamiento o pulimento y al suelo lo consideran un biofiltro, por lo que el reúso principal es en riego agrícola.



Figura 4.9 Cultivo de algodón regado con aguas residuales



Figura 4.10 Ejemplos de cultivos en los que son actualmente reusadas las aguas residuales en Israel

En la zona de Arad, en Israel, se han realizado evaluaciones de la contaminación de suelos por la práctica del reúso en riego. Se identificó una alta remoción de microorganismos patógenos en el suelo, con lo que resulta una buena correlación entre la reducción de indicadores fecales, el contenido de materia orgánica y el pH (Campos *et al.*, 2000, citado por Silva, 2008).

Los reservorios de aguas residuales de Israel fueron construidos por el Keren Kayemet Leisrael (organización no gubernamental fundada en 1901, y que en el 2004 fue reconocida por las Naciones Unidas por ser una organización líder en la recuperación de tierras, conservación y reúso del agua y forestación), cuyos objetivos siguen aún vigentes y consisten en aumentar el balance disponible del recurso hídrico, mejorar la calidad del agua y reusarla en riego agrícola. En Israel existen alrededor de 200 reservorios para tratamiento o pulimento de las aguas residuales (**Figura 4.11**). Su

profundidad es de 8-15 m y su plantilla está recubierta con geomembranas para impedir la infiltración de contaminantes.

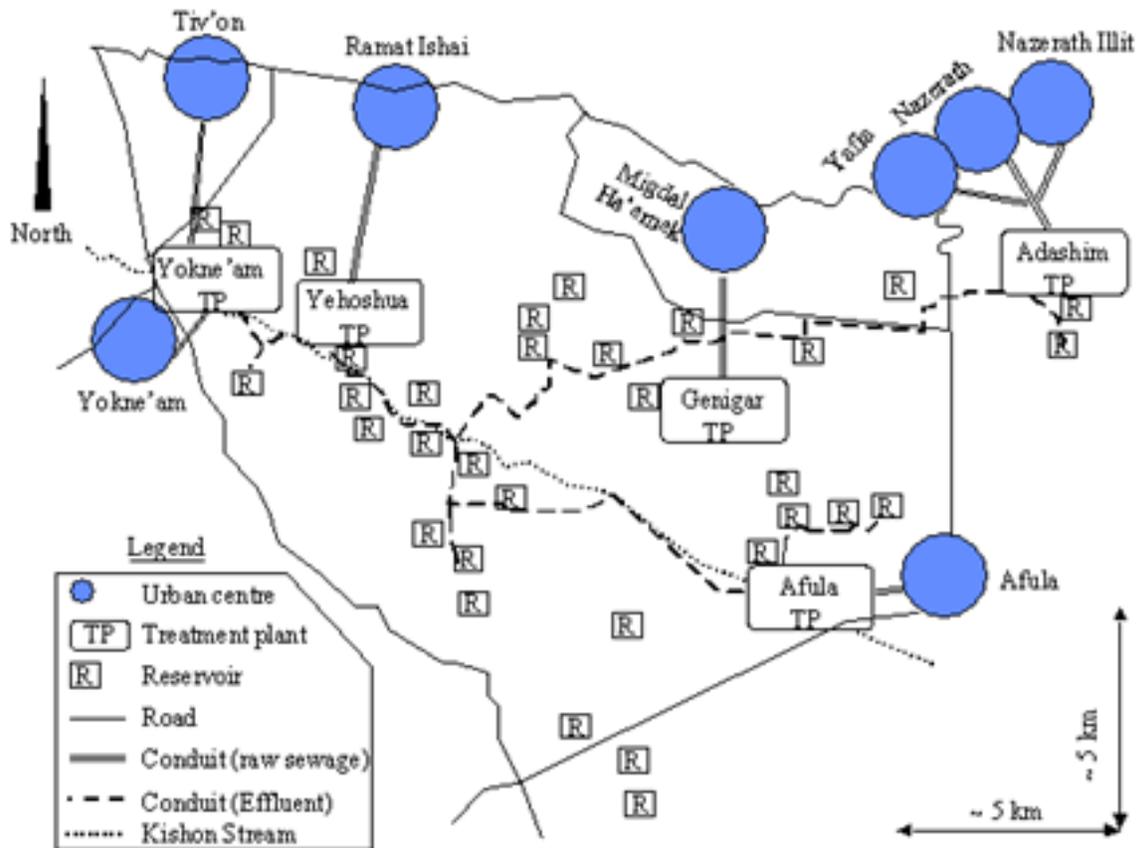


Figura 4.11 Ubicación de algunos reservorios para pulimento de aguas residuales en Israel

El mayor reservorio de aguas residuales está cerca de la ciudad de Haifa (**Figura 4.12**), y almacena 12 Mm³ de aguas para reúso en agricultura. Estos reservorios logran remover 90 % de la DBO, de 3-4 órdenes de magnitud de coliformes fecales, detergentes y otros contaminantes (Quipuzco, 2004). Los costos del tratamiento en estos reservorios son los más bajos en relación con otras alternativas, como se puede observar en la **Tabla 4.4**.



Figura 4.12 Reservorio para pulimento de aguas residuales para riego

Tabla 4.4 Comparativo del costo del tratamiento de aguas residuales con fines de reúso

Tecnología utilizada para mejorar calidad del agua	Costo (US cents/m³ tratado)
Reservorio de 7 a 15 m de profundidad (para reúso en riego agrícola)	7-15
Infiltración al suelo para recarga de acuíferos	17
Desalinización (para abasto público)	60-100

Fuente: Adaptado de Quipuzco (2004)

Las aguas residuales generadas en pequeñas comunas agrícolas llamadas mozhav son tratadas en sencillos y pequeños humedales artificiales, donde se reúsan para riego de cultivos de flor de corte. Un ejemplo es el mozhav de Zippori, que reúsa las aguas tratadas para el riego de flor que exporta a Japón.

El sistema de humedales usados es simple y consta de tres partes: una trampa de grasas, un sedimentador y el humedal propiamente dicho. Este humedal lleva en el fondo y las paredes una membrana impermeable para evitar filtraciones, capas de sustrato como grava de distintos grosores y suelo donde se siembran las plantas. Con este sencillo sistema, estas pequeñas comunas tratan sus aguas grises y las hacen aptas para riego en horticultura a pequeña escala.

Aparte del reúso agrícola, las aguas residuales tratadas en Israel también son aprovechadas para la recarga de acuíferos subterráneos mediante Soil Aquifer Treatment (Kanarek, 1996). Esta técnica permite infiltrar en el terreno agua residual pretratada utilizando el perfil del suelo para remover contaminantes que aún estén presentes y crear un flujo de agua descendente que recargue el acuífero. Después de un tiempo de residencia de aproximadamente 400 días, y a través del bombeo de pozos de recuperación, puede extraerse agua de buena calidad para su uso en distintas actividades, entre ellas el riego agrícola.

En el 2016 se estima que, de los 440 Mm³ de aguas residuales que produce Israel al año, 95 % se recoge en plantas depuradoras (**Figura 4.13**) y 75 % se trata, condición que lo posiciona en el primer lugar mundial en el reúso de las aguas residuales. Se espera que para el 2020 el 100 % de su agricultura de riego sea abastecida con aguas residuales, principalmente tratadas.



Figura 4.13 Planta depuradora para tratar aguas residuales con fines de reúso

4.4 Experiencia del reúso en Estados Unidos

En 1890, en Estados Unidos se establecieron los primeros reúsos de aguas residuales para riego agrícola en California, y en 1920 en Arizona, donde se usaron para regar cultivos de algodón, trigo y algunos forrajeros como maíz y alfalfa (Garduño *et al.*, 2003). En los años 60 se buscó aprovechar las aguas residuales tratadas para el riego de forestales en zonas boscosas creadas artificialmente, cuyo objetivo principal era crear las condiciones para la recarga de acuíferos, proyecto que comenzó en el estado de Pensilvania y después se siguió en el estado de Michigan (Sutherland *et al.*, 1974).

Las primeras zonas boscosas artificiales que fueron regadas con aguas residuales eran masas de árboles, compuestas principalmente por robles (*Quercus spp*), pino rojo (*Pinus resinosa*) y abeto blanco (*Picea glauca*) (Braatz y Kandiah-FAO-Unasyilva 185). Con el avance en los procesos de tratamiento de las aguas residuales, Estados Unidos ha ido mejorando la calidad del agua y con ello ha podido diversificar el patrón de cultivos que es posible regar con estas aguas, como se puede observar en la **Figura 4.14**.



Figura 4.14 Diversificación de los cultivos regados con agua residual en Estados Unidos

En la primera década del 2000 se fomentó con mayor énfasis el aprovechamiento de las aguas residuales. Así, algunas granjas porcinas ubicadas en los estados de Carolina del Norte y del Sur condujeron sus aguas residuales hacia terrenos donde se comenzó a sembrar pasto bermuda, el cual fue regado con estas aguas y generó ingresos a los porcicultores por la cosecha de forraje que comercializaban para la alimentación de ganado bovino (**Figura 4.15**). En el 2015 Estados Unidos reusaba el 7 % del total de sus aguas residuales tratadas (RWL Water, 2015). Actualmente se estima que el aprovechamiento de las aguas residuales (principalmente tratadas), se distribuye como se indica en la **Figura 4.16**.



Figura 4.15 Aprovechamiento de aguas residuales porcinas para riego de zacate bermuda

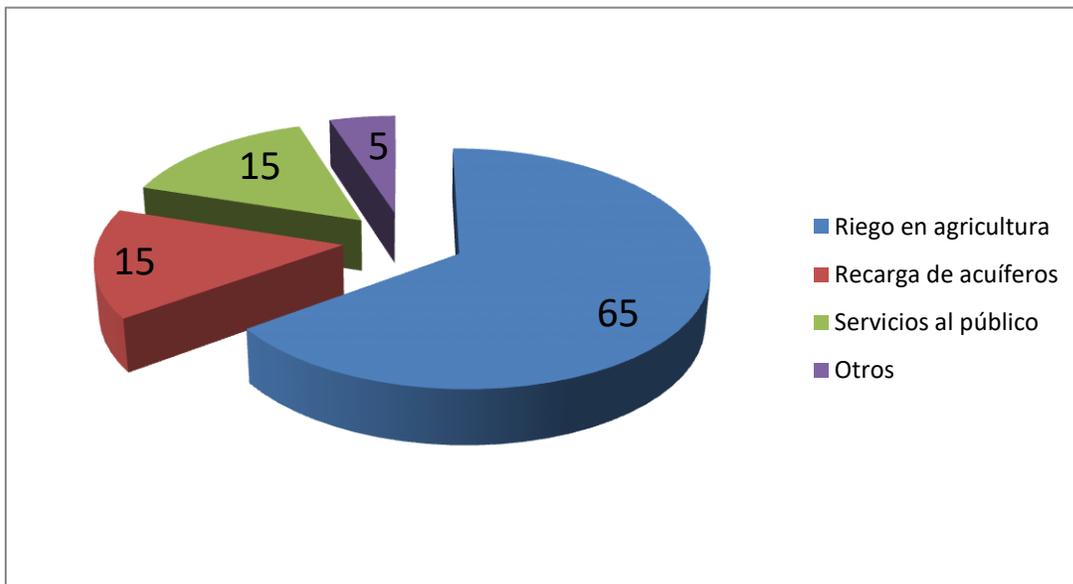


Figura 4.16 Distribución en porcentaje sobre el aprovechamiento de las aguas residuales en Estados Unidos

“México ocupa el segundo lugar mundial en el reúso de las aguas residuales para riego en agricultura”

**El reúso de las aguas residuales residuales
para agricultura en México**

5

Capítulo 5

EL REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN MÉXICO

5.1 Inicios del reúso para agricultura

El aprovechamiento de las aguas residuales surgió en México como consecuencia de la necesidad de desalojar aguas pluviales y residuales de la Ciudad de México a fin de evitar inundaciones y brotes de enfermedades entre la sociedad capitalina. La Ciudad de México está situada en la parte meridional y más alta de la meseta central de la cuenca del Valle de México y cuya extensión es de 8 058 km². La ciudad está rodeada de cordilleras entrelazadas, por lo que las aguas pluviales y residuales no tienen una salida directa.

En 1579 hubo una gran inundación en la Ciudad de México y se mezclaron las aguas pluviales con las aguas residuales, lo que generó un gran riesgo sanitario y llevó al arquitecto Claudio de Archiniega a proponer su desagüe. El cauce se llevó por el pueblo de Huehuetoca hasta Nochistongo y de ahí al río Tula en Hidalgo. Sin embargo, no fue sino hasta 1604 cuando se retomó la idea, y en 1607 el Virrey Luis de Velasco ordenó comenzar con las obras de desagüe, que estuvieron al mando de Enrico Martínez y quien comenzó el proyecto para sacar las aguas residuales a través de un túnel. Se hizo una apertura entre los cerros conocida como Tajo de Nochistongo (Aguilar *et al.*, 2007) y las aguas se canalizaron hacia el estado de Hidalgo, específicamente al Valle del Mezquital (ubicado en las coordenadas geográficas: longitud norte 20° 02' y longitud oeste 99° 15'), situado a una distancia aproximada de 60 km de la capital mexicana.

El Tajo de Nochistongo (también llamado Emisor del Poniente) tuvo una longitud total de 2 241 m (**Figuras 5.1 y 5.2**). El proyecto estuvo rodeado de problemas como derrumbes, falta de recursos, revueltas militares, abandono, etc. Fue hasta 1885, durante la administración del ingeniero Luis Espinoza, titular de la Junta Directiva de Desagüe de la Ciudad de México, que se retomó el proyecto para concluirlo en 1894. En 1856 continuaron las obras para hacer más eficiente el desagüe de la Ciudad de México, y se construyó el túnel de Tequixquiac (también llamado Gran Canal de Desagüe) (**Figura 5.3**).

No fue sino hasta 1953, con la creación de la Comisión Hidrológica del Valle de México dependiente de la Secretaría de Recursos Hidráulicos en Coordinación con la Dirección General de Obras de la Ciudad de México, que se dio a conocer el proyecto del drenaje profundo. El proyecto comprendía la construcción de un emisor central y la de dos interceptores profundos, el central y el oriente. La profundidad de estos últimos permitiría el desagüe por gravedad a través de túneles, desde la ciudad hasta la

desembocadura del sistema en el río El Salto, cercano a la presa Requena, en Hidalgo. Así se podría mantener en servicio la red de alcantarillado y aprovechar las aguas residuales para riego y usos industriales en el estado de Hidalgo. Sin embargo, la obra del drenaje profundo no comenzó sino hasta 1967 (*México en el tiempo*, 1999).

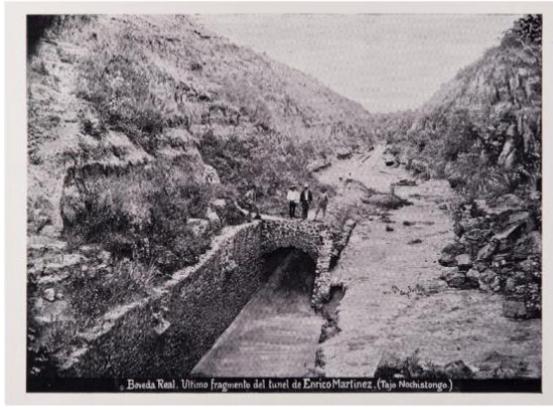


Figura 5.1 Vista del último tramo del Tajo de Nochistongo. Fuente: *El gran reto de la Ciudad de México* (2012)

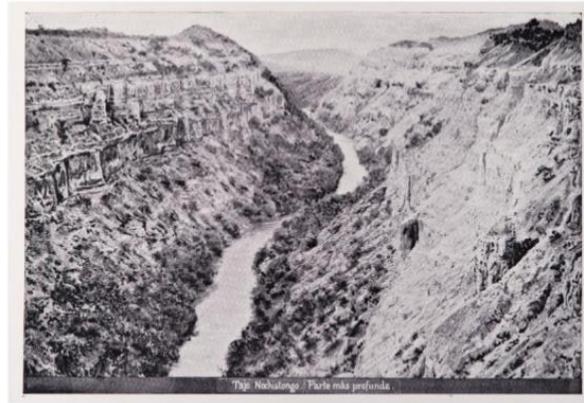


Figura 5.2 El Tajo de Nochistongo tuvo una longitud de 2 241 m. Fuente: *El gran reto de la Ciudad de México* (2012)



Figura 5.3 Ubicación del Tajo de Nochistongo y del túnel de Tequixquiac

Todas estas obras juntaban las aguas pluviales y residuales de la Ciudad de México y las canalizaban por el emisor central (**Figura 5.4**), el cual descarga en el río El Salto, afluente del río Tula, continua hasta la presa Endhó y de ahí se distribuye por una red de canales abiertos (figuras **5.5** y **5.6**) hacia los terrenos agrícolas de los distritos de riego 003 Tula y 100 Alfajayucan en el estado de Hidalgo (**Figura 5.7**).



Figura 5.4 Aguas residuales provenientes de la Ciudad de México entrando por el emisor central hacia Hidalgo



Figura 5.5 Vista de un canal a cielo abierto con estructuras de control en el D.R. 003 Tula, Hidalgo

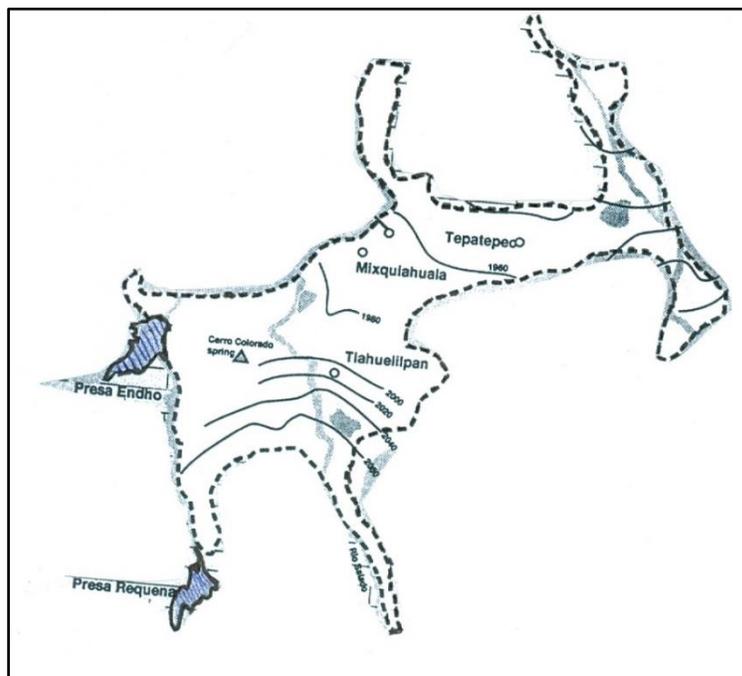


Figura 5.6 Croquis del D.R. 003 Tula, Hidalgo

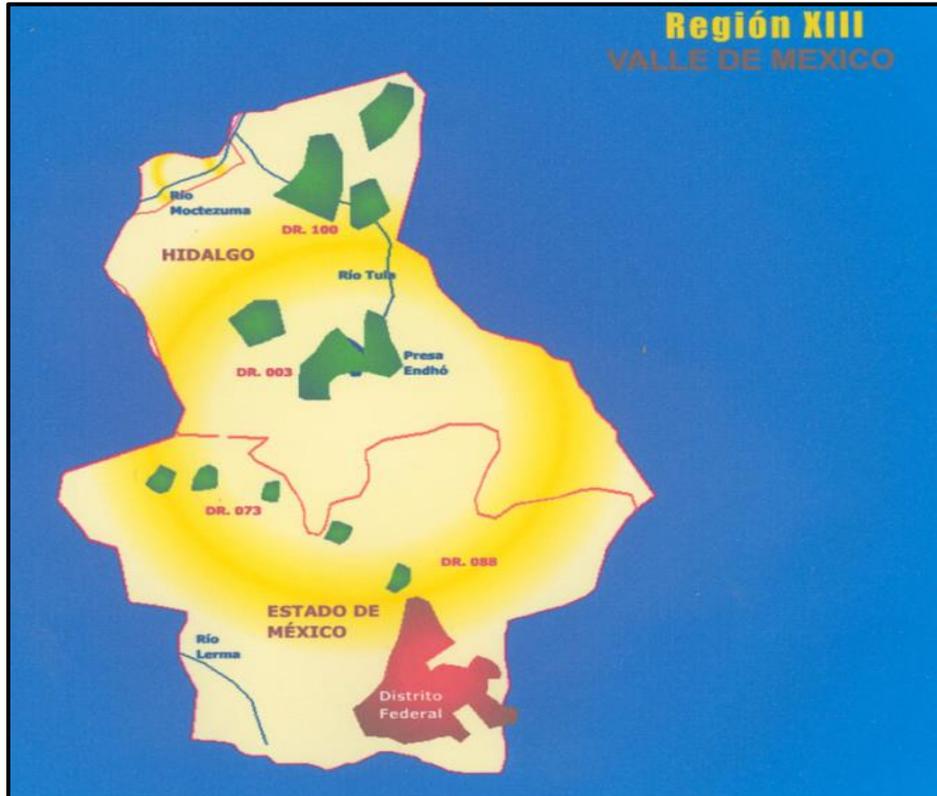


Figura 5.7 Ubicación de los Distritos de Riego 003 y 100 Alfajayucan en el estado de Hidalgo

5.2 Reúso de las aguas residuales en el Valle del Mezquital

5.2.1 Desarrollo histórico

El Valle del Mezquital en Hidalgo forma una llanura de aproximadamente 4 079 km² de terrenos erosionados, su clima es templado semidesértico con una temperatura media anual de 18.3 °C, presenta lluvias en verano, registra una precipitación media anual que oscila entre los 450 a 500 mm, y una evapotranspiración anual de 2 087 mm. En conjunto, estas condiciones limitan su desarrollo agrícola, por lo que el agua residual que llegó proveniente de la Ciudad de México fue vista como un recurso que posibilitaba el riego.

El agua que se comenzó a reusar en riego agrícola a partir de 1886 prácticamente no recibió ningún tratamiento previo. Sin embargo, su conducción y distribución a lo largo de aproximadamente 80 km, que es la distancia aproximada entre la Ciudad de México y la presa Endhó (que posee una capacidad de almacenamiento de alrededor de 202

Hm³), favorecía que se desarrollara un proceso de aireación y sedimentación, lo que puede equipararse con un tratamiento primario.

Las primeras zonas con aprovechamiento de las aguas residuales para riego en agricultura en el Valle se situaron en las áreas de Tlaxcoapan y Tlahuelilpan, pero no existen registros de la superficie en la cual se aplicaron. El registro más antiguo de la superficie con reúso en el Valle del Mezquital data de 1920, y se trata de 10 000 hectáreas situadas en la parte central del mismo. Los primeros cultivos regados con estas aguas fueron maíz forrajero y maíz para grano, así como alfalfa, cebada y avena (**Figura 5.8**). El registro oficial más reciente de la superficie regada con aguas residuales en este valle es del 2012 y es de 90 211 hectáreas (**Tabla 5.1**).



Figura 5.8 Cultivo de maíz forrajero regado con aguas residuales

Tabla 5.1 Desarrollo histórico de las superficies con aprovechamiento de aguas residuales en el Valle del Mezquital

Año	Superficie regada (ha)
1886	S/R
1920	10 000
1926	14 000
1950	28 000
1960	38 500
1970	39 500
1975	66 400
1979	68 900
1985	74 200

Año	Superficie regada (ha)
2000	99 400
2008	146 125
2012	90 211

Fuente: Elaboración propia con datos de documentos internos de las jefaturas del D.R. 003, 100 y 112. Comisión Nacional del Agua

El crecimiento en la superficie regada con aguas residuales fue vertiginoso, debido a que los productores de la zona comenzaron a ver que utilizar las aguas residuales en los cultivos permitía alcanzar mejores rendimientos respecto a las zonas agrícolas vecinas donde no se usaban este tipo de aguas. Sin embargo, no se consideraron los riesgos sanitarios que también implicaría su aprovechamiento en la zona. Actualmente el Valle del Mezquital ocupa el segundo sitio por superficie regada con aguas residuales para agricultura a nivel mundial. En 2010 el volumen de aguas residuales que salían de la Ciudad de México hacia el Valle del Mezquital era de 52m³/s.

5.2.2 Perspectiva futura

En noviembre de 2007 se anunció en México el inicio del Programa de Sustentabilidad Hídrica de la Cuenca del Valle de México, cuyo objetivo principal era el tratamiento del 100 % de las aguas residuales del Valle de México, mediante la construcción de 6 plantas de tratamiento, entre las cuales destaca la Planta de Tratamiento de Atotonilco, proyectada con una capacidad nominal de 23.0 m³/s, así como una capacidad adicional de 12 m³/s de aguas pluviales.

Esta planta se asentará en una superficie de 158 hectáreas de terreno pertenecientes al ejido Conejos del municipio de Atotonilco de Tula en el estado de Hidalgo, y formará parte de las 10 plantas de tratamiento de aguas residuales más grandes del mundo. Funcionará mediante trenes de tratamiento biológico y fisicoquímico para remover contaminantes y patógenos, de tal forma que el agua del efluente cumplirá con los límites que establece la NOM-001-SEMARNAT-1996. En 2009 se inició el proceso de licitación para la planta de Atotonilco y en 2015 el avance en su construcción era del 80 % (**Figura 5.9**).



Figura 5.9 Avances en la construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Atotonilco



Figura 5.10 Trabajadores en labores agrícolas

Con la construcción y puesta en marcha de la Planta de tratamiento de Atotonilco, la perspectiva futura para el Valle del Mezquital es bastante buena, pues se mejorará sustancialmente la calidad del agua de riego, que por más de 100 años se reusó prácticamente sin ningún tratamiento. La mejora en la calidad del agua de riego que llegue al Valle permitirá a los productores del Mezquital diversificar el patrón tradicional de cultivos por otros de mejor precio en el mercado, así como reducir además los riesgos sanitarios entre los trabajadores agrícolas y los consumidores (**Figura 5.10**).

5.3 Principales distritos de riego que usan las aguas residuales en el Valle del Mezquital

5.3.1 Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo

Este distrito se ubica al sur oriente del estado de Hidalgo. Sus coordenadas geográficas son 19° 40' y 20° 29' latitud norte y 99° 27' y 99° 57' longitud oeste; su altitud media es de 1 985 m.s.n.m. Limita al norte con el valle de Ixmiquilpan y con la localidad del mismo nombre y los cerros de San Miguel, Teptha y Gaxido. Al este limita con la sierra de Actopan, al sur con los cerros El Gorrión y Mexe y con las localidades de Atotonilco de Tula y Ajacuba; al oeste limita con la sierra Xinthe.

El D.R. 003 (**Figura 5.11**) fue creado por decreto presidencial el 20 de enero de 1955 (López, 2004), su superficie es de 52 270 ha de las cuales 45 215 son regables y de estas, 43 564 ha son regadas con aguas residuales mezcladas provenientes de las presas Endhó, Taxhimay y Requena (Cisneros *et al.*, 2008). El padrón de usuarios de riego está integrado por 30 948 productores con predominio de la tenencia ejidal. El distrito tiene una concesión de riego autorizada por la CONAGUA de 950 Hm³ (millones de metros cúbicos por año para riego agrícola), y la demanda de agua anual para riego está calculada en 890.60 Hm³.

Según datos de la Estadística agrícola 2013-2014, la superficie sembrada con riego en el ciclo otoño-invierno fue de 5 812 ha, mientras que en el ciclo primavera-verano fue de 18 834 ha. La superficie de cultivos perennes fue de 25 415 ha y de segundos cultivos fue de 5 196 ha por lo que la superficie total sembrada bajo riego en el D.R. 003 fue de 54 691 ha. El desglose por tipo de cultivo, superficie sembrada, rendimiento medio y producción se puede observar en las **tablas 5.2 a 5.5**.

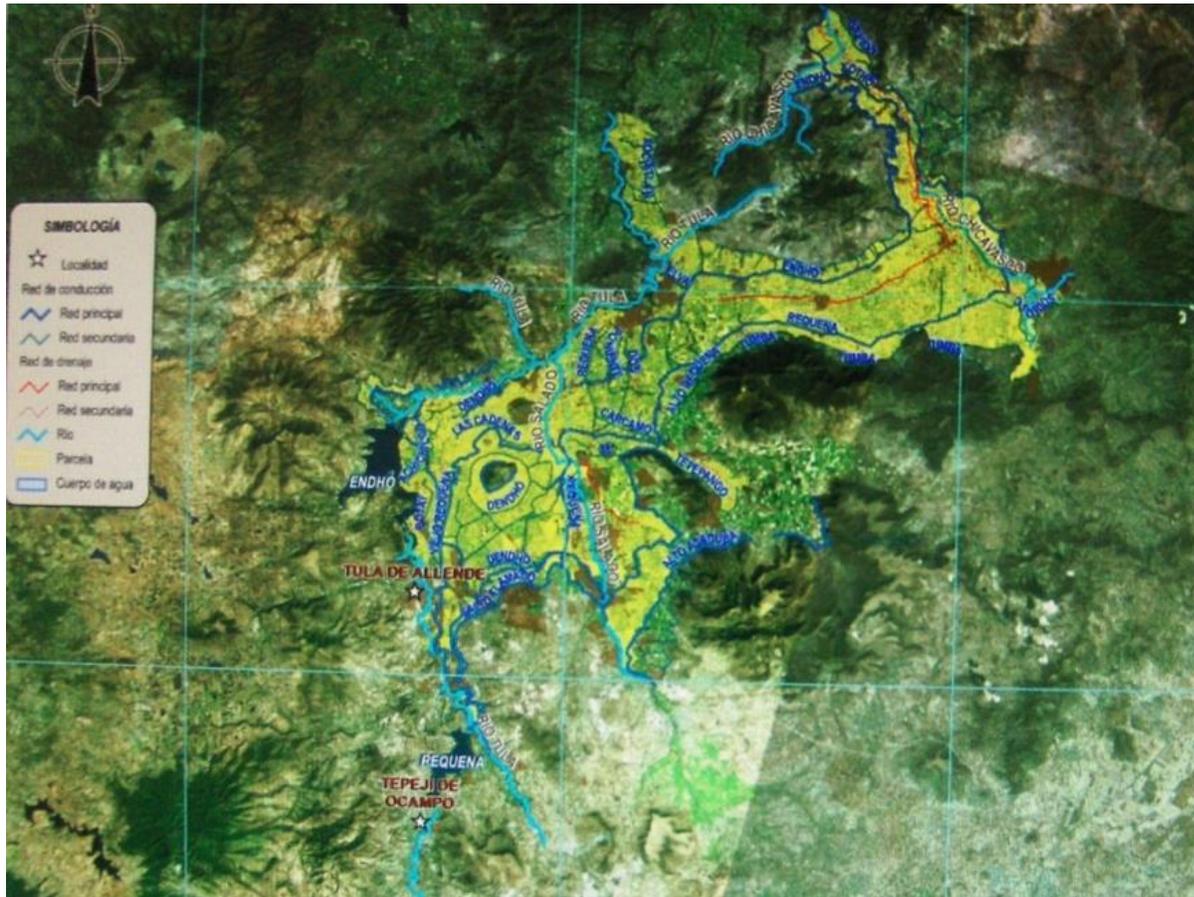


Figura 5.11 D.R. 003 Tula, Hidalgo

Tabla 5.2 Estadística agrícola del ciclo otoño-invierno 2012-2013 del D.R. 003 Tula, Hidalgo

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Avena forrajera verde	2 634	2 634	24.96	65 755	320	21 041.60
Cebada forrajera verde	1 186	1 186	19.91	23 616	310	7 320.96
Coliflor	196	196	25.00	4 900	4 950	24 255.00
Nabo	400	400	10.00	4 000	3 200	12 800.00
Otros cultivos	553	553	10.10	5 588	3 500	19 558.00
Trigo grano	568	568	3.97	2 256	4 500	10 152.00
Total	5 537	5 537	19.16	106 115	896	95 127.56

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

Tabla 5.3 Estadística agrícola del ciclo primavera-verano 2012-2013 del D.R. 003 Tula, Hidalgo

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Calabacita	660	660	9.94	6 558	3 800	24 920.40
Chile verde	321	321	7.99	2 564	8 000	20 512.00
Coliflor	219	219	25.00	5 475	4 950	27 101.25
Frijol (alubia)	1 116	1 116	2.00	2 232	14 000	31 284.00
Maíz grano	15 838	15 838	10.89	172 429	3 500	603 501.50
Nabo	182	182	9.82	1 788	3 200	5 721.60
Otros cultivos	99	99	11.82	1 170	3 500	4 095.00
Tomate de cáscara	58	58	8.00	464	7 800	3 619.20
Total	18 493	18 493	10.42	192 680	3 740	720 718.95

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

Tabla 5.4 Estadística agrícola de perennes 2012-2013 del D.R. 003 Tula, Hidalgo

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Alfalfa	24 100	24 100	99.70	2 402 790	340	816 948.60
Otros forrajes	594	594	90.00	53 460	180	9 622.80
Total	24 694	24 694	99.47	2 456 250	337	826 571.40

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

Tabla 5.5 Estadística agrícola de segundos cultivos 2012-2013 del D.R. 003 Tula, Hidalgo

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Calabacita	178	178	10.00	1 780	3 800	6 764.00
Chile verde	24	24	8.00	192	8 000	1 536.00
Coliflor	235	235	25.00	5 875	4 950	29 081.25
Frijol (alubia)	424	424	2.00	848	14 000	11 872.00
Maíz grano	4 821	4 821	11.00	53 031	3 500	185 608.50
Nabo	125	125	10.00	1 250	3 200	4 000.00
Otros cultivos	115	115	10.00	1 150	3 500	4 025.00
Tomate de cáscara	45	45	8.00	360	7 800	2 808.00
Total	5 967	5 967	10.81	64 486	3 810	245 694.75

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

5.3.2 Distrito de Riego 100 Alfajayucan, Hidalgo

El D.R. 100 (**Figura 5.12**) se ubica en el Alto Valle del Mezquital en el estado de Hidalgo. Fue creado por decreto presidencial el 17 de enero de 1976 (D.O.F., 13 de febrero de 1976), y su superficie es de 32 118 ha, de las cuales 22 380 son regables, y de estas 21 103 ha son regadas con aguas residuales mezcladas provenientes de las presas Endhó, Rojo Gómez y Vicente Aguirre (Cisneros *et al.*, 2008). El padrón de usuarios de riego está integrado por 25 667 productores, con predominio del régimen

de tenencia de la pequeña propiedad. La demanda de agua anual para riego está calculada en 447 686 Hm³.

Según datos de la Estadística agrícola 2013-2014, la superficie sembrada con riego en el ciclo otoño-invierno fue de 2 632 ha y en el ciclo primavera-verano fue de 13 917 ha. La superficie de cultivos perennes fue de 12 391 ha, por lo que la superficie total sembrada bajo riego en el D.R. 100 fue de 28 940 ha. El desglose por tipo de cultivo, superficie sembrada, rendimiento medio y producción se puede observar en las tablas 5.6 a 5.8.

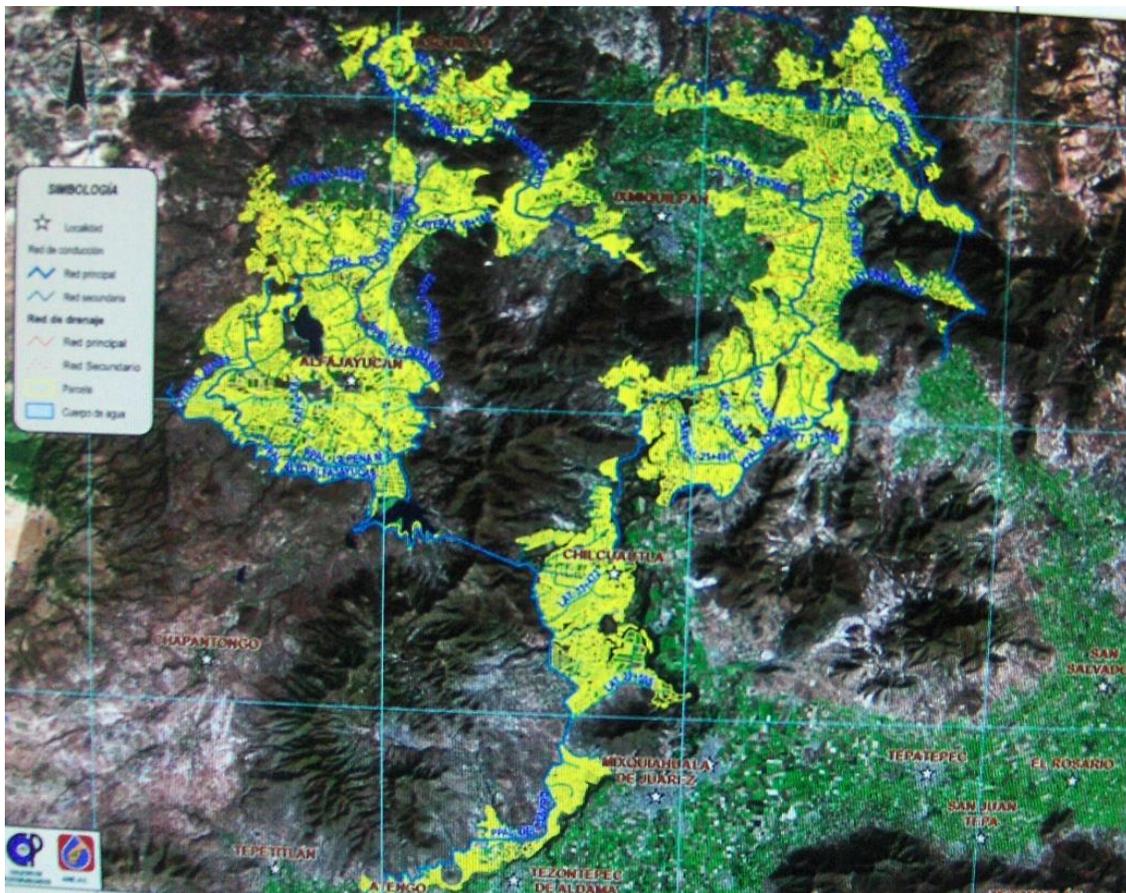


Figura 5.12 D.R. 100 Alfajayucan, Hidalgo

Tabla 5.6 Estadística agrícola del ciclo otoño-invierno 2012-2013 del D.R. 100 Alfajayucan, Hidalgo

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Avena forrajera verde	1 968	1 968	18.50	36 416	449	16 365.30
Cebada forrajera verde	76	76	18.05	1 372	416	571.10
Cilantro	11	11	1.50	17	10 000	165.00
Coliflor	212	212	19.00	4 028	7 250	29 203.00
Nabo	208	208	16.95	3 526	1 897	6 687.20
Trigo grano	157	157	4.00	628	3 397	2 133.60
Total	2 632	2 632	17.47	45 987	1 199	55 125.20

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

Tabla 5.7 Estadística agrícola del ciclo primavera-verano 2012-2013 del D.R. 100 Alfajayucan, Hidalgo

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Calabacita	1 159	1 159	12.36	14 320	4 396	62 946.60
Chile verde	989	989	6.46	6 389	7 582	48 442.60
Coliflor	249	249	15.00	3 735	7 250	27 078.75
Frijol (alubia)	351	351	1.55	545	14 242	77 62.00
Jitomate (tomate rojo)	42	42	9.14	384	6 672	2 562.00
Maíz grano	10 172	10 172	6.16	62 685	3 500	21 9397.50
Nabo	194	194	19.47	3 778	750	2 832.60
Otros cultivos	12	12	3.50	42	3 500	147.00
Tomate de cáscara	749	749	6.58	4 926	3 417	16 834.48
Total	13 917	13 917	6.96	96 804	4 008	388 003.54

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

Tabla 5.8 Estadística agrícola de perennes 2012-2013 del D.R. 100 Alfajayucan, Hidalgo

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Alfalfa	12 049	12 049	79.86	962 244	619	595 566.02
Frutales asociados	207	207	4.08	844	19 052	16 080.00
Otros forrajes	135	135	90.59	12 230	314	3 837.00
Total	12 391	12 391	78.71	97 5318	631	615 483.02

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

5.4 Otros distritos de riego con reúso de aguas residuales en México

Según los datos actuales, en 14 de los 86 distritos de riego existentes en México se utilizan aguas residuales para riego agrícola (tratadas o mezcladas), en una superficie estimada de 178 952 ha (**Tabla 5.9**). En muchas unidades de riego se aprovechan las aguas residuales mezcladas con agua de pozos, y se estima que la superficie regada en ellas asciende a 166 131.2 ha, por lo que se estima que en 2016 la superficie total

de riego con reúso de aguas residuales con fines agrícolas en México es de alrededor de 345 083 ha. En los apartados siguientes se describirán con mayor detalle los distritos de riego más representativos en los que se reúsan las aguas residuales para agricultura, aparte de los ya mencionados correspondientes al Valle del Mezquital.

Tabla 5.9 Aprovechamiento de agua residual para riego agrícola en distritos de riego de México

Distrito de Riego	Superficie dominada (ha)	Superficie regada con aguas residuales (ha)	Principales cultivos
D.R.003 Tula, Hgo.	52 270	43 564	De O-I: avena y cebada forrajera y trigo grano; de P-V: maíz grano y frijol, y de perennes: alfalfa y pastos
D.R. 100 Alfajayucan, Hgo.	32 118	21 103	De O-I: avena forrajera; de P-V: maíz grano, calabacita y chile, y de perennes: alfalfa
D.R. 030 Valsequillo, Pue.	33 206	21 000	P-V: maíz y sorgo grano y de perennes: alfalfa
D.R. 009 Valle de Juárez, Chih.	24 492	11 500	De O-I: trigo grano, de P-V: algodón, de perennes: alfalfa, y de segundos cultivos: sorgo forrajero
D.R. 088 Chiconautla, Edo, de Méx.	4 490	1 200	De O-I: avena forrajera; de P-V: maíz grano, y de perennes: alfalfa
D.R. 016 Morelos	33 768	15 000	De O-I: maíz grano, cebolla y calabacita; de P-V: maíz grano, arroz y ejote; de perennes: caña de azúcar y mango, y de segundos cultivos: maíz grano, jícama y arroz
D.R. 020 Morelia-Queréndaro, Mich.	20 665	16 702	De O-I: trigo y avena forrajera; de P-V: maíz y sorgo grano, y de perennes: alfalfa
D.R. 025 Bajo Río Bravo, Tamp.	248 391.48	27 000	De O-I: maíz, de P-V: sorgo grano, y de perennes: zacate buffel
D.R. 001 Pabellón, Ags.	11 800	5 825	De O-I: avena forrajera y pastos; de P-V: maíz grano y hortalizas; de perennes: alfalfa, y de segundos cultivos: maíz grano
D.R. 052 Durango	22 922.6	2 700	De O-I: avena y trigo grano; de P-V: maíz grano y maíz forrajero y de perennes: nogal y alfalfa
D.R. 031 Las Lajas, N.L.	3 693	1 918	De P-V: sorgo grano y de perennes: zacate buffel
D.R. 066 Santo Domingo, BCS	38 101	4 734	De O-I: garbanzo y trigo grano; de P-V: maíz grano y frijol alubia; de perennes: alfalfa, naranja y espárrago
D.R. 085 La Begoña, Gto.	10 823.0	3 874.0	De O-I: zanahoria, cebada y trigo grano; de P-V: sorgo y maíz grano y frijol; de perennes: alfalfa, y de segundos cultivos: sorgo grano
D.R. 112 Ajacuba, Hgo.	4 855.0	2 832.0	De O-I: avena y cebada forrajera; de P-V: maíz grano y de perennes: alfalfa
Total	530 772.08	178 952.00	

Fuente: Elaboración propia con datos de campo, documentos internos de las jefaturas de distritos de riego y complementado con datos de la Estadística agrícola 2013-2014 (CONAGUA (2015))

5.4.1 Distrito de Riego 009 Valle de Juárez, Chihuahua

El Valle de Juárez está conformado por una franja fronteriza alargada que sigue la margen derecha del río Bravo, localizado en la zona centro-norte del estado de Chihuahua. Su longitud es de 135 km por 3 km de ancho en promedio, y se sitúa entre los 1 131 msnm (elevación en la compuerta de la presa derivadora, llamada presa Internacional en Ciudad Juárez) y los 1 060 msnm (elevación del vado Cedillos). La precipitación pluvial es de 228 mm/año. Su clima es de tipo desértico y su temperatura promedio anual es de 16.7 °C, con una mínima de 8.6 °C y una máxima de 24.8 °C. La zona agrícola del Valle de Juárez está ubicada en la cuenca hidrológica del Bolsón del Huevo y en la región fisiográfica de la meseta del norte en el estado de Chihuahua, delimitado al norte y al noreste por el río Bravo y al sur por el municipio de Villa Ahumada.

El D.R. 009 se ubica entre las coordenadas 30° 50' y 30° 45' latitud norte y 105° 30' y 106° 30' longitud oeste, a una altitud media de 1 084 msnm. Su superficie abarca 24 492 ha, de las cuales 11 500 ha se riegan con aguas residuales mezcladas (aguas superficiales provenientes del río Bravo (74 Hm³/año), aguas subterráneas provenientes de los pozos (16.872 Hm³/año) y aguas residuales tratadas de las plantas norte y sur (125.078 Hm³/año) (**Figura 5.13**). El número de usuarios beneficiados en este distrito es de 2 305, de los cuales 87 % son ejidatarios y 13 % pequeños propietarios. La tenencia de la tierra es 72 % ejidal y 28 % pequeña propiedad.

La apertura al riego agrícola en el Valle de Juárez se inició con la concesión de 74 Hm³, realizada en 1906 y ratificada en 1907. Sin embargo, no fue sino hasta 1932 que se inicia la operación del D.R. 009 Valle de Juárez, Chihuahua, que por acuerdo presidencial se establece y es delimitado dos años más tarde, en 1934. Con el reglamento sobre el aprovechamiento de las aguas del Valle de Juárez de 1939 se ratifican los volúmenes y fuentes de abastecimiento que se utilizarían en las unidades de riego (**Figura 5.14**).

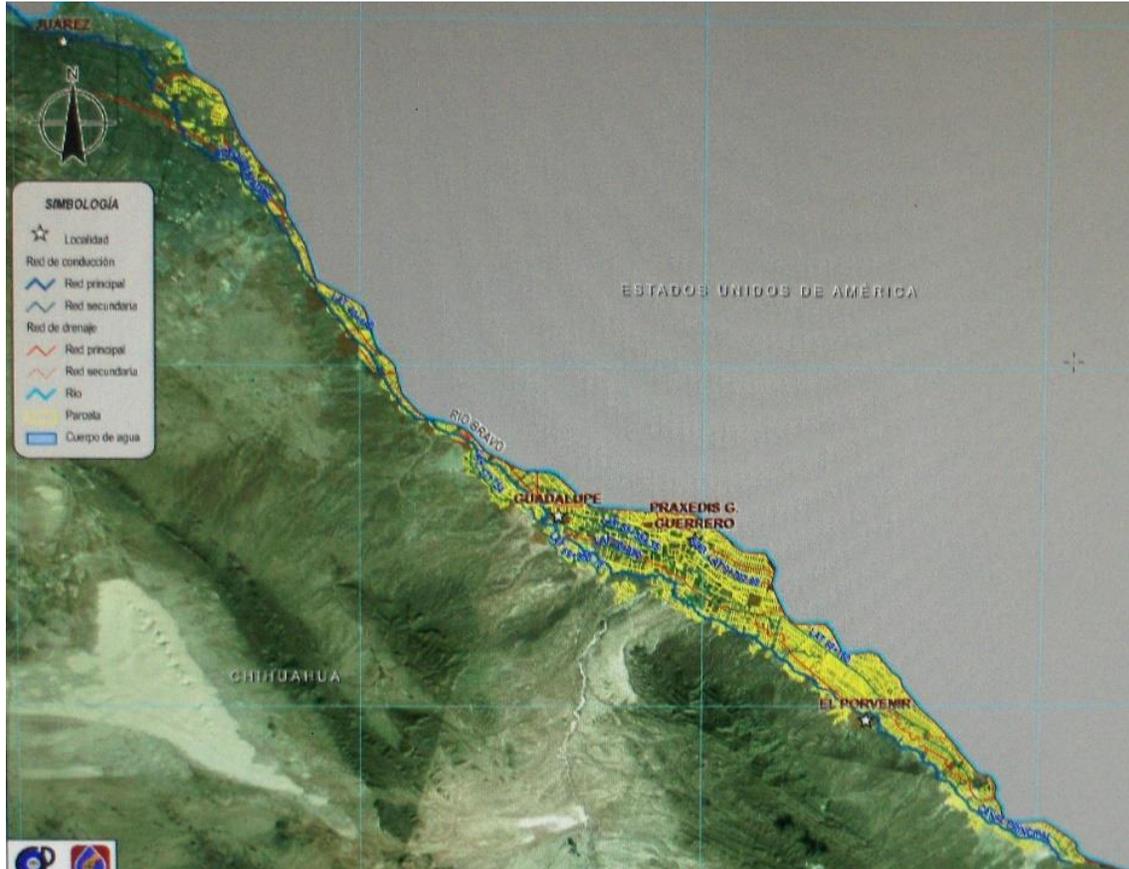


Figura 5.13 D.R. 009 Valle de Juárez, Chihuahua

El crecimiento urbano, los problemas de inseguridad y una sociedad rural que buscó emigrar a la ciudad e incluso cruzar la frontera en busca de nuevas y mejores oportunidades de vida, han influido en la disminución de la superficie sembrada. Para la década de los 90 la superficie regable era de solo 3 900 ha, en las que se utilizaban ya 48 Hm³ de aguas residuales provenientes de Ciudad Juárez, Chihuahua. El fomento a la producción agrícola en México y los apoyos a través de programas federalizados para modernizar la infraestructura de distribución del agua de riego y el riego parcelario, que aparecieron desde mediados de 1990, han sido un factor muy importante para que la superficie sembrada comenzara a incrementarse. En 2012 la superficie de riego llegó a 11 500 ha, en donde se utilizaron 76 Hm³ de aguas residuales tratadas para el riego (**Figura 5.15**).

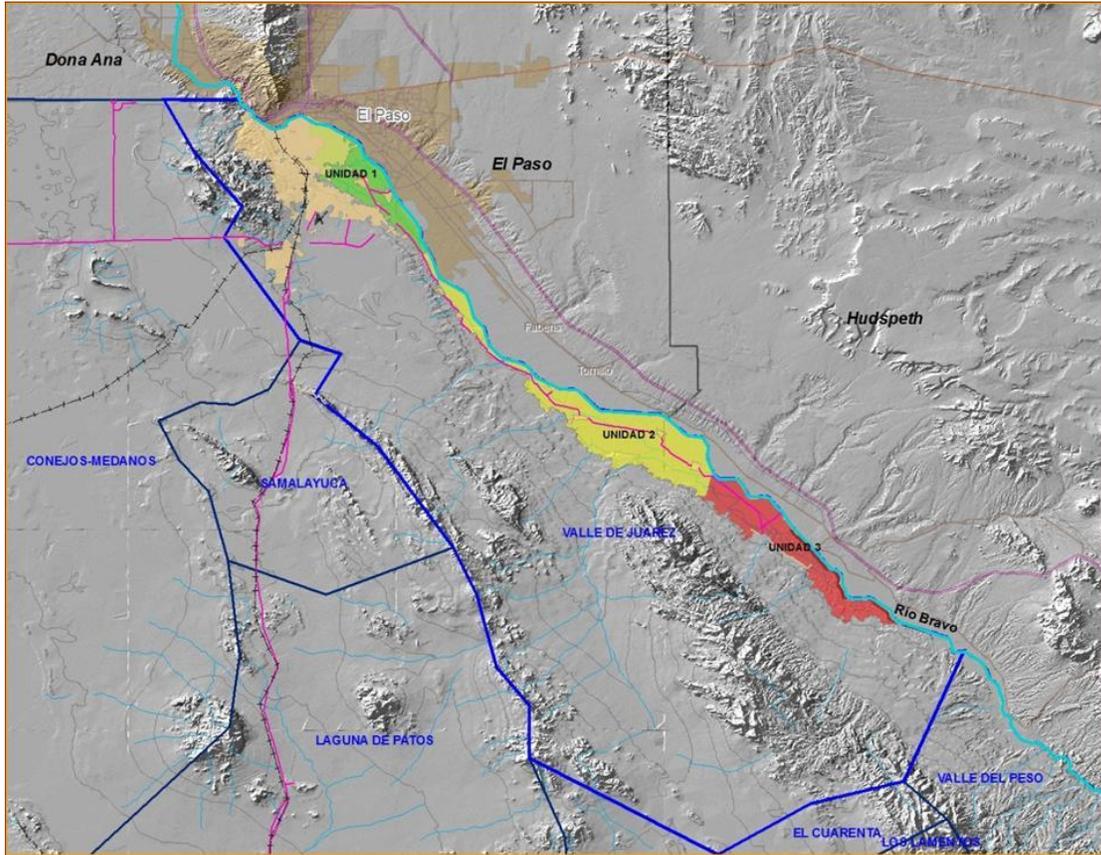


Figura 5.14 Unidades de riego que conforman el D.R. 009



Figura 5.15 Sorgo forrajero regado con aguas residuales en el D.R. 009

La calidad del agua disponible en el D.R. 009 varía de acuerdo a la fuente de abastecimiento. El agua del río Bravo contiene sales disueltas que van de los 650 a los 1 000 ppm (1.01 y 1.13 dS/m⁻¹), por lo que se considera como apta para uso agrícola. El agua residual tratada de las plantas norte y sur reporta una concentración de sales promedio de 1 300 ppm (2.03 dS/m⁻¹) y el agua de los pozos es muy variable, 19 % del agua extraída tiene concentraciones de sales disueltas menores a 1 500 ppm, (2.34 dS/m⁻¹), un 51 % contiene entre 1 500 y 3 000 ppm (2.34 y 4.68 dS/m⁻¹) y el 30 % restante excede los 3 000 ppm (4.68 dS/m⁻¹) de sales totales disueltas (COCEF.Org., 2005). Según datos de la Estadística agrícola 2013-2014, la superficie sembrada con riego en el ciclo otoño-invierno fue de 1 856 ha, y de 4 734 ha en primavera-verano. La superficie de perennes fue de 2 328 ha y la de segundos cultivos, 1 452 ha, lo que hace un total de 10 170 ha (tablas 5.10 a 5.13) regadas con una mezcla de aguas residuales provenientes de las plantas de tratamiento norte y sur, y aguas superficiales provenientes del río Bravo (figuras 5.16 a 5.18).

Tabla 5.10 Estadística agrícola de otoño-invierno 2012-2013 del D.R. 009

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Avena forrajera	270	270	25.00	6 750	550	3 712.50
Trigo grano	1 586	1 586	5.00	7 930	3 800	30 134.00
Total	1 856	1 856	7.91	14 680	2 306	33 846.50

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

Tabla 5.11 Estadística agrícola de primavera-verano 2012-2013 del D.R. 009

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Algodón	4 565	4 565	2.50	11 413	10 500	119 831.25
Sorgo forraj. (verde)	135	135	34.00	4 590	550	2 524.50
Zacate Sudán (verde)	34	34	30.00	1 020	480	489.60
Total	4 734	4 734	3.60	17 023	7 217	122 845.35

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA (2015)

Tabla 5.12 Estadística agrícola de perennes 2012-2013 del D.R. 009

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Alfalfa	1 843	1 843	68.00	125 324	420	52 636.08
Nogal (nuez)	232	232	1.50	348	60 000	20 880.00
Rye Grass (verde)	253	253	32.00	8 096	480	3 886.08
Total	2 328	2 328	57.46	133 768	579	77 402.16

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

Tabla 5.13. Estadística agrícola de segundos cultivos 2012-2013 del D.R. 009

Cultivo con riego	Sup. sembr. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R. (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Sorgo forraj. (verde)	1 291	1 291	30.00	38 730	550	21 301.50
Zacate Sudan (verde)	161	161	27.00	4 347	480	2 086.56
Total	1 452	1452	29.67	43 077	543	23 388.06

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)



Figura 5.16 Vista de la entrada a la Planta de Tratamiento Norte de Ciudad Juárez, Chihuahua



Figura 5.17 Agua residual tratada para riego agrícola en el Valle de Juárez, Chihuahua



Figura 5.18 Nogales regados con aguas residuales tratadas en el D.R. 009

5.4.2 Distrito de Riego 088 Chiconautla

Este distrito se ubica en el Estado de México, en las coordenadas 19° 39' de latitud norte, 99° 01' de longitud oeste y a una altitud de 2 250 msnm. Colinda al norte con la base aérea Santa Lucía y el ejido Jaltocan, al sur con la carretera libre Ecatepec- Texcoco, al este con el ejido Ozumbilla, los poblados de San Francisco Cuatitlquixca, Ozumbilla y Santa María Chiconautla y con la carretera libre México-Pachuca, y al oeste con el Gran Canal de Desagüe de la Ciudad de México, que es su fuente de abastecimiento de agua de riego (**Figura 5.19**).



Figura 5.19 D.R. 088 Chiconautla

El distrito posee una superficie de 4 490 ha, de las cuales 1 200 son regables; se estima que el 100 % de estas son regadas con aguas residuales provenientes del Gran Canal. Tiene una concesión de riego autorizada por la CONAGUA de 5 864 Hm³ anuales. Los cultivos principales de este distrito son los forrajeros para alimentación animal y el cultivo de granos como el maíz para industria de la tortilla. El clima dominante en el área de influencia del D.R. 088 es templado moderadamente lluvioso, con lluvias en verano, la temperatura media del mes más cálido es de 17.0 °C y se presenta en mayo, y la temperatura mínima es de 10.6 °C en enero; la temperatura media anual es de 14.3 °C. La precipitación anual promedio es de 625.88 mm. La

textura del suelo es predominantemente arcillosa, con valores de capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente altos, lo que dificulta el manejo del suelo.

La mala calidad del agua de riego, que llega prácticamente sin ningún tratamiento y que es alta en sales, con valores de CE de 2.10 dS/m y concentración de sodio de 13.21 meq/L (Pérez-Nieto *et al.*, 2001), las condiciones de clima y el tipo de suelo son los factores que más han limitado el desarrollo de la producción agrícola en este distrito. Según datos de la Estadística agrícola 2013-2014, la superficie sembrada con riego en el ciclo otoño-invierno fue de solo 309 ha, en primavera-verano fue de 1 169 ha, y de perennes 215, para un total de 1 693 ha (**tablas 5.14-5.16**).

Tabla 5.14 Estadística agrícola de otoño-invierno 2012-2013 del D.R. 088 Chiconautla, Edo. de México

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Avena forrajera (verde)	272	272	30.00	8 150	680	5 541.86
Otros: forrajera (verde)	37	37	12.50	466	3 500	1 629.25
Total	309	309	27.89	8 615	832	7 171.11

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

Tabla 5.15 Estadística agrícola de primavera-verano 2012-2013 del D.R. 088 Chiconautla, Edo. de México

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Avena forraj. (verde)	68	68	30.00	2 028	680	1 379.24
Maíz forraj. (verde)	7	7	80.00	534	380	203.07
Maíz grano	1 028	1 028	4.00	4 112	4 800	19 737.79
Otros forraj. (verde)	67	67	12.50	835	3 500	2 923.38
Total	1 169	1 169	6.42	7 510	3 228	24 243.48

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

Tabla 5.16 Estadística agrícola de perennes 2012-2013 del D.R. 088 Chiconautla, Edo. de México

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Alfalfa	215	215	90	19 354	420	8 128.51
Total	215	215	90	19 354	420	8 128.51

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

5.4.3 Distrito de Riego 030 Valsequillo, Puebla

El distrito se creó por acuerdo presidencial el 21 de febrero de 1939; sus límites se establecieron en 1944 e inició operaciones en 1946. Posee una superficie dominada de 33 206 ha (**Figura 5.20**) de las cuales 32 801 son regables (Conagua, 2014). Se estima que en este distrito se riegan con aguas residuales alrededor de 21 000 ha (Cisneros *et al.*, 2008). Los usuarios beneficiados en este distrito son 16 225; predomina la tenencia de la tierra de pequeña propiedad con el 59 % y el 41 % es ejidal.

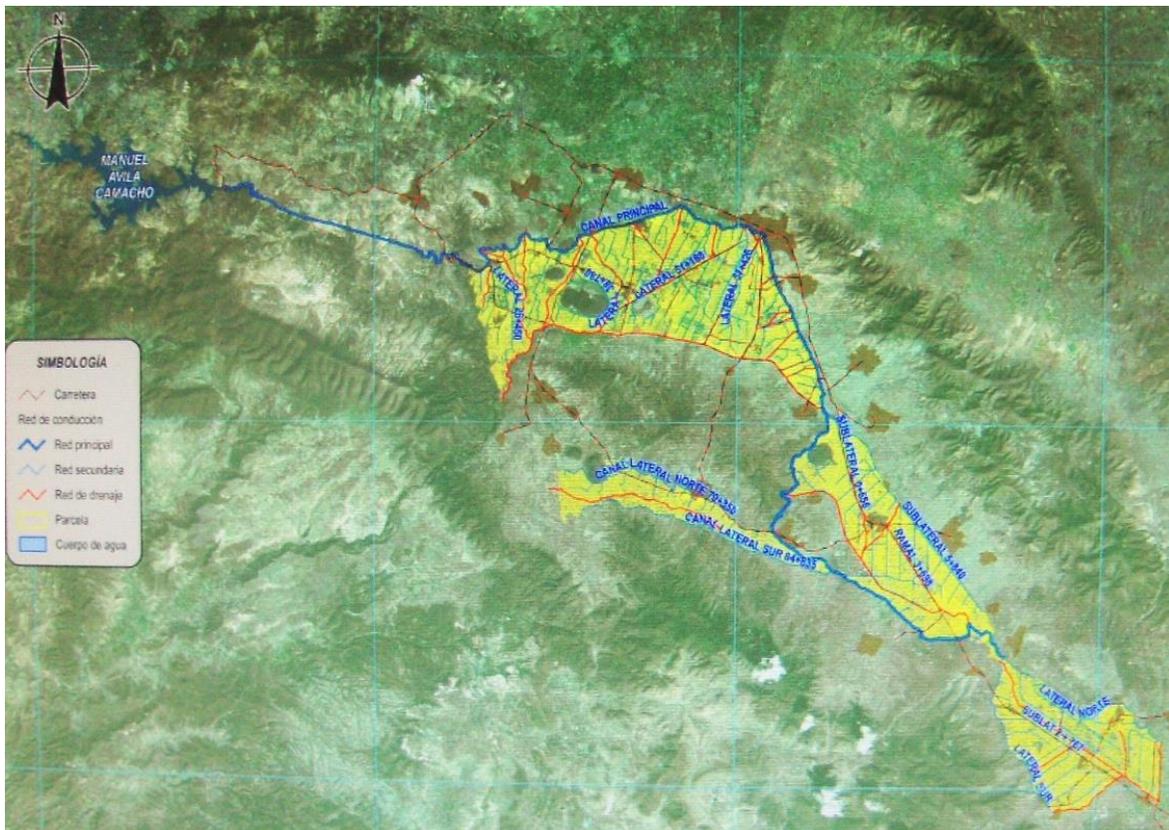


Figura 5.20 D.R. 030 Valsequillo, Puebla

Los cultivos principales son maíz, frijol, chile seco y alfalfa. El D.R. 030 se encuentra asentado en parte de los valles de Tecamachalco, Tlacotepec, Xochitlán y Tepanco, ubicados en la parte centro-oriental del estado de Puebla, caracterizados por presentar condiciones de aridez y semiaridez, con climas semiseco y seco, una precipitación media anual de 450 mm, y una evaporación media que va de los 2 000 a 2 500 mm. Operativamente el D.R. 030 se integra con seis módulos de riego (**Figura 5.21**):

- Módulo 1. Luciano M. Sánchez, A.C.
- Módulo 2. Lázaro Cárdenas, A.C.
- Módulo 3. Manuel Ávila Camacho, A. C.
- Módulo 4. Tlacotepec de Benito Juárez, A. C.
- Módulo 5. Gral. Emiliano Zapata, A.C.
- Módulo 6. Adolfo López Mateos, A.C.



Figura 5.21 Módulos que integran el D.R. 030 Valsequillo

La actividad agrícola que se desarrolla en estos módulos se beneficia de dos fuentes de abastecimiento de agua, los pozos de bombeo y la presa Manuel Ávila Camacho, alimentada por corrientes de los ríos Atoyac y Alseseca. El tratamiento insuficiente de las aguas residuales de la ciudad de Puebla y de la industria en la zona ha sido el factor principal para que las aguas del río Atoyac se encuentren contaminadas al llegar a la presa Ávila Camacho, de donde se distribuyen a través de la red de canales para el riego agrícola del D.R. 030. Según datos de Bonilla y Fernández *et al.* (2015), el agua de riego en la zona en general no es apta para la irrigación de cultivos sin previo tratamiento.

Según datos de la Estadística agrícola 2013-2014, la superficie sembrada con riego en el ciclo primavera-verano fue de 17 236 ha, y de perennes 4 615 ha, para un total de 21 859 ha (**tablas 5.17 y 5.18**).

Tabla 5.17 Estadística agrícola de primavera-verano 2012-2013 del D.R. 030 Valsequillo, Puebla

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Chile seco	157	157	0.50	79	13 6697	10 791.26
Frijol (alubia)	804	804	1.00	804	10 554	8 489.40
Maíz grano	14 778	14 778	7.11	105 035	3 685	387 094.72
Sorgo grano	1 497	1 497	6.84	10 234	3 113	31 858.08
Total	17 236	17 236	6.74	116 152	3 773	438 233.46

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

Tabla 5.18 Estadística agrícola de perennes 2012-2013 del D.R. 030 Valsequillo, Puebla

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Alfalfa en verde	4 615	4 615	73.46	339 012	365	123 781.89
Total	4 615	4 615	73.46	339 012	365	123 781.89

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

5.4.4 Distrito de Riego 016 Morelos

Se estableció por acuerdo presidencial el 30 de septiembre de 1953 e inició operaciones en 1956 (**Figura 5.22**). Cuenta con una superficie dominada de 33 768 hectáreas, de las que 28 657 son regables (Conagua, 2014), y de estas se estima que 15 000 ha son regadas con aguas residuales (Cisneros *et al.*, 2008). Este distrito beneficia a 15 391 usuarios; predomina el régimen de tenencia de la tierra ejidal en el 80 % de la superficie total y solo el 20 % corresponde a la pequeña propiedad.

Las fuentes principales de abastecimiento de agua de riego para agricultura están constituidas por las derivaciones de los ríos Chalma, Tetlama, Apatlaco, Yautepec, Dulce, Cuautla, Ayala y Amacuzac, así como las aguas del río Tembembe que se almacenan en la presa El Rodeo. Desafortunadamente la mayoría de estas corrientes se encuentran contaminadas, con un índice de calidad del agua (ICA) clasificado como contaminado con valores de entre 50 y 70 (**Figura 5.23**).

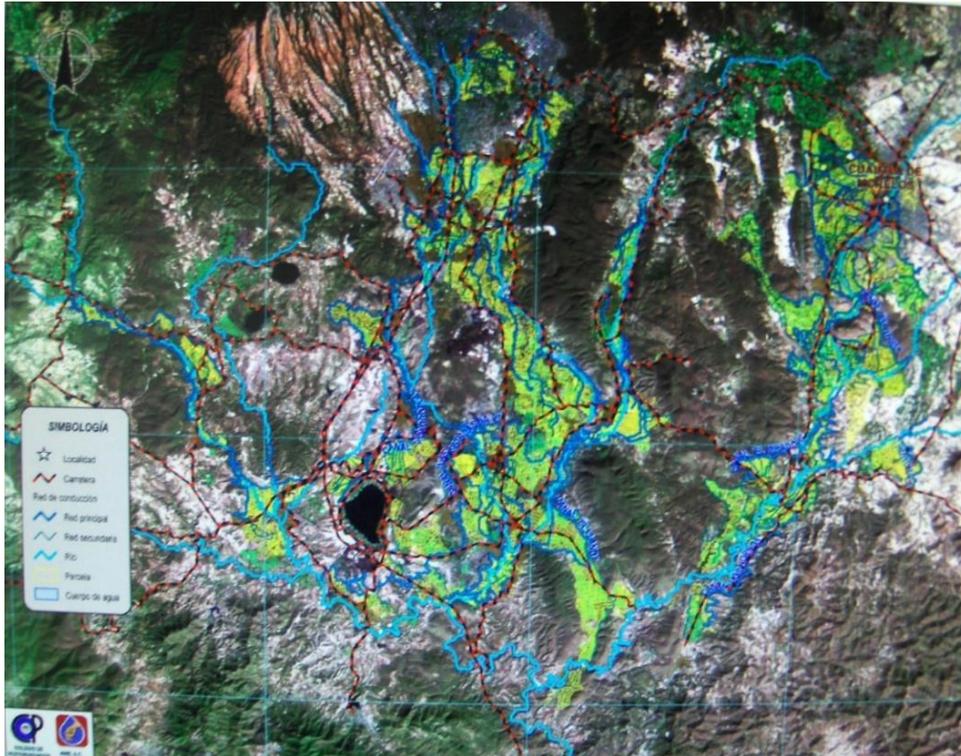


Figura 5.22 D.R. 016 Morelos

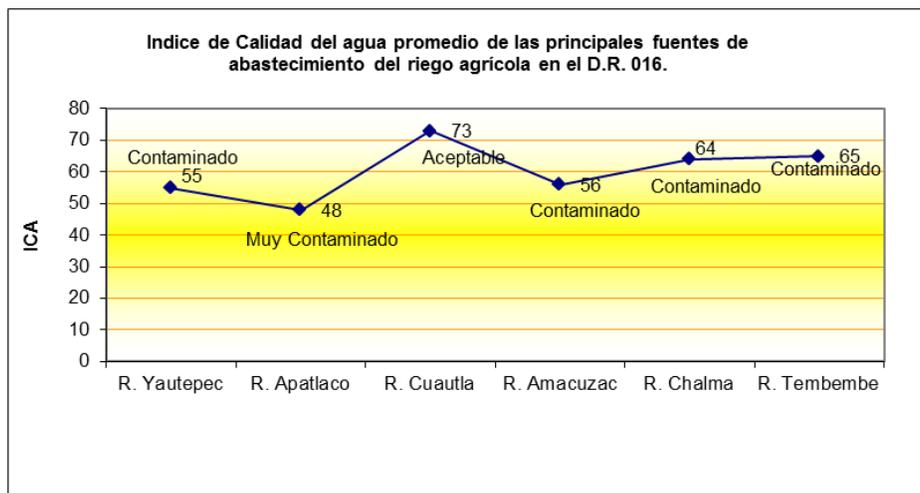


Figura 5.23 Calidad del agua de las principales fuentes de agua de riego del D.R. 016

En la zona de influencia del distrito predomina el clima cálido con una temperatura media anual de 22 a 24 °C. Las precipitaciones pluviales oscilan entre 800 a 1 500 mm anuales, con un promedio de 1 107 mm anuales. El D.R. 016 se encuentra dividido, básicamente, en función de su operación en 5 módulos de riego:

- Módulo 1. Usuarios de Riego del Río Chalma, Revolución del Sur, A.C.
- Módulo 2. Asociación de Usuarios del Alto Apatlaco, A.C.
- Módulo 3. Unión de Usuarios Cuenca de las Fuentes, A.C.
- Módulo 4. Organización de Usuarios Agrosiglo XXI, A.C.
- Módulo 5. Gral. Eufemio Zapata Salazar, A.C.

Los principales cultivos sembrados en estos módulos son caña de azúcar, maíz grano y elotero, arroz, ejote, cebolla y calabacita (**figuras 5.24 y 5.25**). Según datos de la Estadística agrícola 2013-2014, la superficie sembrada con riego en el ciclo otoño-invierno fue de 2 252 ha, en primavera-verano fue de 1 772 ha, y de perennes 14 776 ha, de segundos cultivos 1 057 ha, para un total de 19 847 ha (**tablas 5.19-5.22**).



Figura 5.24 Cultivo de caña de azúcar regada con aguas residuales en el D.R. 016



Figura 5.25 Cultivo de arroz regado con aguas residuales en el D.R. 016, Morelos

Tabla 5.19 Estadística agrícola de otoño-invierno 2012-2013 del D.R. 016, Morelos

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R. (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Calabacita	246	246	21.00	5 166	4 379	22 619.33
Cebolla	276	276	20.00	5 520	4 620	25 502.40
Ejote	363	363	10.00	3 630	5 430	19 710.90
Frijol (alubia)	32	32	1.70	54	30 665	1 668.18
Gladiola	180	180	15.50	2 790	2 628	7 331.00
Tomate rojo	21	21	26.00	546	8 927	4 873.87
Maíz grano	828	828	5.00	4 140	5 595	23 163.30

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Okra	45	45	11.00	495	6 095	3 017.02
Otras hortalizas	100	100	12.00	1 200	2 719	3 262.80
Otros cultivos	89	89	10.00	890	3 110	2 767.46
Pepino	17	17	18.00	306	4 810	1 471.86
Tomate de cáscara	55	55	8.50	468	7 649	3 575.67
Total	2 252	2 252	11.19	25 205	4 720	118 963.79

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

Tabla 5.20 Estadística agrícola de primavera-verano 2012-2013 del D.R. 016 Morelos

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Arroz	478	478	9.50	4 541	4 817	21 874.00
Cebolla	67	67	20.00	1 340	4 620	6 190.80
Ejote	137	137	10.00	1 370	5 430	7 439.10
Frijol (alubia)	29	29	1.70	49	30 665	1 511.78
Gladiola	49	49	15.50	760	2 628	1 995.66
Jícama	46	46	30.00	1 380	4 696	6 480.48
Tomate rojo	20	20	26.00	520	8 927	4 641.78
Maíz grano	707	707	5.00	3 535	5 595	19 778.32
Otras hortalizas	60	60	12.00	720	2 719	1 957.68
Otros cultivos	106	106	10.00	1 060	3 110	3 296.07
Pepino	18	18	18.00	324	4 810	1 558.44
Sorgo grano	40	40	7.00	280	2 871	803.88
Tomate de cáscara	15	15	8.50	128	7 649	975.18
Total	1 772	1 772	9.03	16 006	4 905	78 503.10

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

Tabla 5.21 Estadística agrícola de perennes 2012-2013 del D.R. 016 Morelos

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Aguacate	95	95	11.00	1 045	20 000	20 900.00
Alfalfa	58	58	70.00	4 060	1 000	4 060.00
Caña de azúcar	13 662	10 690	111.00	1 186 546	536	635 988.44
Guaje	66	66	4.00	264	1 500	396.00
Limón	70	70	8.00	560	5 000	2 800.00
Mango	151	151	16.00	2 416	8 000	19 328.00
Otros cultivos	395	395	10.00	3 950	3 150	12 442.50
Otros forraj. (verde)	55	55	25.00	1 375	2 100	2 887.50
Otros frutales	350	350	11.00	3 850	4 000	15 400.00
Papayo	12	12	20.00	240	10 000	2 400.00
Rosal	152	152	15	2 280	8 500	19 380.00
Total	14 766	12 094	99.77	1 206 586	610	735 982.44

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

Tabla 5.22 Estadística agrícola de segundos cultivos 2012-2013 del D.R. 016 Morelos

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Arroz	245	245	9.50	2 328	4 817	11 211.57
Cebolla	34	34	20.00	680	4 620	3 141.60
Ejote	19	19	10.00	190	5 430	1 031.70
Frijol (alubia)	11	11	1.70	19.00	30 665	573.44
Gladiola	2	2	15.50	31.00	2 628	81.46
Jícama	263	263	30.00	7 890	4 696	37 051.44
Tomate rojo	14	14	26.00	364	8 927	3 249.25
Maíz grano	354	354	5.00	1 770	5 595	9 903.15
Otras hortalizas	23	23	12.00	276	2 719	750.44
Otros cultivos	29	29	10.00	290	3 110	901.76
Pepino	13	13	18.00	234	4 810	1 125.54
Sorgo grano	34	34	7.00	238	2 871	683.30
Tomate de cáscara	16	16	8.50	136	7 649	1 040.20
Total	1 057	1 057	13.67	14 445	4 897	70 744.83

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

5.4.5 Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro, Michoacán

Este distrito se ubica en las coordenadas 19°53'42" de latitud norte, 19°29' 14" de latitud sur, 101°28'00" de longitud este y 100°38'46" de longitud oeste. Ocupa parte de los municipios de Álvaro Obregón, Charo, Indaparapeo, Morelia, Queréndaro, Tarímbaro y Zinapécuaro del estado de Michoacán. El distrito fue creado por acuerdo presidencial del 3 de mayo de 1938 y ampliado con los Valles de San Bartolo y Queréndaro mediante acuerdo presidencial del 1 de agosto de 1940. El distrito beneficia a 5 510 usuarios de riego y cuenta con una superficie dominada de 20 665 hectáreas, de las que 19 646 ha son regables (**Figura 5.26**); de estas, se estima que 16 702 ha son regadas con aguas residuales.

El clima predominante en el área de influencia del D.R. 020 es templado subhúmedo con lluvias en verano; la precipitación media anual es de 862.37 mm. La evaporación es de 1 707.60 mm. El tipo de suelo dominante en la zona corresponde a vertisol pélico. Para su operación este distrito se encuentra dividido en seis módulos de riego. Las principales fuentes de abastecimiento del agua de riego son las aguas superficiales provenientes de las presas Malpaís y Cointzio. Esta última almacena aguas superficiales de lluvia y aguas residuales tratadas y crudas de la ciudad de Morelia que llegan a través del Río Grande de Morelia. Estas aguas se distribuyen por los canales de riego a los terrenos agrícolas de la zona que abarca los módulos de riego I, II, III y IV; estos dos últimos módulos también se abastecen con agua de algunos pozos. La presa Malpaís y otros tantos pozos abastecen a los módulos V y VI.

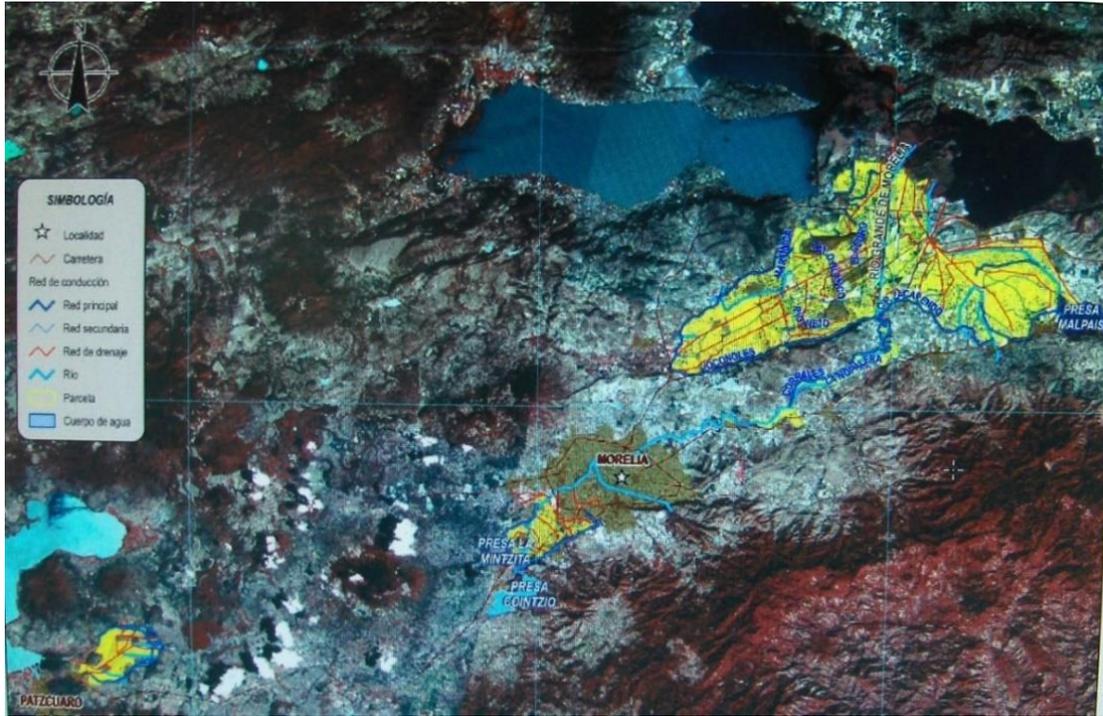


Figura 5.26 D.R. 020 Morelia-Queréndaro, Mich.



Figura 5.27 Sorgo grano regado con aguas residuales en el D.R. 020

La calidad del agua de riego que llega al D.R. 020 es baja debido a la presencia de patógenos, ya que se exceden los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-96, lo que restringe el patrón de cultivos a granos básicos, forrajes y plantas de ornato (Quesada, 2013). Los principales cultivos de otoño-invierno son trigo grano y avena forrajera, de primavera-verano son maíz y sorgo grano, y de perennes, alfalfa (**Figura 5.27**). Según datos de la Estadística agrícola 2013-2014, la superficie sembrada con riego en el ciclo otoño-invierno fue de 4 879 ha, en primavera-verano fue de 11 449 ha, de perennes 2 041 ha, y de segundos cultivos 1 717 ha, para un total de 20 086 ha (**tablas 5.23-5.26**).

Tabla 5.23 Estadística agrícola de otoño-invierno 2012-2013 del D.R. 020

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R. (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Avena forraj. (verde)	955	955	12.91	12 328	1 100	13 560.42
Cártamo	38	38	2.35	90	4 000	359.92
Cebada forraj. (verde)	31	31	9.00	279	1101	306.89
Chile verde	9	9	8.00	72	6103	439.18
Ebo (veza/janamargo)	22	22	14.20	312	620	193.69
Garbanzo forraj.	176	176	4.76	838	2954	2 476.42
Trigo grano	3 648	3 648	6.07	22 132	3 521	77 930.68
Total	4 879	4 879	7.39	36 052	2 643	95 267.20

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

Tabla 5.24 Estadística agrícola de primavera-verano 2012-2013 del D.R. 020

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R. (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Frijol (alubia)	6	6	1.70	10	18 000	183.60
Maíz grano	8 555	8 555	6.34	54 208	2 900	157 203.23
Sorgo grano	2 888	2 888	6.81	19 668	3 000	59 002.46
Total	11 449	11 449	6.45	73 886	2 929	216 389.29

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

Tabla 5.25 Estadística agrícola de perennes 2012-2013 del D.R. 020

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R. (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Alfalfa (verde)	1 793	1 793	60.48	108 476	1 099	119 263.59
Otros forraj. (verde)	244	244	16.01	3 906	1 020	3 982.79
Otros frutales	4	4	4.80	19	3 300	63.36
Total	2 041	2 041	55.06	112 401	1 097	123 309.73

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

Tabla 5.26 Estadística agrícola de segundos cultivos 2012-2013 del D.R. 020

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R. (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Maíz grano	1 233	1 233	6.40	7 892	2 900	22 887.02
Sorgo grano	484	484	6.23	3 018	3 000	9 052.67
Total	1 717	1 717	6.35	10 910	2 928	31 939.68

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

5.4.6 Distrito de Riego 025 Bajo Río Bravo, Tamaulipas

Este distrito se localiza en la porción noreste del estado de Tamaulipas, que comprende parte de los municipios de Matamoros, Valle Hermoso, Río Bravo y una pequeña porción de Reynosa. Su altitud varía de 5 a 35 msnm, entre las coordenadas 25° 27' y 26° 07' latitud norte y 97° 30' y 98° 20' de longitud oeste (**Figura 5.28**).



Figura 5.28 D.R. 025 Bajo Río Bravo, Tamps.

El D.R. 025 fue creado por acuerdo presidencial de fecha 3 de junio de 1942. Posee una superficie dominada de 248 391.48 hectáreas, de las cuales 201 237.34 ha son de riego, y se estima que de estas, 27 000 ha son regadas con aguas residuales. La principal fuente de abastecimiento del riego agrícola son las aguas del río Bravo, almacenadas en las presas internacionales Falcón y La Amistad, a la cual llegan los efluentes de ríos y arroyos que en su trayecto reciben aguas residuales tanto crudas como tratadas de las principales ciudades y poblados asentados en la zona. El distrito registra un padrón de 15 970 usuarios beneficiados, de los cuales 8 731 son pequeños propietarios y 7 239 son ejidatarios. Predomina la tenencia de la tierra de pequeña propiedad en el 70.88 % y la ejidal con el 29.11 %. En la zona de influencia del distrito se presentan tres tipos de climas:

1. Semicálido subhúmedo con lluvias escasas todo el año, con una temperatura media anual mayor a 18 °C y un porcentaje de lluvia invernal del 5 %, características que se presenta en los municipios de Valle Hermoso y Matamoros.
2. Clima seco con lluvias escasas todo el año, con una temperatura media anual mayor a 22 °C, con régimen intermedio de lluvias entre verano e invierno, un porcentaje de lluvias invernales mayor al 18 % y una oscilación térmica menor de 5 °C; estas características se presentan en el municipio de Río Bravo.
3. Un clima seco, el más seco de los BS, con lluvias escasas todo el año, con una temperatura media anual arriba de los 22 °C, una temperatura del mes más frío bajo 18 °C, con un régimen de lluvias intermedio entre verano e invierno, un porcentaje de lluvias invernales menor de 18 % y una oscilación térmica mensual menor de 5 °C.



Figura 5.29 Cultivo de sorgo regado con aguas residuales en el D.R. 025



Figura 5.30 Zacate buffel regado con aguas residuales en el D.R. 025

La precipitación media anual es de 696.7 mm; los meses más lluviosos son septiembre y octubre con un porcentaje del 36.6 % del total de precipitación. Para su operación, el distrito está dividido en cuatro unidades de riego. El principal cultivo de primavera-

verano es el sorgo grano (**Figura 5.29**), el de otoño-invierno es el maíz grano, y de perennes, el zacate buffel (**Figura 5.30**).

Según datos de la Estadística agrícola 2013-2014, la superficie sembrada con riego en el ciclo otoño-invierno fue de 6 070 ha, en primavera-verano fue de 185 208 ha, y de perennes 1 160 ha, lo que da un total de 192 438 ha (**tablas 5.27-5.29**).

Tabla 5.27 Estadística agrícola de primavera-verano 2012-2013 del D.R. 025

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R. (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Algodón	221	221	3.56	788	10 100	7 953.75
Okra	861	861	7.85	6 758	4 058	27 423.78
Otros cultivos	16	16	10.41	167	3 276	545.88
Sandía	10	10	12.48	130	2 500	325.10
Sorgo grano	183 929	183 906	4.62	849 495	3 425	2 909 831.97
Zanahoria	171	171	30.50	5 206	4 200	21 866.67
Total	185 208	185 185	11.57	862 544	4 593	2 967 947.15

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

Tabla 5.28 Estadística agrícola de otoño-invierno 2012-2013 del D.R. 025

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R. (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Maíz grano	6 070	6 069	5.82	35 340	3 654	129 140.25
Total	6 070	6 069	5.82	35 340	3 654	129 140.25

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

Tabla 5.29 Estadística agrícola de perennes 2012-2013 del D.R. 025

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R. (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Zacate buffel (verde)	1 160	1 160	6.50	7 540	1 851	13 954.72
Total	1 160	1 160	6.50	7 540	1 851	13 954.72

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

5.4.7 Distrito de Riego 001 Pabellón, Aguascalientes

Este distrito es el más antiguo de México, se creó en 1931 y comenzó a operar en 1936. Fue hasta 1947 cuando surgió la Junta de Aguas y un año más tarde, en 1948, se entregó formalmente el distrito a los usuarios de riego. Sin embargo, fue hasta 1992 que obtuvo su título de concesión para utilizar y aprovechar aguas superficiales por un volumen anual de 43.296 Hm³. El distrito se localiza al norte del estado de Aguascalientes, en el centro de la región denominada Valle de Aguascalientes y sobre el acuífero subterráneo interestatal Ojocaliente-Aguascalientes-Encarnación de Díaz.

Abarca los municipios de Rincón de Romos, Pabellón de Artega y Tepezala (Macias *et al.*, 2009). El clima predominante en la zona es semiseco templado, con una temperatura promedio anual de 23.1 °C. La precipitación promedio anual es de 509.3 mm.

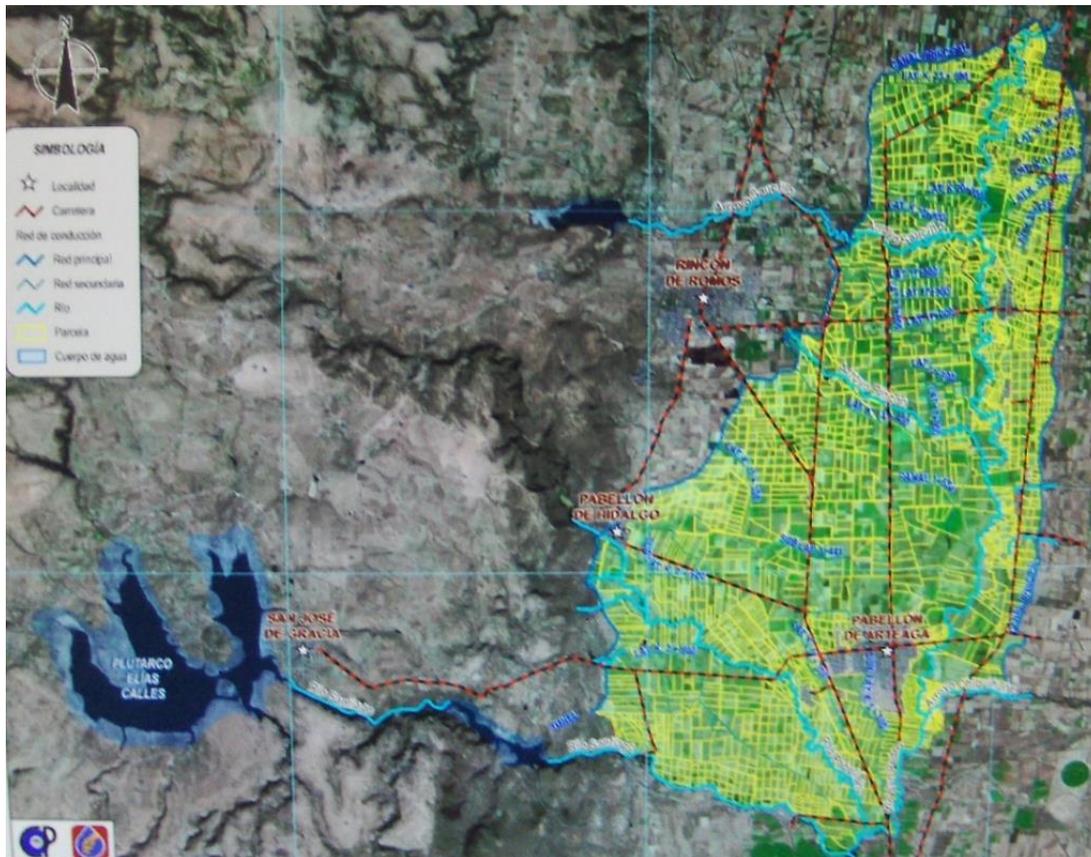


Figura 5.31 D.R. 001 Pabellón, Aguascalientes

El Distrito de Riego 001 (**Figura 5.31**) posee una superficie de 11 800 ha, de las cuales 6 100 ha son regables y de estas se estima que 5 825 ha son regadas con aguas residuales que son una mezcla de aguas tratadas de la ciudad de Aguascalientes, aguas superficiales provenientes de la presa Presidente Elías Calles y la Derivadora Jocoqui. Beneficia a 1 799 usuarios y para su operación se encuentra dividido en 19 secciones de riego, donde predomina la tenencia de la tierra ejidal. En el año 2005 se comenzó un ambicioso programa de intercambio de aguas de 55 pozos en este distrito

por agua superficial y residual tratada y un programa de modernización para tecnificar el riego, pasando de riego por gravedad a riego por goteo.

Los principales cultivos de otoño-invierno son avena forrajera y pastos; de primavera-verano son maíz grano y hortalizas; de perennes, principalmente alfalfa y de segundos cultivos, maíz grano. Según datos de la Estadística agrícola 2013-2014, la superficie sembrada con riego en el ciclo otoño-invierno fue de 418 ha, en primavera-verano fue de 2 756 ha, de perennes 818 ha, y de segundos cultivos fue de 408 ha, para un total de 4 400 ha (**tablas 5.30-5.33**).

Tabla 5.30 Estadística agrícola de otoño-invierno 2012-2013 del D.R. 001 Pabellón, Aguascalientes

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R. (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Ajo	86	86	14.75	1 269	8 295	10 522.21
Avena forrajera (verde)	128	128	38.17	4 486	550	2 442.88
Otras hortalizas	92	92	19.54	1 798	5 866	10 545.19
Otros pastos (verde)	112	112	50.56	5 663	465	2 633.16
Total	418	418	32.57	13 615	1 920	26 143.44

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

Tabla 5.31 Estadística agrícola de primavera-verano 2012-2013 del D.R. 001 Pabellón, Aguascalientes

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R. (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Brócoli	178	178	28.13	5 007	5 120	25 636.56
Chile verde	156	156	21.04	3 282	6 200	20 349.89
Frijol (alubia)	30	30	2.37	71	7 350	522.58
Maíz grano	2372	2 372	8.87	21 045	3 150	66 290.99
Sorgo grano	20	20	6.80	136	2 988	406.37
Total	2 756	2 756	10.72	29 541	3 832	113 206.39

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

Tabla 5.32 Estadística agrícola de perennes 2012-2013 del D.R. 001 Pabellón, Aguascalientes

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R. (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Alfalfa	704	704	92.15	64 874	489	31 723.19
Otros frutales	32	32	18.92	1 551	13 283	20 607.78
Otros pastos	82	82	80.00	2 560	465	1 190.40
Total	818	818	84.33	68 985	776	53 521.37

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

Tabla 5.33 Estadística agrícola de segundos cultivos 2012-2013 del D.R. 001 Pabellón, Aguascalientes

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Maíz grano	408	408	8	3 264	3 150	10 281.60
Total	408	408	8	3 264	3 150	10 281.60

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

5.4.8 Distrito de Riego 052 Durango, Dgo.

Este distrito se ubica en el estado de Durango (**Figura 5.32**), al suroeste, entre los paralelos 23°53'34" y 24°12'11" de latitud norte y entre los meridianos 103° 57'34" y 104°39'57" de longitud oeste, a una altura de entre 1 878 y 1 955 msnm. El distrito se creó por acuerdo presidencial del 19 de diciembre de 1956. Posee una superficie dominada de 22 922.26 ha, de las cuales 21 224.96 son regables, y de las que se estima que 2 700 ha son regadas con aguas residuales tratadas de la ciudad de Durango.

La principal zona con reúso corresponde al Módulo 3, con una superficie de 9 339.75 ha, de las cuales un 28.90 % es regada con aguas residuales tratadas. En este distrito predomina la tenencia de la tierra ejidal con 15 239 ha, mientras que de pequeña propiedad se tienen 5 895.74 ha. El padrón de usuarios beneficiados del distrito se encuentra integrado por 4 383 productores, de los cuales 3 890 son ejidatarios y 493 son pequeños propietarios (IMTA-CONAGUA, 2007).

En la zona de influencia del distrito predomina el clima semiseco con verano cálido. La temperatura oscila entre 7 y 18 °C. La precipitación promedio anual es de 537.8 mm. La evaporación media anual es de 2 364.7 mm. En la zona donde se ubica el distrito se presentan heladas en los meses de septiembre a marzo. En la zona de influencia del distrito predominan los suelos aluviales del tipo leptosol, con texturas que van desde arcillas finas a arenosos. Para su operación el distrito se encuentra dividido en 5 módulos de riego:

- Módulo 1. San Atenógenes
- Módulo 2. Francisco Villa
- Módulo 3. Guadalupe Victoria
- Módulo 4. Peña del Águila
- Módulo 5. Santiago Bayacora

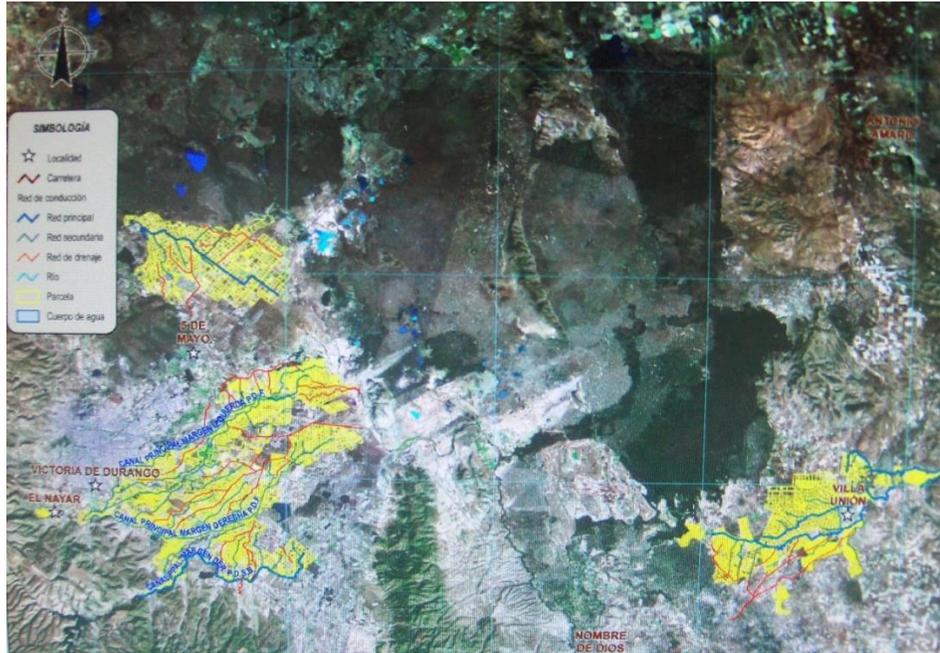


Figura 5.32 D.R. 052 Durango, Dgo.

Actualmente el D.R. 052 utiliza diversas fuentes de agua para riego: aguas de la presa Guadalupe Victoria, aguas subterráneas del acuífero del Valle de Guadiana, aguas residuales tratadas de la ciudad de Durango y aguas residuales crudas que se mezclan con las del arroyo “Acequia Grande” (Jáquez, 2014).

En 1996 entró en funcionamiento la Planta de Tratamiento de la Ciudad de Durango, y el efluente tratado descargaba a la “Acequia Grande”, por lo que el Organismo Operador de Durango buscó que los usuarios del Módulo 3 se interesaran en su aprovechamiento para reúso agrícola. Fue así que la Asociación del Módulo 3 buscó el apoyo de la Comisión Nacional del Agua a fin de que se les concesionaran las aguas tratadas con fines de reúso agrícola y se gestionaran ante esta dependencia los apoyos necesarios para ejecutar obras de infraestructura que permitieran interconectar el efluente tratado, bajo un esquema de intercambio de agua de la presa por el efluente tratado. Actualmente el canal entubado de interconexión entre la planta de tratamiento y la zona de riego del Módulo III conduce un gasto de $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ (Antelo, 2001).



Figura 5.33 Nogales regados con aguas residuales en el D.R. 052

Los principales cultivos de otoño-invierno son avena y trigo grano; de primavera-verano son maíz grano y maíz forrajero, y de perennes alfalfa y nogal (**Figura 5.33**). Según datos de la Estadística agrícola 2013-2014, la superficie sembrada con riego en el ciclo otoño-invierno fue de 1 405 ha, en primavera-verano fue de 9 137 ha, y de perennes, 1 889 ha, lo que da un total de 12 431 ha (**tablas 5.34-5.36**).

Tabla 5.34 Estadística agrícola de otoño-invierno 2012-2013 del D.R. 052, Durango

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Avena	818	818	3.66	2 991	5 977	17 876.78
Avena forraj. (verde)	220	220	5.91	1 299	1 754	2 278.10
Col (repollo)	4	4	40.0	150	2 000	300.00
Lechuga	2	2	15.0	30	4 000	90.00
Zacate Rye Grass (verde)	102	102	17.58	1 802	1 419	2 556.91
Trigo grano	250	250	3.50	875	3 500	3 062.50
Triticale	10	10	6.50	62	1 900	117.32
Total	1 405	1 405	5.13	7 208	3 650	26 281.61

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

Tabla 5.35 Estadística agrícola de primavera-verano 2012-2013 del D.R. 052, Durango

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Avena forraj.(verde)	20	20	4.50	91	1 300	118.70
Calabaza	2	2	7.50	14	6 000	85.05
Cebolla	2	2	8.00	12	10 000	120.00
Chile seco	246	246	1.02	251	36 893	9 272.89

Col (repollo)	1	1	30.00	42	2 000	84.00
Frijol (alubia)	787	787	1.11	877	7 058	6 191.96
Lechuga	9	9	20.00	173	2 000	346.80
Maíz elotero	26	26	7.00	183	4 000	731.36
Maíz forraj. (verde)	2 640	2 640	49.98	131 938	347	45 716.80
Maíz grano	5 353	5 353	6.27	33 569	3 285	110 288.39
Zacate Rye Grass (verde)	16	16	9.00	140	1 520	212.04
Sorgo grano	34	34	5.18	174	2 924	508.50
Tomate de cáscara	1	1	5.00	5	5 000	25.00
Total	9 137	9 137	18.33	167 460	1 037	173 701.49

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

Tabla 5.36 Estadística agrícola de perennes 2012-2013 del D.R. 052, Durango

Cultivo con riego	Sup. semb. (ha)	Sup. cosech. (ha)	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	P.M.R (\$/ton)	Valor de la cosecha (miles de \$)
Alfalfa (seco)	818	818	16.53	13 522	2 580	34 892.26
Durazno	38	38	4.58	175	4 000	701.62
Nogal	826	704	2.01	1 413	40 000	56 501.20
Nopal verdura	2	0	0.00	0	0	0.00
Otros industriales	10	0	0.00	0	0	0.00
Zacate Rye Grass (verde)	195	195	21.11	4 108	1 491	6 124.71
Total	1 889	1 755	10.95	19 219	5 111	98 219.78

Fuente: Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2012-2013 (CONAGUA, 2015)

“El aprovechamiento de las aguas residuales con fines de reúso en agricultura requiere poner especial atención a la calidad fisicoquímica y bacteriológica”

Aguas residuales y su reúso en agricultura



6

Capítulo 6

AGUAS RESIDUALES Y SU REÚSO EN AGRICULTURA

6.1 Calidad del agua de riego

El concepto de calidad del agua se refiere a las características de las aguas que puedan afectar su adaptabilidad a un uso específico; en otras palabras, es la relación entre la calidad del agua y las necesidades del usuario (Ayers y Westcot, 1987). La calidad de las aguas residuales puede variar significativamente según su origen (doméstico, industrial, etc.), y también según el tipo y cantidad de contaminantes presentes en ellas.

El aprovechamiento de las aguas residuales con fines de reúso en agricultura requiere poner especial atención a la calidad tanto desde el punto de vista agronómico (lo que involucra la calidad fisicoquímica del agua), como desde el punto de vista bacteriológico. El elemento clave en el manejo del agua será determinar su calidad considerando su origen, y luego verificar mediante muestreos si cumple los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos que marca la normatividad vigente en México (NOM-001-SEMARNAT-1996), o los límites de contaminantes que establece la Organización Mundial de la Salud (OMS) para el reúso.

Los parámetros agronómicos más importantes a considerar en la calidad del agua residual para riego son conductividad eléctrica (CE); cationes: sodio (Na), calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K); aniones: carbonato (CO_3^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^{2-}), cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}) y nitrato (NO_3^-). Solamente en el caso de que exista evidencia de que el agua residual que se va a aprovechar tiene metales pesados, se deberá solicitar su determinación específica o con base en el listado que marca la normatividad vigente, considerando los metales más relevantes por sus efectos sobre la salud humana: arsénico, cadmio, cianuros, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo y zinc. Se deberán comparar los resultados de las concentraciones presentes en las muestras enviadas al laboratorio con los límites que establezca la misma normatividad o las referencias internacionales.

El parámetro bacteriológico más importante a considerar en la calidad del agua residual con fines de reúso en riego de cultivos agrícolas es la presencia de patógenos como coliformes fecales (CF) y huevos de helmintos (HH), que son los indicadores internacionales que se utilizan para establecer la contaminación del agua por bacterias y parásitos, causantes de enfermedades de tipo gastrointestinal en humanos. Es muy importante determinar la presencia o ausencia de parásitos o patógenos en el agua de

riego, porque estos afectarán la calidad sanitaria de los productos regados e incrementarán el riesgo de contraer enfermedades en los consumidores de estos productos o entre los trabajadores agrícolas que entren en contacto con el agua de riego y los cultivos durante la aplicación del riego.

Se debe considerar que el agua de riego puede afectar las características físicas de los suelos y los puede degradar por la acumulación de sales, lo que perjudicaría el patrimonio principal de los agricultores. Una mala calidad del agua también puede afectar el rendimiento potencial de los cultivos regados y disminuir el ingreso que los productores obtengan de la actividad agrícola. La planeación del reúso del agua residual deberá hacerse con sumo cuidado.

6.2 Cómo evaluar e interpretar la calidad del agua de riego

Se deberá evaluar la calidad del agua de riego, sea residual cruda o tratada o agua de primer uso, primero desde el punto de vista agronómico considerando salinidad, sodicidad y toxicidad. Es necesario analizar la concentración de sales en el agua de riego, ya que la práctica del riego puede favorecer la concentración de sales en el suelo dependiendo de las condiciones climatológicas, sobre todo en sitios donde se presentan altas temperaturas que propician elevadas tasas de evaporación que disminuyen la humedad del suelo, pero prácticamente no eliminan sales, por lo que la solución del suelo se hace más salina a medida que el suelo se seca. Además, al concentrarse en el perfil del suelo, algunas sales alcanzan su máximo de solubilización y precipitan retirando de la solución del suelo algunos cationes y alterando su proporción original. Esto ocurre con las sales de calcio de baja solubilidad, lo que provoca un aumento del porcentaje de sodio intercambiable (PSI), lo cual puede verse reflejado en efectos negativos sobre la estructura del suelo.

Normalmente se utiliza la conductividad eléctrica (CE) como parámetro para evaluar la salinidad del agua de riego, mientras que la sodicidad se cuantifica utilizando la relación de adsorción de sodio (RAS). Un alto contenido de sodio en el agua de riego puede inducir elevados índices de porcentaje de sodio intercambiable (PSI), lo cual puede traducirse en pérdida de estructura del suelo por dispersión o hinchamiento de los agregados.

La toxicidad del agua de riego se evalúa utilizando la determinación de los iones cloro, boro y sodio, ya que muchos cultivos son sensibles a dichos elementos. El efecto se presenta cuando las raíces del cultivo absorben estos elementos del agua de riego y llegan a las hojas de la planta, donde se acumulan afectando la función de fotosíntesis por el daño que presentan las hojas, y se reflejan en problemas de desarrollo y

productividad del cultivo. Ayers y Westcot (1987) mencionan las directrices para interpretar la calidad del agua de riego, mismas que resultan muy útiles para seleccionar los cultivos que se pueden establecer en zonas con reúso con base en los grados de restricción que presenta el agua para riego. Por ejemplo, si el agua de riego tiene una conductividad eléctrica (CE) de <0.7 dS/m, se podrán regar casi todos los cultivos, excepto aquellos muy sensibles a sales. Y si la CE se encuentra en el rango de 0.7 a 3.0 dS/m, solo se recomienda sembrar aquellos cultivos que tengan de buena a moderada tolerancia a salinidad (**Tabla 6.1**).

Tabla 6.1 Directrices para interpretar la calidad de las aguas para riego

Parámetro		Unidades	Grado de restricción para su uso		
			Ninguno	Ligero a moderado	Severo
Salinidad ECw (1)		dS/m	<0.7	0.7-3.0	>3.0
TDS		mg/L	<450	450-2000	>2000
TSS		mg/L	<50	50-100	>100
RAS	0–3	meq/L	$>0.7ECw$	0.7-0.2ECw	$<0.2ECw$
RAS	3–6	meq/L	$>1.2ECw$	1.2-0.3ECw	$<0.3ECw$
RAS	6–12	meq/L	$>1.9ECw$	1.9-.5ECw	$<0.5ECw$
RAS	12–20	meq/L	$>2.9ECw$	2.9–1.3ECw	$<1.3ECw$
RAS	20–40	meq/L	$>5.0ECw$	5.0–2.9ECw	$<2.9ECw$
Sodio (Na+)	Riego por aspersión	meq/L	<3	>3	
Sodio (Na+)	Riego superficial	meq/L	<3	3–9	>9
Cloruro (Cl ⁻)	Riego por aspersión	meq/L	<3	>3	
Cloruro (Cl ⁻)	Riego superficial	meq/L	<4	4–10	>10
Cloruro (Cl ₂)	Total residual	mg/L	<1	1–5	>5
Bicarbonato (HCO ₃)		mg/L	<90	90–500	>500
Boro (B)		mg/L	<0.7	0.7–3.0	>3.0
Sulfuro de hidrógeno		mg/L	<0.5	0.5–2.0	>2.0
Hierro (Fe)	Riego por goteo	mg/L	<0.1	0.1–1.5	>1.5
Manganeso (Mn)	Riego por goteo	mg/L	<0.1	0.1–1.5	>1.5
Nitrógeno total		mg/L	<5	5–30	>30
pH	Amplitud normal 6.5–8				

Fuente: Ayers y Westcot (1987)

El daño foliar derivado de las sales presentes en las aguas residuales que son utilizadas para el riego por aspersión, dependerá de las concentraciones de iones individuales, de la sensibilidad del cultivo, de la frecuencia de las aspersiones, y hasta cierto punto, de factores ambientales tales como temperatura, humedad relativa, y del estrés hídrico de las plantas antes del riego.

Los iones tóxicos contenidos comúnmente en el agua residual de riego son cloro, sodio y boro, y los daños en las plantas pueden ser provocados individualmente o en combinación (Ayers y Westcot, 1987). La toxicidad del cloro puede ocurrir por absorción directa a través de las hojas de los cultivos regados por aspersión o por la absorción a través de la raíz. En cultivos sensibles, el daño se manifiesta a concentraciones de 0.3 a 1.0 %. En el caso del sodio, concentraciones superiores a 0.25 o 0.50 % de sodio en base seca provocan toxicidad en cultivos arbóreos. En el caso del boro los síntomas de toxicidad en la mayoría de los cultivos aparecen cuando la concentración foliar excede 250 o 300 mg de boro por kilogramo de materia seca. Las **tablas 6.2 y 6.3** muestran el grado de tolerancia a estos en algunos cultivos.

Tabla 6.2 Tolerancia relativa de algunos cultivos al sodio intercambiable

Sensibles ¹ PSI < 15	Semitolerantes ¹ 15 < PSI < 40	Tolerantes ¹ PSI > 40
Aguacate (<i>Persea americana</i>)	Zanahoria (<i>Daucus carota</i>)	Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)
Frutas caducifolias	Trébol ladino (<i>Trifolium repens</i>)	Cebada (<i>Hordeum vulgare</i>)
Nueces	Pato miel, gramalote (<i>Paspalum dilatatum</i>)	Remolacha hornamental (<i>Beta vulgaris</i>)
Frijoles (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Fetusca alta (<i>Festuca arundinacea</i>)	Remolacha azucarera (<i>Beta vulgaris</i>)
Algodón (germinación) (<i>Gossypium hirsutum</i>)	Lechuga (<i>Lactuca sativa</i>)	Zacate Bermuda (<i>Cynodon dactylon</i>)
Maíz (<i>Zea mays</i>)	Mijo (<i>pennisetum typhoides</i>)	Algodón (<i>Gossypium hirsutum</i>)
Chícharo (<i>Pisum sativum</i>)	Caña de azúcar (<i>Saccharum officinarum</i>)	Capín, hierba de Pará (<i>Brachiaria mutica</i>)
Toronja (<i>Citrus paradisi</i>)	Bersim, trébol de Alejandría (<i>Trifolium alexandrium</i>)	Zacate Rhodes (<i>Cholris gayana</i>)
Naranja (<i>Citrus sinensis</i>)	Meliloto, trébol dulce (<i>Melilotus parviflora</i>)	Agropiro crestado (<i>Agropyron cristatum</i>)
Durazno (<i>Prunus persica</i>)	Mostaza (<i>Brassica juncea</i>)	Agropiro alargado (<i>Agropyron elongatum</i>)
Mandarina (<i>Citrus reticulata</i>)	Avena (<i>Avena sativa</i>)	Zacate Carnal (<i>Diplachna fusca</i>)
Frijol chino (<i>Phaseolus aureus</i>)	Rábano (<i>Raphanus sativus</i>)	
Lenteja (<i>Lens culinaris</i>)	Arroz (<i>Oriza sativa</i>)	
Cacahuete (<i>Arachis hypogaea</i>)	Centeno (<i>Secale cereale</i>)	
Garbanzo (<i>Cicerarietinum</i>)	Gramma de centeno (<i>Lolium multiflorum</i>)	
Caupíes (<i>Vigna sinensis</i>)	Sorgo (<i>Sorghum vulgare</i>)	
	Espinaca (<i>Spinacea oleracea</i>)	
	Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	
	Veza (<i>Vicia sativa</i>)	
	Trigo (<i>Triticum vulgare</i>)	

Fuente: Ayers y Westcot (1987)

Tabla 6.3 Tolerancia relativa al boro de algunos cultivos

Nombre común	Nombre científico	Nombre común	Nombre científico
Muy sensibles (< 0.5 mg/L)		Moderadamente sensibles (1.0 – 2.0 mg/L)	
Limonero	Citrus limon	Chile	Capsicum annum
Zarzamora	Rubís spp.	Chicharo	Pisum sativa
Sensibles (0.5 – 0.75 mg/L)		Zanahoria	Daucus carota
Aguacate	Persea americana	Rábano	Raphanus sativus
Toronja	Citrus X paradisi	Papa	Solanum tuberosum
Naranja	Citrus sinensis	Pepino	Cucumis sativus
Albaricoquero	Prunus armeniaca	Moderadamente tolerantes (2.0 – 4.0 mg/L)	
Melocotonero	Prunus persica	Lechuga	Lactuca sativa
Cerezo	Prunus avium	Repollo	Brassica oleracea capitata
Ciruelo	Prunus domestica	Apio	Apium graveolens
Caqui	Diospyros kaki	Nabo	Brassica rapa
Higuera	Picus carica	Pasto azul	Poa pratensis
Vid	Vitis vinifera	Avena	Avena sativa
Nogal	Juglans regia	Maíz	Zea mays
Pecana	Carya illinoensis	Alcachofa	Cynara acolymus
Caupíes	Vigna unguiculata	Tabaco	Nicotiana tabacum
Cebolla	Allium cepa	Mostaza	Brassica juncea
Sensibles (0.75 – 1.0 mg/L)		Trébol dulce	Melilotus indica
Ajo	Allium sativum	Calabaza	Cucurbita pepo
Camote	Ipomoea batatas	Melón	Cucumis melo
Trigo	Triticum estivum	Tolerantes (4.0 – 6.0 mg/L)	
Cebada	Hordeum vulgare	Sorgo	Sorghum bicolor
Girasol	Helianthus annus	Tomate	Lycopersicon esculentum
Frijol chino	Vigna radiata	Alfalfa	Medicago sativa
Ajonjolí	Sesamum indicum	Veza	Vicia benghalensis
Lupino, altramuz	Lupinus hartwegii		
Fresa	Fragaria spp.		
Alcachofa	Helianthus tuberosus		
Frijoles	Phaseolus vulgaris		
Pallar, judía lima	Phaseolus lunatus		
Cacahuete	Arachis hypogaea		

Fuente: Ayers y Westcot (1987)

El aspecto bacteriológico también debe ser evaluado e interpretado con base en la normatividad vigente (NOM-001-SEMARNAT-1996), considerando los límites de contaminantes patógenos presentes en el agua. La calidad del agua de riego influye en la calidad sanitaria de los productos con los consecuentes riesgos asociados a la salud pública de los consumidores. Mara y Cairncross (1990) mencionan que con aguas de riego que contengan ≤ 1 huevo de helminto (HH) se pueden regar árboles forestales, cultivos industriales, árboles frutales y pastos o forrajes, mientras que con agua cuya calidad bacteriológica sea de ≤ 1 HH y $\leq 1\ 000$ coliformes fecales (CF)/NMP 100 ml se pueden regar cultivos de consumo humano.

6.3 Riesgos de afectación a los suelos por el riego con aguas residuales

6.3.1 Salinización de terrenos

La salinización del suelo puede tener diversos orígenes. Uno de ellos es antropogénico, y consiste en que una mala práctica de riego aunada a la mala calidad del agua favorece la concentración y afloramiento de las sales en los terrenos agrícolas (**Figura 6.1**). Todas las aguas de riego, sean de primer uso (superficiales o subterráneas), o residuales (tratadas o crudas), contienen sales en distinta proporción según su origen, y tienden a concentrarse en la superficie del terreno por efecto de la evaporación. En zonas con manto freático elevado este tiende a elevarse acarreando sales, con lo que se genera una costra blanquecina en la superficie.



Figura 6.1 Terreno agrícola con afloramiento de sales



Figura 6.2 Aplicación de agua de riego en exceso

Por su origen geológico, los suelos también contienen sales que, sumadas a las provenientes del agua de riego, las de los fertilizantes aplicados, y en su caso a las presentes en el manto freático somero, incrementan los problemas de salinización. El fenómeno de salinización de terrenos se observa con mayor frecuencia en zonas áridas y semiáridas, pues se ve favorecido por el tipo de suelos, las elevadas temperaturas y las altas tasas de evaporación, así como por la presencia de drenaje deficiente y mantos freáticos someros, condiciones que alteran el balance agua-suelo-planta. El agua de riego aplicada en exceso (**Figura 6.2**) y de mala calidad (con gran cantidad de sales), puede provocar la paulatina salinización de suelos, lo que genera bajas productividades, reduce la superficie cultivable y, en casos severos, se propicia su

abandono. Entre las medidas para evitar la salinización de terrenos regados con aguas residuales tratadas están:

- a) Monitorear la calidad del agua de riego (en época de estiaje, principalmente)
- b) Nivelar el suelo
- c) Mejorar las condiciones de drenaje del terreno (natural o artificial)
- d) Aplicar las láminas de riego que el cultivo necesite más una cantidad extra de agua que sirva para lixiviar las sales de la zona de raíces
- e) Lavar suelos entre ciclos agrícolas
- f) Preferir el uso de abonos orgánicos previamente composteados
- g) Evitar aplicar fertilizantes químicos en exceso y no aplicar fertilizantes que contengan cloro y sodio como el cloruro de potasio (ejemplo KCL 0-0-60) y el nitrato de sodio (ejemplo NaNO_3 .13.5-0-45)
- h) Aplicar mejoradores de suelos (como yeso)

Respecto al inciso e), Rhoades y Merrill (1976) propusieron la siguiente ecuación para calcular el requerimiento de lavado de suelos:

$$\text{LR} = \text{ECw} / 5 (\text{ECe}) - \text{ECw}$$

donde

LR = Requerimiento mínimo de lixiviación para control de sales con métodos de riego por gravedad (%)

ECw = Salinidad del agua aplicada (dS m⁻¹)

ECe = Salinidad media del suelo tolerada por el cultivo (dS m⁻¹)



Figura 6.3 Práctica de lavado de suelos para bajar salinidad

Flores *et al.* (1996) mencionan que el método de lavado de suelos (**Figura 6.3**), es la medida de mejoramiento más eficaz para combatir la salinización primaria, así como para prevenir la salinización secundaria de terrenos agrícolas.

6.3.2 Pérdida de infiltración de los suelos

La infiltración es el proceso por el cual el agua se mueve desde el exterior hacia el interior del suelo. Se pueden distinguir tres fases:

1. Intercambio. Este proceso se realiza en la capa superior o superficial del suelo, donde el agua infiltrada puede retornar a la atmósfera por efecto de las altas temperaturas, de la evaporación y del movimiento capilar del agua, así como por medio de la transpiración de las plantas.
2. Transmisión. Este proceso ocurre cuando el agua infiltra hacia las capas del suelo por acción de la gravedad, la cual es superior a la fuerza de capilaridad, empujando el agua hacia las capas más profundas hasta llegar a una capa impermeable, por encima de la cual se acumula.
3. Circulación. Este proceso se realiza cuando el agua que se acumuló por encima de una capa impermeable comienza a circular, por las leyes físicas, principalmente en un sentido horizontal.

La capacidad de infiltración se define como la cantidad máxima de agua que un suelo puede absorber por unidad de superficie horizontal y por unidad de tiempo, y se mide por la lámina del agua que se infiltró y se expresa en mm/h. Los factores principales que intervienen en la capacidad de infiltración son:

- El tipo de suelo. La mayor infiltración se produce en suelos con tamaños de partícula gruesos (como las arenas) y las menores infiltraciones se producirán en suelos con tamaños de partículas finos (como las arcillas).
- El grado de humedad. La capacidad de infiltración será inversamente proporcional a la humedad del mismo; es decir, a mayor humedad, menor será la capacidad de infiltración. Y entre más seco esté el suelo mayor será la capacidad de infiltración.
- El porcentaje de cubierta vegetal existente. Reduce el escurrimiento superficial del agua, favoreciendo su infiltración.
- El grado de compactación del suelo. Se produce al reducirse los espacios entre los agregados del suelo, por ejemplo, mucha carga animal o exceso de pasos de maquinaria agrícola sobre la superficie del terreno lo compactarán y se producirá una reducción en su capacidad de infiltración.

- El porcentaje de materia orgánica presente. Suelos ricos en materia orgánica favorecen un aumento en la capacidad de infiltración.

Un factor más que interviene en la capacidad de infiltración del agua en el suelo es la permeabilidad, que es la capacidad de los materiales del suelo para permitir la libre circulación del agua y el aire a través de sus poros. La permeabilidad del suelo se relaciona con la textura del suelo, y generalmente es mayor en suelos arenosos y menor en suelos arcillosos. La importancia que reviste este factor para el aprovechamiento de las aguas residuales en zonas agrícolas de riego radica en que el reúso se recomienda en suelos con buena permeabilidad y sin problemas de drenaje. Cuando se afecta la permeabilidad del suelo, se presenta también una pérdida de infiltración del agua de riego. Algunos factores que afectan la infiltración del agua en el suelo se detallan en la **Tabla 6.4**.

Tabla 6.4 Factores que afectan la infiltración del agua en el suelo

Características	Factores
Del suelo	Estado de la superficie y el perfil Existencia de grietas y galerías Estabilidad estructural y granulometría Contenido inicial de humedad y conductividad hidráulica Salinidad-sodicidad Contenido de materia orgánica y actividad biológica
Del agua	Contenido salino y clase de partículas en suspensión Tiempo y modo de aplicación del agua
Del medio ambiente	Clima, pendiente y vegetación
Otras	Modelo de producción, prácticas de laboreo o no laboreo, presencia de restos de cosechas

Fuente: Labrador (2003)



Figura 6.4 Prueba de infiltración de suelos

Las características de permeabilidad de un suelo se miden a través de pruebas de infiltración que permiten obtener un valor de la conductividad hidráulica (**Figura 6.4**). Según las recomendaciones del Soil Conservation Service de los Estados Unidos, la permeabilidad se clasifica como se presenta en la **Tabla 6.5**.

Tabla 6.5 Clasificación de la permeabilidad de suelos

	Muy lenta	Lenta	Moderadamente lenta	Moderada	Moderadamente elevada	Elevada	Muy elevada
K (cm/h)	< 0,1	0.1 a 0.5	0.5 – 2.0	2.0 – 6.5	6.5 – 12.5	12.5 – 25.0	> 25.0

K= Conductividad hidráulica

Para riego agrícola se recomiendan generalmente los siguientes límites relacionados con la conductividad hidráulica:

- Suelos con valores de $K < 10^{-6}$ m/s ó $V_f < 0.5$ cm/h, es decir, que son casi impermeables, no pueden regarse sin mejorar previamente su estructura
- Suelos con valores $10^{-6} < K < 5 \times 10^{-6}$ m/s ó $0.5 < V_f < 1.5$ cm/h son muy poco permeables y deben regarse con precaución
- Suelos con valores $5 \times 10^{-6} < K < 5 \times 10^{-5}$ m/s ó $1.5 < V_f < 7.5$ cm/h son moderadamente permeables hasta permeables, y se adaptan al riego superficial por escurrimiento, por bordes o surcos
- Suelos con valores de $K > 5 \times 10^{-5}$ m/s o $V_f > 7.5$ cm/h son muy permeables y pueden a ser regados por aspersión

La pérdida de infiltración del suelo suele presentarse en los primeros centímetros de la superficie del suelo y se debe principalmente a un contenido relativamente alto de iones de sodio o a un contenido relativamente bajo de iones de calcio, tanto en el suelo como en el agua de riego. El alto contenido de grasas y aceites, así como altos contenidos de sólidos presentes en el agua residual, puede afectar la permeabilidad del suelo, y provocar pérdida de infiltración, es decir, reducir su capacidad para infiltrar el agua necesaria para el desarrollo de las plantas.

Es necesario respetar los límites de la normatividad vigente (NOM-001-SEMARNAT-1996) o las referencias internacionales para el aprovechamiento de aguas residuales en riego agrícola. Por ejemplo, la FAO ha establecido directrices para interpretar la calidad del agua de riego que consideran grados de restricción de uso en función de la concentración de sólidos disueltos totales y sólidos suspendidos totales (**Tabla 6.6**).

Tabla 6.6 Grado de restricción de uso de agua de riego por presencia de sólidos

Parámetro	Grado de restricción		
	Nulo	Ligero o moderado	Severo
Sólidos disueltos totales (mg/L)	<450	450-2 000	>2 000
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	<50	50-100	>100

Fuente: Ayers y Westcot (1987)

En México la Norma Oficial Mexicana (NOM-001-SEMARNAT-1996) ha establecido límites de contaminantes en aguas residuales que sean descargadas a cuerpos de agua o bienes nacionales, y específicamente con respecto a las aguas residuales que viertan a suelos con uso en riego agrícola. Entre otros otros parámetros se mencionan las grasas y aceites (**Tabla 6.7**).

Tabla 6.7 Límites de contaminantes de grasas y aceites, para aguas residuales especificados en la normativa mexicana

Parámetro	Suelos con uso riego agrícola	
	Promedio diario	Promedio mensual
Grasas y aceites (mg/L) *	25	15

*Muestra simple promedio ponderado

Fuente: NOM-001-SEMARNAT-1996

Para evitar que se produzca una pérdida de infiltración en el suelo atribuible al agua de riego, sobre todo en zonas donde se reúsen las aguas residuales tratadas, es conveniente:

1. Realizar una caracterización hidrodinámica del suelo, es decir, estimar la conductividad hidráulica a saturación y una escala característica de las presiones en el suelo con base en la textura, por ejemplo, a fin de realizar un diseño del sistema de riego que se empleará en el proceso del reúso de aguas.
2. Monitorear y verificar la calidad del agua de riego aplicada, poniendo especial atención a los parámetros de sólidos disueltos totales, salinidad y grasas y aceites, los cuales no deben rebasar los límites establecidos por la normatividad vigente o los criterios agronómicos de calidad del agua para riego agrícola.
3. Vigilar los tiempos de aplicación del riego en las parcelas para evitar que se aplique agua en exceso. Deben observarse los tiempos obtenidos en el proceso de diseño del sistema de riego, a fin de generar valores lo mas cercanos posibles a las eficiencias de proyecto.

4. Adicionalmente se recomienda combinar las buenas prácticas agrícolas que incluyen un sistema de siembra de cultivo-descanso, con siembra de abonos verdes y su incorporación, y rotación de cultivos.

6.4 Medidas que se pueden implementar para mejorar la calidad del agua en la parcela

El ideal del reúso de las aguas residuales para agricultura es que el agua cumpla con los requisitos de calidad para el riego agrícola, es decir, que provenga de un sistema de tratamiento y que el efluente cumpla con los límites de contaminantes que marca la normatividad vigente en México (NOM-001-SEMARNAT-1996), o con los referentes internacionales que maneja la OMS.

Sin embargo, la realidad es que muchas de las aguas residuales aún no cumplen con la calidad de reúso para agricultura, por lo que en la mayoría de casos la calidad del agua que llega a las parcelas para regar los cultivos requieren de un tratamiento complementario a fin de mejorar su calidad, sobre todo en el aspecto bacteriológico, para hacerlas aptas para su reúso. A continuación se detallan algunas opciones que se pueden considerar para mejorar la calidad del agua de reúso, lo cual se puede llevar a cabo en la misma planta de tratamiento o en la parcela.

6.4.1 Desinfección con rayos ultravioleta (UV)

Cuando se habla de reúso del agua residual, lo mejor es complementar con un proceso de desinfección previo al reúso en la parcela. Se debe buscar tecnología que sea segura, eficaz y que no produzca residuos. La desinfección con rayos ultravioleta (UV) constituyen el método ideal, ya que su longitud de onda permite eliminar de manera eficaz los microorganismos y agentes patógenos que causan enfermedades de tipo gastrointestinal. Los rayos UV actúan sobre el ADN de las bacterias destruyendo su información genética e impidiendo su reproducción. La desinfección del agua residual con rayos ultravioleta tiene muchas ventajas:

- Erradicación efectiva e inmediata de bacterias sin necesidad de adicionar algún producto químico
- No se forman sustancias no deseadas, como los trihalometanos
- Su efecto desinfectante no produce olor o sabor
- Su efectividad no depende del pH del agua
- La instalación del equipo requiere poco espacio
- El equipo tiene bajos costos de mantenimiento contra una gran efectividad en la remoción de microorganismos y patógenos

- Gran efectividad en la remoción de microorganismos como Criptosporidia y Giardia, que son muy resistentes a otros sistemas de desinfección
- Menor tiempo de contacto en relación con otros sistemas de desinfección. Generalmente los UV solo requieren de 20 a 30 segundos de contacto para eliminar bacterias, virus, esporas y quistes, lo que evita que a través del agua se dispersen elementos causantes de enfermedades gastrointestinales

Los rayos ultravioleta permiten reducir la carga biológica del agua y mejoran la calidad sanitaria del efluente hasta límites admisibles para su reúso tanto en riego agrícola como en servicios al público, por lo que es el sistema de desinfección más recomendado cuando el agua residual tiene fines de reúso. Por ejemplo, García Giménez (2010) menciona que se estableció un sistema de desinfección con rayos ultravioleta para mejorar la calidad sanitaria del agua residual que llegaba para el riego, la cual traía entre 3 000 y 16 000 coliformes fecales NMP/100 ml. Una vez que el agua pasaba por el sistema de rayos UV para desinfectarla, se obtenía agua con menos de 1 000 coliformes fecales NMP/100 ml, lo que muestra su alta efectividad. Las principales desventajas del uso de este sistema radican en que:

- Requiere inversión inicial para comprar el equipo (alrededor de 750 US, a la tasa de cambio de agosto de 2015)
- Se necesita mantenimiento frecuente que debe ser considerado en los costos de operación
- No se puede utilizar agua mal tratada, con sólidos en suspensión mayores a 30 mg/L, ya que evitan que la desinfección sea efectiva
- Se necesita una fuente de energía eléctrica en el sitio

6.4.2 Desinfección con ozono

El gas ozono se ha utilizado en países desarrollados para desinfectar agua desde finales del siglo XVIII por su efectividad para remover bacterias y virus, comparado con la cloración. El gas ozono se produce a partir del oxígeno puro; la tecnología actualmente disponible para usarlo como desinfectante integra un generador de ozono (que incluye filtros de aire), un sistema difusor y un tanque de contacto. El sistema de desinfección con ozono se instala en línea con la tubería de suministro de agua. El equipo está construido de forma tal que, cuando se abre cualquier toma de agua en el sistema, se produce una caída de presión en el sistema y uno de los sensores en el interior registrará la variación de presión y enviará la orden de producir ozono, lo que ocurre completamente en automático y en varias etapas en función de la demanda de agua.

En la parcela el sistema puede ser usado como tratamiento complementario de las aguas residuales para riego, en virtud de la mejora que se produce en su calidad sanitaria. Existen pequeños equipos que permiten desinfectar entre 5 y 15 litros por minuto operando con una potencia de 55 W. El tiempo de contacto depende de la calidad del agua residual, pero en general es de escasos minutos. Sin embargo, a menor temperatura se requerirá de un mayor intervalo de tiempo de contacto y una mayor concentración de ozono (Comisión Nacional de Riego, 2007, citado por García Giménez, 2010).

Las principales desventajas de este sistema radican en que aún es una tecnología compleja, que tiene un alto costo de inversión inicial y se requiere una fuente de energía eléctrica cercana y disponible. Además, por ser un gas inestable es necesario que se capacite adecuadamente al operador del sistema y se concientice totalmente de los riesgos y de los cuidados obligatorios que se deberán observar al operar el sistema para evitar accidentes.

6.4.3 Micro y ultrafiltración con membranas

Con la microfiltración a través de membranas es posible remover bacterias presentes en el agua residual, y con la ultrafiltración se puede remover virus. Ambas técnicas basan sus principios en la separación física de partículas. El tamaño de poro de las membranas utilizadas (0.1 a 10 μm) determinarán la eficacia en la remoción de sólidos y microorganismos patógenos. Para utilizar las técnicas de micro y ultrafiltración es muy importante que el agua de reúso haya tenido al menos un tratamiento primario o que se establezca una unidad de prefiltrado con materiales de poro entre 0.5 a 1.0 mm. También se pueden establecer rejillas en los canales de distribución del agua de riego que reduzcan el paso de los sólidos. Otra alternativa es utilizar materiales decantadores para separar mediante gravedad los materiales o partículas más pesadas, como arenas o gravillas. Existen datos que muestran la alta eficiencia de remoción de patógenos y sólidos cuando se han usado membranas de óxido de aluminio, como se puede observar en la **Tabla 6.8**.

Tabla 6.8 Remoción de patógenos usando microfiltración

Parámetros analizados	Agua residual urbana antes del microfiltrado	Agua residual urbana después del microfiltrado
E. Coli (UFC/100 ml)	8.20 E+01	0.00E+00
Salmonela (en 1 litro)	No detectada	No detectado
Shigella (en 1 Litro)	No detectada	No detectado
Enterococos (UFC/100ml)	1.60E+01	0.00E+00
Resto de bacterias (UFC/100 ml)	3.90E+05	3.20E+03
Resto de hongos (UFC/100 ml)	1.60E+01	1.00E+00
Phytium	No detectada	No detectado

Parámetros analizados	Agua residual urbana antes del microfiltrado	Agua residual urbana después del microfiltrado
Phytophthora	No detectada	No detectado

Fuente: Gobierno de España-Ministerio de Economía (2010). Ejemplos prácticos de reutilización de agua residual tratada y regenerada para el riego de cultivos. Evaluación de riesgos.

Las principales desventajas de este sistema radican en que también es una tecnología compleja. Se requieren bombas, filtros, depósitos de agua, el módulo de micro y ultrafiltración con sus membranas, lo que representa un alto costo de inversión inicial y además requiere una fuente de energía eléctrica, por lo que solo en algunas explotaciones comerciales de cultivos bajo invernadero se justifica su aplicación.

“La planeación adecuada de proyectos de reúso de aguas residuales para agricultura debe considerar, la selección de cultivos, la selección del método de riego, la elección de las prácticas de manejo del cultivo y la adopción de medidas de reducción de riesgos de salud”

**Condiciones necesarias para reusar las
aguas residuales para el riego agrícola**

7

Capítulo 7

CONDICIONES NECESARIAS PARA REUSAR LAS AGUAS RESIDUALES PARA EL RIEGO AGRÍCOLA

Las condiciones necesarias para el reúso de las aguas residuales a nivel parcelario son la selección de cultivos, el método de riego, adoptar prácticas adecuadas de manejo del agua de riego y del cultivo e implementar medidas de reducción de riesgos de salud en los trabajadores agrícolas.

7.1 Selección de cultivos

En zonas con reúso de aguas residuales tratadas, la selección de cultivos debe obedecer principalmente a la calidad del agua de riego, los riesgos de salud pública y las restricciones que imponga la legislación o normatividad vigente o los referentes internacionales.

7.1.1 Selección de cultivos de acuerdo con la calidad del agua

Desde el punto de vista fisicoquímico y bacteriológico, la calidad del agua de riego influye sobre los cultivos, beneficiándolos o afectándolos. En la calidad fisicoquímica del agua se debe poner especial atención a la conductividad eléctrica del agua (CE), a la toxicidad por iones específicos como sodio, boro o cloro, y a los metales pesados, además de los patógenos (principalmente huevos de helmintos y coliformes fecales).

Ayers y Westcot (1987) mencionan las directrices para interpretar la calidad del agua de riego, que resultan muy útiles para seleccionar los cultivos que se pueden establecer con base en los grados de restricción que presentan las aguas para su uso. Por ejemplo, si el agua de riego tiene una Conductividad Eléctrica (CE) de <0.7 dS/m se pueden regar casi todos los cultivos, excepto aquellos muy sensibles a sales. Y si la CE se encuentra en el rango de 0.7 a 3.0 dS/m, solo se recomienda sembrar aquellos cultivos que tengan de buena a moderada tolerancia a la salinidad (ver **Tabla 6.1** del Capítulo 6 de este libro, Apartado 6.2).

No todos los cultivos responden de igual manera a la salinidad. Algunos producen rendimientos aceptables a niveles altos de salinidad y otros no porque son sensibles a niveles relativamente bajos. Estas diferencias obedecen a que unos tienen una mejor capacidad de adaptación osmótica que les permite absorber agua, aun en condiciones de salinidad. A continuación se proporcionan algunos ejemplos:

Plantas gramíneas forrajeras medianamente resistentes a salinidad de agua y suelo resultan ideales para su establecimiento en zonas con proyectos de reúso, como:

- *Festuca Arundinacea*, comúnmente llamada pasto festuca, alta o cañuela

- *Lolium perenne*, también llamado pasto inglés, pasto lolium, raygrass, ballico, etc.
- *Cynodón Dactilón*, también llamado pasto Bermuda, grama común, pasto del perro, pata de gallo, etc.

Leguminosas tolerantes a salinidad de agua y suelo, que responden bien al riego con aguas residuales, se usan como forraje para alimentar al ganado; se recomienda su uso en ensilaje. Además, *Lotus coniculatus* también es utilizada por los apicultores como fuente de néctar para alimentar las colmenas de abejas productoras de miel:

- *Lotus coniculatus*, también llamado loto corniculado o zapaticos de la virgen
- *Trifolium fragiferum*, también llamado trébol fresero, fresa del burro, trébol común

El daño foliar que causen las sales presentes en las aguas residuales que son utilizadas para el riego por aspersión en las plantas dependerá de las concentraciones de iones individuales, de la sensibilidad del cultivo, de la frecuencia de las aspersiones, y hasta cierto punto, de factores ambientales, tales como temperatura, humedad relativa, y del estrés hídrico de las plantas antes del riego.

Los cloruros presentes en el agua para riego representan un riesgo porque son absorbidos por la planta y se acumulan en las hojas produciendo quemaduras en las hojas cuando su concentración es alta. La toxicidad del cloro puede ocurrir por absorción directa a través de las hojas de los cultivos regados por aspersión o por la absorción a través de la raíz. En cultivos sensibles, el daño se manifiesta a concentraciones que van desde 0.3 a 1.0 %.

En el caso del sodio, concentraciones superiores a 0.25 % de sodio en base seca, provocan toxicidad en cultivos arbóreos. Los síntomas de toxicidad por boro aparecen en la mayoría de los cultivos cuando la concentración foliar excede 250 mg por kilogramo de materia seca.

7.1.1.1 Cultivos alternativos para reusar las aguas residuales con cierto grado de salinidad

La concentración de sales en las aguas residuales limita muchas veces su aprovechamiento. Sin embargo, existen plantas denominadas halófitas que son resistentes a ciertos grados de salinidad y que pueden sembrarse para generar ingresos entre los productores cuyo recurso suelo (terreno), presenta características productivas poco favorables, por encontrarse ubicados en sitios semidesérticos o en zonas cercanas a las costas y con baja calidad de agua de riego (generalmente por concentraciones de sales en distinto grado).

El término halófito se refiere a plantas tolerantes a sales. Aunque no existe una definición precisa del término, se usa para clasificar plantas que crecen en ambientes

con suelos salinos y tienen cierta tolerancia a salinidad (Orcuitt y Nielsen, 2000). Las semillas de algunas plantas halófitas como *Salicornia bigelovii* (*dwarf saltwort*, *pickleweed*) contienen un aceite que es apto para la producción de biocombustibles para su uso en la aviación (Rembio.org.mx, 2015).

La *Salicornia bigelovii* es una especie que, al estar adaptada a crecer en suelos salinos, puede ser regada con aguas salinas naturales, residuales o tratadas. Su cultivo extensivo puede contribuir a la disminución en los niveles de salinidad en terrenos agrícolas, ya que la planta adsorbe sales, retirándolas del suelo; su cultivo favorece la preservación del medio ambiente. Los desiertos costeros o las franjas de terrenos próximos a la costa también podrían ser irrigados con agua residual para cultivar esta planta. En sitios con aprovechamiento de aguas residuales se recomienda su siembra con fines forrajeros de corte, para alimentar al ganado o bien como insumo para la producción de biocombustible, pero también para crear zonas con vegetación que sirvan para la anidación de fauna silvestre.

Debido a la importancia que tiene la actividad agropecuaria en zonas áridas o semiáridas y los volúmenes cada vez más crecientes de aguas residuales, es importante considerar el reúso para la siembra de forrajes alternativos como Coquia (*Kochia scoparia* L), frijol yorimon (*Vigna unguiculata* L.Walp), pasto Taiwan (*Pennisetum purpureum* Schum), nopal (*Opuntia spp*), y pasto salado (*Distichlis Espicata*) entre otros, que tienen buena aceptación como forrajes para alimentar al ganado bovino, ovino, caprino, porcino y cunícola. Los cultivos de estos forrajes producen altos rendimientos de materia fresca y seca, con poca agua e incluso con agua de baja calidad con conductividad eléctrica mayor a 3 dS/m (Murillo *et al.*, 2009).

La coquia (*Kochia scoparia* L) es una planta dicotiledonia de la familia *Amaranthaceae*. Es de crecimiento anual, posee alto contenido de proteína (14 a 26 %), crece en suelos salinos, erosionados y con problemas de humedad. La altura de la planta puede variar entre 15 cm y 2 m. Con solo 200 mm de agua de lluvia se pueden producir de 40 a 70 ton/ha, y con riego de 50 a 60 cm de agua que puede ser residual, se pueden alcanzar producciones que van de los 80 a 130 ton/ha (materia verde).

La coquia es una planta halófitas como el tamarix, el romerito y el pasto salado, se desarrolla bien en salinidades menores a 25dS/m, es capaz de soportar descensos de la humedad del suelo hasta de 23.5 bares sin marchitarse. Además, una producción de 25 ton/ha de materia seca extrae 8 ton/ha de sales del suelo, lo cual la hace útil como mejoradora de suelos salinos (CP-CNA, 2004).

Riasi *et al.* (2008) mencionan que *K. scoparia* tiene mejores valores nutricionales y digestivos como forraje para rumiantes en comparación con otras especies halófitas bajo prueba. Jami Al Ahmadi y Kafi (2008) mencionan que *K. scoparia* es una planta

cuyo crecimiento vegetativo rápido bajo condiciones de salinidad (suelo y agua), la hace muy valiosa como un cultivo de forraje no convencional para las regiones semiáridas. En zonas con aprovechamiento de aguas residuales se recomienda hacer cortes y ensilarlo para la posterior alimentación del ganado.

El frijol yorimon (*Vigna unguiculata* L. Walp) (**Figura 7.1**), también llamado comúnmente frijol caupi, pelón, frijol de castilla, frijol del Perú, arveja de vaca, frijol de vaina o chícharo de vaca, es originario de África y en la actualidad se encuentra ampliamente distribuido desde Estados Unidos hasta Sudamérica. Esta planta es una leguminosa perteneciente a la familia de las *Fabaceae*, se utiliza como buena fuente de proteína pues contiene entre un 19 y un 26 %. Puede ser consumido tanto por humanos (cocinado como cualquier frijol) como por ganado (caprino, bovino, ovino, porcino y en aves de corral), donde se aprovecha casi toda la planta. Se puede sembrar en ambientes de zonas semiáridas hasta subhúmedas (Murillo-Amador *et al.*, 2000). El aumento potencial de su cultivo radica en que es una leguminosa tolerante a la sequía y salinidad (Graham y Vance, 2003).

En zonas con aprovechamiento de aguas residuales se recomienda preferentemente sembrarlo para alimentación del ganado, ensilarlo o bien usarlo en la preparación de harinas para complementar la dieta del ganado. También se puede utilizar para la alimentación humana, ya que el frijol pasa por un proceso de secado, almacenaje, y cocimiento antes de ser consumido, con lo que se elimina cualquier riesgo de salud.

El pasto Taiwan (*Pennisetum purpureum* Schum) (**Figura 7.2**), conocido comúnmente como pasto elefante o maralfalfa, es una gramínea que pertenece a la familia de las *Poaceae*. Es originario de África y fue introducido a América, donde se encuentra ampliamente distribuido en zonas tropicales y subtropicales (Araya y Boschini, 2005). Este pasto se adapta bien a suelos pobres en materia orgánica, y en suelos con texturas desde las franco-arcillosas a franco-arenosas se le puede encontrar sembrado a casi nivel del mar, hasta los 2 200 msnm.

Es un cultivo forrajero, de buena calidad nutricional y muy buena aceptación en la alimentación del ganado por ser un pasto dulce con 12 % de carbohidratos y 17 % de proteína en base seca. Es un pasto que también se ha usado para la producción de biocombustibles. Es un cultivo perenne que forma macollos, cuyos tallos alcanzan hasta 2.5 m de altura. Sus hojas alcanzan 1 m de largo y 4 cm de ancho. El riego de esta planta se puede realizar con aguas limpias o con aguas residuales, sin que esto afecte su productividad. Ramos *et al.* (2012) mencionan que el pasto Taiwan regado con aguas residuales porcinas mejoró su rendimiento. Soto (2003) menciona que se pueden obtener rendimientos de 40 ton/ha/año de materia seca y hasta 120 ton/ha/año de materia verde. En zonas con reúso de aguas residuales se recomienda ensilarlo o

henificarlo para alimentar al ganado o bien venderlo para la producción de biocombustibles.



Figura 7.1 Cultivo de frijol yorimon



Figura 7.2 Pasto Taiwan

Nopal (*Opuntia spp*), comúnmente conocido como nopal, cardón, chumbera, chumbo, chumbua, higo chumbo, higo de pala, higuera de pala, es una planta perenne, originaria de México y pertenece a la familia de las cactáceas. Los nopales se han adaptado perfectamente a zonas áridas, caracterizadas por condiciones secas, lluvia errática y suelos pobres expuestos a la erosión. Los nopales se desarrollan bien en suelos profundos con texturas suaves, incluyendo arenas gruesas, pero la arcilla en condiciones de encharcamiento por drenaje deficiente se considera limitante para su producción. Los nopales toleran valores relativamente altos de pH (hasta 8.5), pero la conductividad eléctrica máxima del suelo no debe exceder los 5-6 mS/cm (Le Houérou, 1992).

El nopal es una planta carnosa y gruesa de formas diversas (**Figura 7.3**), con ramas articuladas; presenta hojas convertidas en espinas, lo cual es un rasgo común en las cactáceas, o bien carece de ellas. Tiene diversos usos, dependiendo de la variedad establecida, algunas son para consumo humano, otras para consumo animal y otras más se usan como insumo de la industria farmacéutica y cosmética.



Figura 7.3 Cultivo de nopal

Su importancia en el sector ganadero radica en que es una fuente de forraje extremadamente útil en temporadas de estiaje porque provee de energía digerible, agua y vitaminas para el ganado bovino, caprino, ovino y porcino. Sin embargo, debe ser combinado con otros alimentos para complementar la dieta diaria, debido a que tiene bajos contenidos de proteína, a pesar de ser rica en carbohidratos y calcio. Nobel (1995) menciona que el nopal es un buen alimento por su eficiencia al convertir el agua en materia seca, y por tanto, en energía digestible. Existen variedades con y sin espinas y en estas últimas se requiere que las espinas sean retiradas o quemadas y picarlo antes de ofrecerlo al ganado.

Cuando se cultiva con fines comerciales, es necesario que la plantación reciba una cantidad de agua de manera controlada para que tenga brotes permanentes durante todo el año. Las nopaleras bien atendidas, plantadas con 2 500 plantas por hectárea, pueden producir arriba de 100 ton/ha (en verde) después del quinto año de plantación. En zonas con aprovechamiento de aguas residuales lo ideal es sembrar variedades para la industria o para forraje de animales. En zonas donde se hayan establecido variedades para forraje se recomienda cortar los cladiolos, eliminar las espinas usando leña o un quemador de gas (lo que también sirve para eliminar patógenos), para posteriormente picarlos y ofrecerlos a los animales, preferentemente en combinación con rastrojos de sorgo o maíz, lo que permite un mejor balance nutricional y de costos y ganancias para los ganaderos.

El zacate salado, también llamado pasto puna o pasto de salitral, cuyo nombre científico es *Distichlis spicata*, es otra halófito con gran potencial de ser utilizado como forraje para ganado, como cultivo para mejorar suelos con problemas de salinidad, o bien para su siembra en zonas con problemas de suelos y aguas salinas (Shahba *et*

al., 2008). El zacate salado pertenece a la familia *Poaceae*, es una planta perenne que forma extensas colonias, suele ser pequeña (hasta 60 cm de alto), presenta espiguillas largas y lateralmente comprimidas. Las flores son muy pequeñas, se encuentran cubiertas por una serie de brácteas y cuya semilla se encuentra fusionada a la pared del fruto y florea durante todo el año (McVaugh, 1983).

La *Distichlis spicata* es originaria de América y se puede encontrar de manera natural o cultivada desde Canadá hasta Argentina (USDA-PLANT Database, 2008). Este pasto puede ser cultivado y regado con aguas residuales; después del corte se puede henificar para posteriormente usarlo como alimento para el ganado. Existen trabajos que indican que el pasto salado utilizado en la preparación de dietas para engorda de ganado ha tenido muy buena aceptación en bovinos o borregos pelibuey (Mellink y Quintanilla, 1979). Sin embargo, dado que el pasto salado es pobre en proteínas (6.4 %) y energía digestible (2.13 Mcal/kg), se recomienda aumentar su digestibilidad tratándolo con gas amonio anhidro (3.5 % en base seca) durante la henificación (28 días y 7 días de aireación posterior antes de su picado o molido para preparar las dietas del ganado) (Linares *et al.*, 1986).

7.1.1.2 Alternativas de cultivos para aprovechar aguas residuales con cierto grado de toxicidad (sodio, cloruro y boro)

La toxicidad en cultivos se presenta cuando el ión tóxico específico presente en el agua de riego se acumula en los tejidos de las plantas produciéndole daños y síntomas visibles. Las aguas residuales pueden contener iones tóxicos como sodio, cloro y boro. La mayor parte de los problemas de toxicidad se asocian con alta salinidad. La respuesta de los cultivos a la toxicidad de iones específicos dependerá de su tolerancia. La toxicidad de los cultivos se observa más cuando se usan sistemas presurizados que cuando se aplica el agua por gravedad, debido a que la toxicidad normalmente se manifiesta en las hojas de las plantas, donde las gotas de los aspersores inciden directamente. Por ejemplo, una concentración de cloro residual Cl_2 inferior a 1.0 mg / L no debería causar daño en las hojas de las plantas, pero concentraciones de 5.0 mg/L sí producen quemaduras.

En las **tablas 6.2** y **6.3** del Apartado 6.2 de este libro se puede consultar un listado de cultivos sensibles a iones específicos. Generalmente los árboles y arbustos ornamentales son sensibles al sodio y a cloruros, mientras que algunas gramíneas como *Festuca Arundinacea*, *Lolium perenne* y *Cynodon dactilon* son forrajes relativamente tolerantes a salinidad y boro.

Las técnicas para el uso seguro de aguas residuales que contengan iones específicos que puedan causar problemas de toxicidad son resultado de una combinación de medidas que permiten reducir los riesgos. Por ejemplo, en caso de presencia de cloro residual, lo mejor es almacenar el agua en un estanque por algunas horas antes de aplicar el riego. Otra medida es aplicar el riego por gravedad o por microaspersión o goteo, de manera que el agua aplicada humedezca solo el bulbo de las raíces y no entre en contacto con el follaje de la planta. Así mismo puede ser útil el mejoramiento del sistema de drenaje de la parcela (natural o artificial) (**figuras 7.4 y 7.5**).



Figura 7.4 Zanjeado para instalar drenaje subterráneo



Figura 7.5 Instalación de un sistema de drenaje subterráneo

Si la aplicación de las medidas mencionadas no resulta suficiente para producir buenas cosechas, lo mejor será cambiar de cultivo por alguno más tolerante al ión tóxico presente en el agua de riego. La clasificación del grado de restricción del agua de riego por iones tóxicos se detalla en la **Tabla 7.1**.

Tabla 7.1 Grado de restricción del agua de riego por iones tóxicos

Toxicidad por iones específicos	Unidades	Grado de restricción en el uso del agua de riego		
		Ninguno	Débil a moderado	Elevado
Sodio (Na) que afecta a cultivos sensibles	TAS* Riego superficial	<3	3-9	>9
	mg/L Riego por aspersión	<70	>70	
Cloruros (Cl) que afectan a cultivos sensibles	mg/L Riego superficial	<140	140-350	>350

Reúso de aguas residuales en la agricultura	7. Condiciones necesarias para reusar las aguas residuales para el riego agrícola
---	---

Toxicidad por iones específicos	Unidades	Grado de restricción en el uso del agua de riego		
		Ninguno	Débil a moderado	Elevado
	mg/L Riego por aspersión	<100	>100	
Cloro residual solo en aspersión elevada	mg/L	<1.0	1-5	>5.0
Boro (B)	mg/L	<0.7	0.7-3.0	>3.0

Fuente: Adaptado del informe de la University of California Committee Consultants (1974) y de Ayers y Wescott (1987)

TAS= Tasa de absorción de sodio

7.1.2 Selección de cultivos considerando los riesgos de salud pública

Los riesgos de salud pública relacionados con productos agrícolas están asociados a la contaminación por patógenos (bacterias y parásitos) presentes en el agua de riego, que causan problemas gastrointestinales. Por lo tanto, dependiendo de la calidad bacteriológica de la fuente de agua utilizada para el riego agrícola, se deberá seleccionar también el cultivo a establecer. La clasificación de riesgos de salud asociados al reúso con aguas residuales son bajo, medio y alto. Esta clasificación va de acuerdo con el tipo de cultivo y su destino, es decir, si es para consumo humano, animal o para industrializar, pero también depende del grupo expuesto (trabajadores agrícolas y consumidores) (**Tabla 7.2**).

Con aguas de baja calidad bacteriológica solo podrán ser regados cultivos que no sean para consumo humano directo, sino indirecto que requieren pasar por un proceso de cocimiento o industrialización como maíz grano, arroz, trigo, etc., y también cultivos forestales para producir madera o materia prima para la industria, cultivos forrajeros de ciclo largo o perennes como la alfalfa (**Figura 7.6**), y otros como los pastos cultivados en praderas, donde no se practique el pastoreo directo del ganado sino que se ensilen o henifiquen antes de su utilización. También se pueden seleccionar cultivos que requieran pasar por un proceso de agroindustrialización como algunas oleaginosas (cártamo, girasol, soya, etc). Observando esta práctica de selección de cultivos se contribuye a reducir los riesgos de salud pública en zonas de reúso de aguas residuales.

Tabla 7.2 Clasificación de riesgos de salud por el uso de aguas residuales; asociados a cultivos y prácticas de manejo

Cultivos /destino	Riesgo bajo/grupo expuesto	Riesgo medio/grupo expuesto	Riesgo alto/grupo expuesto
Frutas que se consumen con cáscara (guayabas, duraznos, peras, manzanas, uvas etc., y hortalizas y verduras de consumo humano en crudo (zanahorias, chiles, cebolla, lechuga, espinaca, tomate rojo, cilantro, perejil, etc.).	Para trabajadores agrícolas que utilizan prendas de protección (botas de plástico, guantes y tapa boca); cuando el cultivo es producido a cielo abierto, sembrado en camas o surcos anchos y regado por sistemas de baja presión (microaspersión o goteo), o bien el cultivo es producido en invernadero, con sistema de riego presurizado automático. Y cuando tanto en cielo abierto como en invernadero se utilizan prácticas de entutorado o acolchado plástico. Y aun cuando en ambos sistemas la cosecha sea manual. Y para consumidores cuando son lavadas antes de ser consumidas en crudo.	Para trabajadores agrícolas que al menos usan botas de plástico, cuando el cultivo es producido en exterior (campo a cielo abierto), con sistema de riego por gravedad, cuando el cultivo se siembra en camas o en surcos anchos, y la planta se desarrolla sobre el lomo del surco o el centro de la cama, si al menos se utiliza alguna práctica como el entutorado o acolchado plástico y la cosecha es manual. Y para consumidores cuando solo son enjuagadas antes de su consumo en crudo.	Para trabajadores agrícolas que no usan ninguna prenda de protección, cuando el cultivo es producido en exterior (campo a cielo), regado por gravedad, sin ninguna práctica que evite el contacto del agua con el producto o fruto. Y la cosecha es manual. Este riego también existe para consumidores que no lavan y no desinfectan los productos y que además los ingieren crudos.
Cereales (arroz) y maíz para consumo como elote, algunas frutas con cáscara (mango, naranjas, mandarinas, melón, sandía, papaya, pepino) y hortalizas que tienen piel gruesa, espinas o se desarrollan en vainas (chayotes, papas, habas, chícharos, entre otras). Y estas se eliminan y cocinan para su consumo, y cultivos forrajeros (alfalfa y pastos).	Para trabajadores agrícolas cuando las labores de preparación del terreno, siembra y cosecha son mecanizadas, y cuando el riego es por aspersión y opera de manera automática. Para consumidores no hay riesgos por que a las frutas se les retira la cáscara, y el elote el arroz y las hortalizas se consumen cocidas.	Para regadores que al menos usan botas de plástico y guantes, cuando el cultivo es producido en exterior (campo a cielo abierto), con sistema de riego por gravedad, cuando el cultivo se siembra en camas o en surcos angostos. Para jornaleros recolectores de elotes, frutas y verduras y para cortadores (de alfalfa y pastos) que solo usan botas de plástico y la cosecha se realiza manualmente.	Para regadores que no usan ninguna prenda de protección, cuando el cultivo es producido en exterior, regado por gravedad, anegando la parcela (arroz y forrajeros), sin ninguna práctica que evite el contacto del agua con el producto o fruto, en el caso de frutas y hortalizas. Para jornaleros que no usan ninguna prenda de protección y que participan en los cortes y en la cosecha del cultivo y esta se realiza en forma manual y aún hay mucha humedad en la parcela (suelo-planta). Para peones que no usan prendas de protección y acarrean la alfalfa o pasto fresco (recién cortado) para darlo a los animales.
Cultivos para la industria (algodón, cítricos, soya, cártamo, canola, aceitunas, alcaparras, elotitos, champiñones, chiles, zanahorias y cebollas, etc.) para enlatarlos o embasarlos	Para trabajadores agrícolas cuando las labores de preparación del terreno, siembra y manejo del cultivo son mecanizadas, y cuando el riego es por aspersión y opera de manera automática. Producidas a cielo abierto o en invernadero. El riego se suprime 2 semanas	Para trabajadores agrícolas que usan algunas prendas de protección como botas de hule y guantes. La producción es a cielo abierto y cuando las labores de preparación del terreno, siembra, manejo del cultivo y la cosecha se realizan manualmente, el riego es por	Para regadores que no usan ninguna prenda de protección, cuando el cultivo es producido en exterior, regado por gravedad, o aspersión (alta presión) sin ninguna práctica que evite el contacto del agua con el producto o fruto y cuando los

Reúso de aguas residuales en la agricultura	7. Condiciones necesarias para reusar las aguas residuales para el riego agrícola
---	---

Cultivos /destino	Riesgo bajo/grupo expuesto	Riesgo medio/grupo expuesto	Riesgo alto/grupo expuesto
	antes de la cosecha y esta es mecanizada. Para consumidores no hay riesgos por que los cultivos pasan por un proceso industrial que elimina riesgos sanitarios.	gravedad y las plantas crecen sobre surcos anchos o camas.	2 últimos riegos no se den con agua de mejor calidad en el caso de frutas y hortalizas. Y cuando no se suprime el riego 2 semanas antes de la cosecha, en el caso de arroz, algodón, soya, cártamo, canola). Para jornaleros que no usan ninguna prenda de protección y que participan en los cortes y en la cosecha del cultivo y esta se realiza en forma manual

Fuente: Elaboración propia



Figura 7.6 Alfalfa para corte y ensilaje

7.1.3 Selección de cultivos considerando las restricciones legales o normativas

México ha legislado sobre los límites de contaminantes que deben contener las aguas residuales que se vierten en aguas y bienes nacionales. La NOM-001-SEMARNAT-1996 establece y define entre otras cosas lo siguiente para aguas residuales que vierten a suelos con fines de riego agrícola (**Tabla 7.3**):

Tabla 7.3 Límites de contaminantes patógenos

Parámetros	Unidad (NMP/100 ml)	
	Promedio mensual (PM)	Promedio diario (PD)
Coliformes fecales (CF)	2 000	1 000
	Unidad huevos de helmintos (HH) / L	
	Riego restringido	Riego no restringido
Huevos de helmintos (HH)	5	1

Fuente: Adaptado de NOM-001-SEMARNAT-1996

En la misma norma se establece una restricción en cuanto a cultivos que es posible regar de acuerdo con la calidad bacteriológica del agua. En este sentido se definen las siguientes restricciones del riego:

- Riego restringido. Se refiere a la utilización de agua residual destinada a la actividad de siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas, excepto legumbres y verduras que se consumen crudas.
- Riego no restringido. Se relaciona con la utilización del agua residual destinada a la actividad de siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas en forma ilimitada como forrajes, granos, frutas, legumbres y verduras.

En todo proyecto de reúso de aguas residuales se debe considerar también el patrón de cultivos que existen en la zona, debido a que dichos cultivos ya están adaptados a las condiciones locales de clima y suelo, además de la experiencia que los productores tienen en su manejo. A partir de ese dato se puede generar la estrategia para el uso seguro de las aguas residuales en la zona, informando a los productores sobre las ventajas y desventajas de continuar con el patrón existente con base en los datos de calidad del agua, de la tolerancia de los cultivos a los elementos que contengan las aguas residuales y con base en los riesgos de salud pública. En este contexto es necesario llegar a consensos con los productores sobre la selección de cultivos más apropiada para la zona de reúso, además de establecer las prácticas de manejo de los cultivos que se requieran para asegurar un adecuado reúso disminuyendo los riesgos de salud.

7.2 Selección del método de riego para el reúso de aguas residuales

En la selección del método de riego se conjuntan una serie de factores que conviene considerar y que van desde el aspecto económico referente al precio del agua (cuota por servicio de riego o costo del bombeo), hasta la exigencia en tecnología, relacionada con los requerimientos del sistema para la distribución del agua en la parcela. En este sentido Pereira y Trout (1999) elaboraron una matriz que considera 13 factores, y que

puede ser de utilidad para apoyar la decisión de los planeadores o de los propios productores a la hora de seleccionar un método de riego (**Tabla 7.4**).

Tabla 7.4 Factores a considerar en la elección del método de riego

Factor	Gravedad	Aspersión	Riego localizado
Precio del agua	Bajo	Medio	Alto
Suministro del agua	Irregular	Regular	Continuo
Disponibilidad del agua	Abundante	Media	Limitada
Pureza	No limitante	Sin sólidos	Elevada
Capacidad de infiltración del suelo	Baja a media	Media a alta	Cualquiera
Capacidad de almacenamiento del suelo	Alta	Media a baja	No limitante
Topografía	Plana y uniforme	Relieve suave	Irregular
Sensibilidad al déficit hídrico	Baja	Moderada	Alta
Valor de la producción	Bajo	Medio	Alto
Costo de la mano de obra	Bajo	Medio	Alto
Costo de la energía	Alto	Bajo	Moderado
Disponibilidad del capital	Baja	Media a alta	Alta
Exigencia en tecnología	Limitada	Media a alta	Elevada

Fuente: Pereira y Trout (1999)

También Lazarova y Bahri (2005, 2008) desarrollaron una matriz que relaciona el método de riego con ciertos factores y medidas especiales para su adecuada selección (**Tabla 7.5**). Hay que recordar que la calidad del agua también juega un papel muy importante en la selección del método de riego. Por ejemplo, el riego por aspersión con agua residual que contiene relativamente altas concentraciones de sodio o iones de cloruro puede causar daño foliar a cultivos sensibles, especialmente donde las condiciones climáticas favorecen la evaporación (zonas donde se presentan altas temperaturas y baja humedad).

Tabla 7.5 Matriz de variables para la selección del método de riego

Método de riego	Factores	Medidas especiales necesarias
Gravedad por inundación	Menor costo. No se requiere nivelación exacta Baja eficiencia en el uso del agua Bajo nivel de protección sanitaria	Rigurosa protección de los trabajadores agrícolas que manipulen agua de riego o cultivos
Gravedad por surcos	Bajo costo. Se puede necesitar nivelación. Baja eficiencia del uso del agua Nivel medio de protección sanitaria	Rigurosa protección de los trabajadores agrícolas que manipulen agua de riego o cultivos
Presurizado por	Costo medio a alto. Eficiencia media	Distancia mínima de 50-100 m desde casas y

Reúso de aguas residuales en la agricultura	7. Condiciones necesarias para reusar las aguas residuales para el riego agrícola
---	---

Método de riego	Factores	Medidas especiales necesarias
aspersión	en el uso del agua. No se requiere nivelación. Bajo nivel de protección sanitaria	caminos Restricción de la calidad del agua (eliminación de agentes patógenos). No se deben usar desechos anaeróbicos, debido a malos olores. Uso de miniaspersores
Presurizado localizado subterráneo y por goteo	Alto costo, alta eficiencia en el uso del agua, mayores rendimientos, mayor nivel de protección sanitaria	No se requieren medidas de protección, restricción de la calidad del agua (requiere filtración para evitar que los dispositivos se obstruyan)

Fuente: Adaptado de Lazarova y Bahri (2005, 2008)

Un daño similar a los cultivos se presentará cuando el agua residual con altos niveles de cloro residual (>5 mg / L) sea asperjado directamente sobre las hojas de los cultivos (World Health Organization, 2006). Asimismo, el riego por aspersión con aguas residuales que contienen sales en concentraciones importantes aumentará los problemas de infiltración en el suelo, debido a la alta probabilidad de formación de costras superficiales. Los sistemas de riego por goteo y superficiales suministrados por aguas residuales producirán menos alteración física en los suelos.

Otra consideración no menos importante antes de seleccionar el método de riego será determinar si existe la tecnología disponible en el país, así como los materiales e insumos del sistema de riego, ya que esto influye en los costos y por lo tanto en las inversiones requeridas. El sistema de riego elegido se debe adaptar al tipo de cultivo que se va a regar, a la topografía del terreno, a la clase de suelos, a la calidad del agua y a la disponibilidad del recurso (que tiene que ver con la eficacia de aplicación de los sistemas). En este sentido resulta de mucha utilidad considerar algunas condicionantes de utilización como las que se detallan en la **Tabla 7.6**.

Tabla 7.6 Condicionantes para sistemas de riego con agua residual

Sistema de riego	Cultivos	Topografía	Permeabilidad del suelo	Calidad del agua requerida y cantidad de agua demandada	Eficiencia de aplicación en %
Riego por aspersión					
Portátil	Árboles frutales, forrajes, cereales, forrajes (pastos y alfalfas)	Terrenos con desnivel máximo de 20 %	2.5 mm/h	De buena calidad fisicoquímica (baja salinidad y baja toxicidad)	Alta 70-80
Móviles con desplazamiento lateral	Oleaginosas y gramíneas y cultivos forrajeros cuya altura no exceda 90 cm	Terrenos con desnivel máximo de 15 %			
Pivote central	Cereales, oleaginosas y cultivos		Mínima de 7.5 mm/h	Demanda moderada	

Sistema de riego	Cultivos	Topografía	Permeabilidad del suelo	Calidad del agua requerida y cantidad de agua demandada	Eficiencia de aplicación en %
Riego por aspersión					
	forrajeros. No se recomienda para riego de árboles				
Cañón de riego	Cultivos forrajeros, granos y cereales				
Fijos (micro-aspersión o goteo)	Árboles frutales, leguminosas, oleaginosas, hortalizas	Sin restricción		De buena calidad fisicoquímica y bacteriológica Baja demanda	
Riego por gravedad					
Melgas o surcos	Viñedos, cereales y cultivos forrajeros	Terrenos con desnivel máximo de 7 % con un desnivel transversal de 0.2 %			
Melgas o surcos anchos	Cereales, oleaginosas, leguminosas y cultivos forrajeros	Desnivel máximo de 1.0 % con un desnivel transversal de 0.2 %	Mínima de 2.5 mm/h y máxima de 150 mm/h	De buena calidad fisicoquímica (baja salinidad y baja toxicidad) Alta demanda	Baja 55-65

Finalmente, otro punto importante que deberá tomarse en cuenta en la selección del método de riego serán las condiciones de mercado, ya que, en muchos países, se consideran aspectos de inocuidad alimentaria, que tienen que ver entre otras cosas con la calidad sanitaria del producto. El método de riego influirá al permitir o evitar el contacto del agua con los frutos o productos. Los factores analizados en la **Tabla 7.7** también pueden ayudar en la selección del método de riego, según las condiciones de la zona de reúso, el cultivo de interés y las observaciones de los autores.

Tabla 7.7 Guía para la selección del método de riego

Método de riego	Topografía	Cultivos	Observaciones
Melgas o franjas anchas	Pendientes que pueden ser ajustadas a menos del 1 % y preferiblemente al 0.2 %	Alfalfa y otros cultivos de raíz profunda y frutales	Ideal para regar cultivos densos donde la topografía es favorable, en terrenos planos se requiere una pendiente uniforme en la dirección del riego, siendo más convenientes con pendientes arriba del 0.5 %, los cambios de pendiente deberán ser ligeros y se deberán evitar las contrapendientes y las transversales.
Melgas o franjas angostas	Pendientes que pueden ser ajustadas al 4 % o menos y preferiblemente de menos del 1 %	Pastos	Adaptados a suelos superficiales, sobre una capa endurecida de arcilla o suelos de baja infiltración, son deseables las pendientes uniformes en dirección del riego, los cambios severos en la pendiente y contrapendiente deberán ser suavizados, la pendiente transversal es permisible cuando se limita a una diferencia de elevación entre bordos de 6 a 9 cm.
Surcos transversales	Pendientes que pueden ser ajustadas a 0.2 % o menos	Frutales	Este método es aconsejable para tener una buena distribución y penetración del agua, sobre todo en suelos con baja capacidad de infiltración.
Corrugaciones	Tierras cuyas pendientes deben ser ajustadas del 0.5 al 12 %	Alfalfa, pastos y cereales	Este método se adapta a terrenos con pendiente y pequeños caudales de riego, es conveniente pero no esencial una pendiente uniforme en la dirección del riego, los cambios bruscos en pendientes, deberán ser corregidos, debido a la tendencia a obstruirse de las corrugaciones, desbordar y causar erosión, deberán evitarse las pendientes transversales, lo más posible.
Surcos en contorno	Terrenos con pendiente variable del 2 % al 25 %	Cultivos en hileras y frutales	Adaptado a cultivos en hileras con fuerte pendiente, aunque presentan riesgo de erosión debido a fuertes lluvias, la pendiente en la dirección del riego debe ser del 0.5 al 1.5 %. No hace falta corregir más allá de rellenar las zanjas y remover protuberancias abruptas.
Zanjas a nivel o en contorno	Pendientes irregulares hasta 12 %	Pastos y cereales	Especialmente adaptados a pie de colinas, así mismo requiere poca o ninguna nivelación de la superficie.
Diques rectangulares	Terrenos con pendientes	Frutales	Especialmente adaptado a suelos con alta o baja infiltración, pueden requerir considerable movimiento de suelo.
Diques en contorno a nivel	Terrenos ligeramente irregulares con pendientes menores a 1 %	Frutales, arroz, cereales, y cultivos forrajeros	Reduce la necesidad de movimiento del suelo, empleando frecuentemente para evitar la nivelación, mejor adaptado a suelos de alta o baja infiltración.
Tubería portátil	Pendientes irregulares hasta 12 %	Pastos y cereales	Adaptado a cultivos forrajeros, requiere poco o ningún movimiento de suelo.
Riego subterráneo	Pendiente cercana a cero	Cultivos de raíces poco profundas, como papas y algunos pastos	Requiere un nivel freático elevado, condiciones muy permeables del subsuelo, y una nivelación precisa. Muy pocas áreas están adaptadas a este método.
Terrazas de escalones en curvas de nivel	Terrenos con pendientes hasta del 35 %	Cualquier cultivo	Considerable pérdida de terrenos debido a la formación de las terrazas, requiere costosas estructuras de caída de agua para evitar la erosión.
Riego subterráneo con tuberías	Pendientes del 0 al 1.0 %	Cualquier cultivo, cultivos en hileras y de alto valor	Requiere la instalación de tubería plástica perforada en la zona de raíces a espaciamientos estrechos, existen algunas dificultades cuando las raíces se insertan en las perforaciones, no se pueden corregir espaciamientos tan fácilmente, se requieren pruebas de campo sobre los diferentes suelos.
Micro riego (goteo y microaspersión)	Cualquier pendiente, apta para cultivos en	Frutales y cultivos en hilera	Se requiere tubería perforada en la superficie del suelo la cual gotea agua, en la base de las plantas o árboles, ha sido

Reúso de aguas residuales en la agricultura	7. Condiciones necesarias para reusar las aguas residuales para el riego agrícola
---	---

Método de riego	Topografía	Cultivos	Observaciones
	hileras y frutales		usada con éxito en agua salina, y con alta frecuencia de riego, en condiciones en que la salinidad del agua en el suelo es similar a la de riego.

Fuente: Hargreaves y Merkle (2000)

7.2.1 Método de riego por gravedad en surcos y melgas

Este método en surcos (**Figura 7.7**) y melgas (**Figura 7.8**), también conocido como riego de superficie, es el más ampliamente utilizado, pues representa la opción más económica y conocida por los usuarios del riego. En este método, con sus variantes de surcos y melgas, el productor aprovecha la topografía del terreno para conducir el agua, usando solo la fuerza de gravedad para que llegue desde la cabecera hasta el final del surco o de la melga. Se puede utilizar en casi todos los tipos de textura de suelos y en todos los cultivos. En el caso del reúso de aguas residuales, este método de riego deberá ir acompañado de prácticas muy específicas de manejo del suelo y del cultivo con el fin de evitar el contacto entre el agua y los frutos o productos obtenidos.



Figura 7.7 Riego rodado por gravedad en surcos



Figura 7.8 Riego rodado por gravedad en melgas

La principal ventaja cuando se reúsa agua residual estriba en que se puede usar agua proveniente de tratamiento primario, secundario y secundario avanzado, donde la única diferencia será el tipo de cultivos a regar y los requerimientos de calidad sanitaria en función del destino de los productos, si son para agroindustria, para consumo animal o para consumo humano. Otra ventaja del uso de este método es que no requiere de mano de obra calificada para distribuir el agua, por lo que se puede emplear a gente del lugar para que realice las labores de riego, las cuales son principalmente permitir que el agua ingrese de la toma granja a la parcela y estar al pendiente de los tiempos de cambio del agua de una tabla de riego a otra (una tabla integra un grupo de surcos o

melgas, cuyo número dependerá del gasto de agua asignado en el diseño del riego y del gasto con que se cuente para el riego).

En este sistema también se pueden utilizar sifones para permitir que el agua entre del canal de riego parcelario hacia cada uno de los surcos o melgas en la parcela (**Figura 7.9**). Otra ventaja del uso de este método de riego es que el avance del agua no es sensible a variaciones del viento.



Figura 7.9 Riego aplicado por gravedad en surcos mediante sifones

Las principales desventajas de usar este método donde se reúsa agua residual es que tanto el trabajador de campo como el cultivo entran en contacto con el agua y por lo tanto se incrementa el riesgo de salud pública. Otra desventaja es la cantidad de agua que se requiere aplicar, pues parte de esta se pierde por infiltración y por evaporación, y solo una parte es aprovechada por los cultivos, por lo que la eficiencia de aplicación del agua con este método oscila entre el 40 y el 70 %.

Una desventaja más de este método es que, si los suelos no han sido nivelados, se favorece la erosión del suelo, generada por el avance del agua que arrastra a su paso parte de la capa superficial del terreno. Además, las sales presentes en el agua residual se van acumulando en el perfil del suelo y en su superficie, por lo que se requerirá efectuar riegos de lavado de sales al final de cada temporada de producción o se deberá dejar la parcela en descanso para que el agua de lluvia elimine las sales. Por otro lado, las plantas siempre se deberán establecer en el lomo del surco o en el medio de la melga, a fin de reducir los daños por sales presentes en el agua. La última desventaja de usar este método es que los surcos o melgas deberán estar cerrados con el objetivo de evitar escurrimientos (coleos) hacia otras parcelas o que los escurrimientos lleguen hacia cauces cercanos propiciando su contaminación.

7.2.2 Método de riego presurizado

El método de riego presurizado, también llamado riego localizado, resulta muy preciso y de alta frecuencia. Se denomina presurizado porque mediante una bomba, el agua se impulsa a través de tubos o mangueras, generándose una presión más alta que la presión atmosférica, lo que permite que el agua salga impulsando los emisores que entregan el agua en forma de gotas cuando el sistema es de goteo o de micropartículas que semejan lluvia en el caso de los aspersores o microaspersores.



Figura 7.10 Riego presurizado por aspersión



Figura 7.11 Sistema de riego con microaspersión en huerta de naranja



Figura 7.12 Sistema de riego por goteo en cultivo de girasol

La principal ventaja de este método es que permite una mejor distribución del agua y mejora su eficiencia de aplicación de entre un 75 a 95 %. Además, existen datos que indican que se ahorra en mano de obra hasta tres cuartas partes de lo que

normalmente requiere un método de riego por gravedad. Una ventaja también importante de este método es que sus variantes (aspersión (**Figura 7.10**), microaspersión (**Figura 7.11**) y goteo (**Figura 7.12**), se adaptan perfectamente para cumplir con la calidad sanitaria de los productos regados con aguas residuales, según su destino final.

Por ejemplo, en cultivos destinados a la agroindustria como pueden ser granos, cereales u oleaginosas que necesitan ser procesados antes de su consumo, y también en praderas de pastos u otros cultivos forrajeros de corte o para ensilaje para alimentación de ganado, o en cultivos industriales como la caña de azúcar, se puede utilizar sin problema el riego por aspersión en sus modalidades de alta presión como puede ser pivote central o avances frontales.

En cultivos que sean delicados o de consumo humano en crudo, como uvas, tomates, chiles, u otros de porte medio y bajo, así como en huertas de frutales, se recomienda utilizar riego por goteo. Otra ventaja es que a través de estos métodos se pueden aprovechar pequeños caudales y llevarlos hasta el cultivo sin pérdida por infiltración o evaporación, lo cual ocurre en el riego por gravedad. Además, se pueden aplicar los fertilizantes en la misma agua de riego, lo que representa un ahorro en mano de obra por este concepto.

Las principales desventajas de usar estos métodos cuando se reúsan aguas residuales son que se requiere una elevada inversión inicial pues se deberá considerar la construcción de un pequeño estanque que permita regular y garantizar un volumen de agua constante y que también sirva para que los sólidos en suspensión que aún traiga el agua se sedimenten. Además se debe invertir en el propio sistema de riego, que normalmente se destina a la compra de la bomba, los filtros (que pueden ser de arena, malla o de anillas), los tubos o mangueras y los emisores.

Otra de las desventajas de usar este método es que el agua debe provenir idealmente de un sistema de tratamiento secundario, y sin embargo aun así se requerirá de filtros para evitar obstrucciones en los componentes del sistema presurizado (generadas por sales y otros minerales disueltos que traen las aguas residuales tratadas). Los filtros requieren de un mantenimiento frecuente y ello eleva los costos de producción.

7.3 Prácticas de preparación de terrenos y manejo del cultivo

Existen prácticas de manejo de cultivos que evitan el contacto entre el agua de riego y el producto de interés y que son recomendadas para zonas de aprovechamiento de aguas residuales.

7.3.1 Prácticas de manejo de cultivos

Esta práctica de preparación del terreno para siembra se recomienda para cultivos de porte alto como maíz, trigo, sorgo, caña, etc., y en cultivos que requieran pasar por un proceso de industrialización o cocimiento previo a su consumo como soya, cártamo, algodón y frijol (**Figura 7.13**), entre otros. Consiste en sembrar la semilla sobre el lomo del surco formando una sola hilera, de tal forma que el agua de riego aplicada por gravedad fluya en el fondo del surco y por capilaridad alcance las raíces de las plantas.



Figura 7.13 Cultivo de frijol sembrado en surcos anchos

Los surcos se forman en la última fase de preparación del terreno para la colocación de las semillas en seco o el trasplante de plántulas en húmedo. Los surcos tendrán un ancho de 40 cm y 30 cm de altura, en tanto que el largo dependerá del tamaño del terreno, aunque lo recomendado es que no sobrepasen de 250 a 300m de largo. Es muy importante que se formen los surcos cerrados, para evitar que el agua residual usada en el riego contamine otras parcelas o cause daños contaminando cauces de agua cercanos.

Se recomienda también que a esta forma de siembra se adicionen técnicas de manejo del cultivo, que pueden ser el uso de entutorado para guiar el desarrollo de las hortalizas de vaina como ejotes, chícharos o habas, o bien, cuando se trate de hortalizas como la calabacita, la berenjena, el pepino, el tomate de cáscara, chiles y chayotes, entre otros. También se recomienda que se use el acolchado plástico cuando se siembren cultivos como melón, sandía, col o repollo (blanca o morada), coles de

bruselas, coliflor, brócoli, etc., ya que forma una barrera que evita que el producto de interés se mantenga sin contacto con el agua de riego, ayuda en el control de las malezas, mejora la eficiencia del riego, mantiene por más tiempo la humedad del suelo y por supuesto se obtiene una mejor calidad sanitaria de las cosechas.

7.3.2 Siembra en camas

Mediante esta práctica de preparación del terreno se busca que los cultivos se siembren colocando las semillas en hilera simple o doble (**Figura 7.14**), establecidas en el centro o en el borde de las camas, de manera que se desarrollen cubriendo la parte plana de la cama y que el agua de riego se aplique en el fondo entre cama y cama, penetrando de forma vertical y lateral, subiendo por capilaridad hacia la zona de raíces de la planta, con esta técnica en zonas con aprovechamiento de aguas residuales tratadas se reduce el riesgo de contaminación del cultivo por el contacto con el agua de riego.



Figura 7.14 Siembra de frijol ejotero en camas con acolchado

Las camas de siembra generalmente se forman en la última fase de preparación del terreno para la colocación de las semillas en seco o el trasplante de plántulas en húmedo. Las camas tienen un ancho variable dependiendo del cultivo a establecer, pero en general se forman con un ancho que va desde 0.6m, 1 m y hasta 2 m y de 0.30 a 0.40 m de altura, en tanto que el largo dependerá del tamaño del terreno o del sistema de riego utilizado, aunque lo recomendado es que no sobrepasen de 250 a 300 m de largo.

Para la formación de las camas con maquinaria, se utiliza una cultivadora o un rotocultor con cuchillas, el formador de camas tiene paneles planos de metal que frotan contra la parte superior y los lados de las camas, labrando la superficie del suelo lo suficiente para alterar la germinación de malas hierbas. Con algunas máquinas

agrícolas el suelo se levanta y forma la cama en una sola operación, en otras, primero se levanta el suelo con discos o discos dobles y en otra operación se compacta el suelo a una altura uniforme utilizando una alomadora.

También se recomienda que a esta forma de siembra se adicionan técnicas de manejo del cultivo, que pueden ser el uso de entutorado o el acolchado plástico, con lo que se puede aprovechar mejor el espacio productivo, se controlan mejor las malezas, se mejora la eficiencia del riego, y por supuesto, se obtiene una mucho mejor calidad sanitaria de los cultivos sembrados en estas zonas de reúso.

7.3.3 Uso de acolchados plásticos

Para aplicar esta práctica se usan películas plásticas de polietileno de baja densidad lineal (PEBDL), polietileno de baja densidad (PEBD), copolímero de acetato de vinilo (EVA) y policloruro de vinilo (PVC), cuyas características y usos se detallan en la **Tabla 7.8**. El material más utilizado para los acolchados actualmente es el PEBDL, que representa menor cantidad por unidad de superficie (kg/m^2) y menor costo. El uso de los acolchados se recomienda preferentemente para cultivos como melones, fresa, sandía, espárrago, pero también se usa en el cultivo de algodón. Con esta técnica se busca un mejor aprovechamiento de la humedad en el suelo y mejor calidad sanitaria del cultivo, al reducirse el contacto entre el agua de riego y los frutos.

Tabla 7.8 Características de los acolchados plásticos y sus usos

Cultivo	Espesor de la película	Vida útil	Cantidad requerida (kg/ha)
Melón, sandía, algodón	25-40 μm	<1 año	100-120
Fresa	30-50 μm	<1 año	135-140
Espárrago	>50 μm	1 a 3 años	350
El ancho de las películas va de los 0.75 a 1.50 m, medida que se debe considerar en la preparación de los surcos o camas de siembra.			
El precio de las películas plásticas es de alrededor de 1.3 euros/kg			

Fuente: Elaborado con datos de OMM/Premia (2006)

El acolchado plástico puede ser utilizado para cubrir total o parcialmente el campo (**figuras 7.15** y **7.16**). En la mayoría de los casos donde el riego se realiza aprovechando aguas residuales, el cubrimiento del terreno es parcial, es decir, solo se cubre el surco, camellón o cama de cultivo. La película plástica se sujeta al terreno enterrando sus bordes 10 cm en el suelo, por lo que se deberán considerar estos 20 cm más en el largo de la película que se corte para cubrir todo el surco o la cama de siembra.



Figura 7.15 Preparación de terreno con acolchado plástico



Figura 7.16 Otro tipo de acolchado plástico

Lo recomendable para zonas con reúso de aguas residuales es que la siembra o trasplante de plántulas se realice una vez que se tiene el terreno acolchado (**Figura 7.17**), de esta forma solo se requiere hacer unas pequeñas perforaciones en el centro del surco o cama de siembra para colocar la semillas o plántulas. Así, el cultivo se desarrollará sin contacto directo con el agua de riego que se aplicará al fondo del surco o cama.



Figura 7.17 Cultivo de chile con uso de acolchado plástico

La técnica del acolchado plástico solo se recomienda en suelos con buen drenaje, de lo contrario la alta humedad del suelo que se mantendrá por debajo de la tela plástica podría provocar asfixia radicular o pudriciones en la parte inicial del tallo de la planta. Se debe remarcar que los acolchados plásticos solo son recomendables cuando el agua residual proviene de un tratamiento secundario y que el riego se aplique mediante sistemas de gravedad o con sistema de riego por goteo.

Existe también una técnica llamada acolchado para solarización, donde se utilizan películas de polietileno monocapa tipo térmico o multicapa y copolímero de acetato de

vinilo (EVA). Estas películas plásticas ayudan a controlar los patógenos que existen en el suelo o que hayan ingresado por el agua de riego. Consiste en colocar plástico transparente sobre el suelo húmedo (recientemente regado), donde el efecto termoaislante del material plástico utilizado que se recomienda sea de 40-50 μm ., el tiempo que debe actuar dependerá de la temperatura que se considera letal para cada patógeno y la profundidad que se desea alcanzar.

Sin embargo esta técnica se utiliza para control de bacterias pero no es útil en el control de nematodos, ya que estos se movilizan a capas más profundas cuando la temperatura del suelo se incrementa en la superficie. Esta técnica se ha utilizado preferentemente para desinfectar suelos previos al trasplante o la siembra, es decir, la película plástica es utilizada solo 1 mes, que es el tiempo necesario para realizar una buena desinfección previa al establecimiento del cultivo.

7.3.4 Entutorado o envarado

La práctica del uso de entutorado es muy útil cuando se aprovecha el agua residual para el riego agrícola, ya que con ello se evita el contacto entre el agua de riego y el producto o fruto de interés, lo que favorece mejor calidad sanitaria de las cosechas. El entutorado consiste en guiar verticalmente a través de un amarre el tallo principal de la planta con ayuda de un “tutor”, que suele ser en cultivos a cielo abierto, una vara, estaca o caña, unidas según el tipo de estructura con hilo o cuerda (**Figura 7.18**) y en el caso de los invernaderos la estructura más utilizada para entutorar es una malla sostenida por estructuras fijas o desmontables (**Figura 7.19**).

Existen distintos tipos de entutorado, pero en todos se busca que el tutor guíe el desarrollo de la planta, sirviéndole como sostén y evitando que el fruto entre en contacto con el agua de riego o con el suelo. Las estructuras típicas de entutorado de cultivos agrícolas son:

- El amarre simple, que guía el tallo de una planta a una estaca o caña, se utiliza en cultivos como tomate, rojo, tomate verde, chiles, berenjenas, etc.
- El encajonado, que une las estacas, varas o cañas con hilo o alambre para darle mayor estabilidad, se usa en cultivos como: uva, chayote, calabacitas, pepinos, berenjenas, etc.
- La estructura de tijera o tienda de indios, donde las varas o cañas se unen en forma de V invertida, aquí la planta se fija con hilo o cuerda no abrasiva, para guiar su desarrollo vertical; se usa mucho en cultivos de ejote, tomates, calabacitas, moras y zarzamoras, etc.
- El colgado, que fija estructuras verticales en el inicio de la cabecera del surco o melga y en su extremo final, ambas unidas por otra estructura horizontal, de

donde se cuelgan hilos o cuerdas que sostienen el tallo principal de las plantas para guiar su desarrollo, se usa en cultivos de invernadero como: tomates, pepinos, pimientos, fresas o frutillas, etc.

En la actualidad también se comercializan materiales como mallas que sirven para entutorar plantas que se cultivan en invernadero. Son reciclables, es decir, sirven para más de un ciclo agrícola, sin embargo tienen el inconveniente de ser mucho más costosas.



Figura 7.18 Uso de entutorado en parcela a cielo abierto



Figura 7.19 Uso de entutorado en invernadero

7.4 Manejo del agua de riego para reducción de riesgos de salud

Es necesario recordar que cuando se trata de reusar aguas residuales para el riego agrícola, un punto muy importante es manejar la aplicación del riego en la parcela, con el objetivo de evitar el contacto del agua con los frutos de los cultivos, lo que sin duda permitirá obtener una mejor calidad sanitaria de los productos de cosecha.

7.4.1 Riego alterno

El manejo de la aplicación del agua residual mediante el riego alterno surgió como una necesidad a las formas de conservación del agua en riego por gravedad y como alternativa para afrontar los periodos de escasez de agua e incrementar la eficiencia en su uso, ya que cuando las plantas son pequeñas sus requerimientos de riego son bajos por lo que la aplicación del agua mediante el riego alterno resulta ventajosa. Este manejo del agua se adapta adecuadamente a suelos con texturas que van de francas a arcillosas.

En general en el riego por surcos alternos (figuras 7.20 y 7.21), en condiciones normales de disponibilidad hídrica, el agua se aplica dejando un surco sin regar durante el primer riego de auxilio, en el segundo riego el agua se aplica en el surco no regado. En el tercer riego de auxilio, que coincide con la floración o jiloteo, se riegan todos los surcos; y en el cuarto riego de auxilio se continúa la alternancia como al inicio. El riego en surcos alternos no es recomendable en terrenos con pendientes fuertes, debido a la reducida superficie de mojado que genera baja infiltración en el suelo; tampoco se recomienda en suelos con baja permeabilidad, al requerir mayores tiempos de riego para tener un buen mojado lateral de los surcos.



Figura 7.20 Primer riego en surco alterno



Figura 7.21 Cultivo de maíz regado bajo la modalidad de surco alterno

En zonas con aprovechamiento de aguas residuales para riego agrícola, se ha usado el riego en surco alterno, básicamente para utilizar el suelo como medio filtrante de los contaminantes presentes en el agua residual, y para aprovechar más eficientemente los pocos volúmenes tratados disponibles; si a lo anterior se agrega la restricción de

cultivos correspondiente y la colocación adecuada de la semilla en el lomo del surco, se propicia la reducción del contacto entre los frutos de la planta y el agua de riego; todo lo cual constituye una excelente técnica de manejo de aguas tratadas en riego agrícola.

7.4.2 Supresión del último riego antes de la cosecha

La combinación de prácticas de manejo del cultivo y prácticas de manejo del agua, son muy importantes cuando se establecen proyectos de reúso de aguas residuales, esto en función del tiempo de supervivencia de algunos patógenos tanto en suelos, cultivos y agua. En la **Tabla 7.9** se puede observar un concentrado de información, sobre la supervivencia de distintos patógenos, generada por diversos autores.

Tabla 7.9 Tiempo (en días) de supervivencia de patógenos en suelo, agua y cultivos

Pátogeno	Suelos		Cultivo		Agua	
	Máximo	Común	Máximo	Común	Máximo	Común
Bacterias	365	20-70	180	2-30	60	10-30
Virus	180	20-100	60	15-60	120	50
Protozoarios ¹⁾	20	2-10		1-5	153	15-30
Helmintos ²⁾	7 años	2 años		30	Varios meses	Varios meses

¹Quistes, ²Huevos o cigotos

Fuente: Elaborado con datos de Orta (1985), Shuval *et al.*, (1986) y D'itri *et al.* (1981)

Dado que en muchos estudios se ha demostrado que la humedad del suelo donde se han aplicado aguas residuales para el riego está relacionada con la población de patógenos, es muy importante considerar prácticas que permitan disminuir la humedad del suelo previo a las acciones de la cosecha. Esto se logra suprimiendo el riego cuando menos 2 semanas antes de la cosecha, ya que con esta práctica los patógenos presentes tanto en la capa superficial del suelo como en las partes de las plantas más próximas al suelo, presentan muerte por desecación.

Lo anterior puede complementarse con exposición al sol y al viento de los productos cosechados que lo permitan, ya que esto juega un papel importante en el mejoramiento de la calidad sanitaria de los productos obtenidos de zonas con riego de aguas residuales. Esta sencilla práctica de manejo del agua y de manejo de los tiempos previo a la cosecha, representan buenas medidas de reducción de riesgos de enfermedades, tanto para los jornaleros agrícolas que participan en la cosecha, como para los consumidores de los productos agrícolas provenientes de zonas con reúso.

Sin embargo, esta práctica de supresión del último riego 2 semanas antes de la cosecha, se adapta solo a cultivos de porte alto como la caña de azúcar (**Figura 7.22**), así como a cultivos de granos que se comercialicen en seco, como ejemplo se pueden mencionar al maíz, arroz, trigo, sorgo, etc. En las hortalizas cuyas características agronómicas no les permiten resistir tanto sin agua, una práctica que se ha observado entre los agricultores es el cambio de fuente de agua de riego, es decir, producen con agua residual y 2 semanas antes de la cosecha, suprimen el riego con aguas residuales, e implementan riegos con agua de pozo. Hacen falta estudios para constatar que con esta práctica se mejora la calidad sanitaria de las hortalizas antes de comercializarlas.



Figura 7.22 Caña de azúcar con supresión del riego antes de la cosecha

“La adecuada integración de proyectos de reúso y la observancia de medidas para reducir riesgos de salud, son condicionantes para reúsar aguas residuales para agricultura

**Integración de proyectos de reúso y
estrategias para reducción de riesgos de
salud**

8

Capítulo 8

INTEGRACIÓN DE PROYECTOS DE REÚSO Y ESTRATEGIAS PARA REDUCCIÓN DE RIESGOS DE SALUD

8.1 Bases de los proyectos de reúso

La integración de los proyectos de reúso de las aguas residuales tratadas para agricultura debe considerar las bases generales indicadas en la **Figura 8.1**.



Figura 8.1 Bases generales para proyectos de reúso en agricultura

El documento que se genere deberá proporcionar información y un análisis detallado sobre los siguientes aspectos: la ubicación específica del proyecto, la delimitación de la

superficie a regarse con aguas residuales, el número de beneficiarios, el diagnóstico de la calidad del agua a reúsar, el tipo de suelos donde se aplicará, el tipo y cantidad de infraestructura de tratamiento, volumen de agua tratada, análisis agronómico y económico del patrón de cultivos a establecer.

Además debe tenerse en cuenta la elaboración de escenarios de acuerdo a las condiciones existentes y las inversiones necesarias para ejecutar el proyecto (que de manera general consistirán en las adecuaciones para conducir el agua del efluente tratado a la zona de reúso), para adquirir equipo para mejorar la calidad del agua de reúso (rayos ultravioleta, u otro) o en su defecto para adecuar la infraestructura existente para aprovechar las aguas residuales que se generen por las poblaciones asentadas en la zona de interés). Toda esta información (**Figura 8.2**) proveerá el sustento técnico y la justificación a los usuarios del reúso, a fin de solicitar apoyos económicos para ejecutar el proyecto.

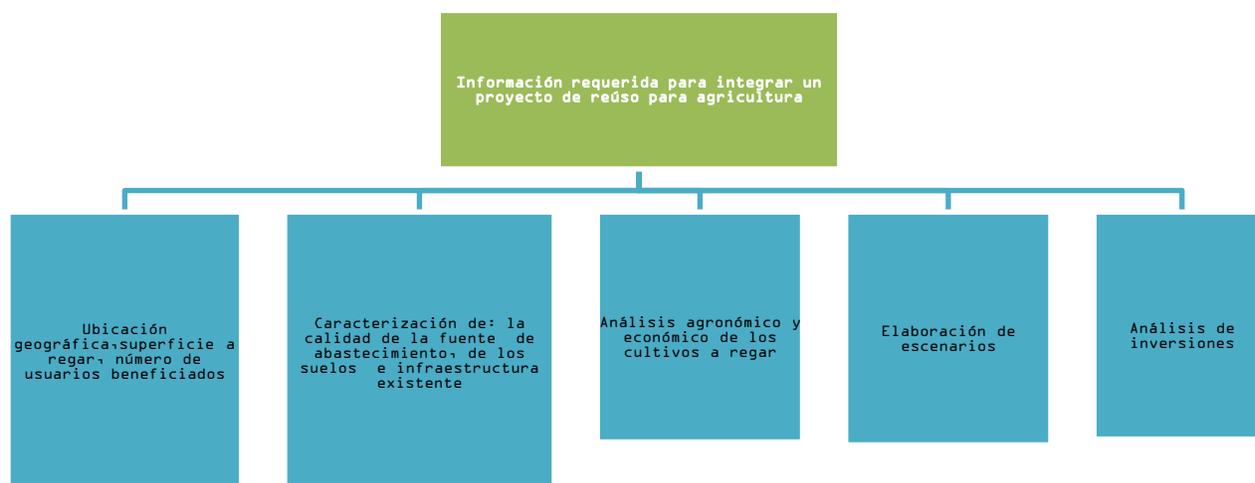


Figura 8.2 Esquema de información requerida para integrar proyectos de reúso

8.2 Estrategias para reducir riesgos de salud en zonas con reúso

Debido a que los trabajadores agrícolas (**Figura 8.3**) constituyen el primer eslabón de riesgo en las zonas con reúso de aguas residuales, las recomendaciones que se esbozarán en este apartado corresponden al uso de prendas de protección, a la higiene que deben observar durante su jornada laboral y después de ella; así como recomendaciones generales para preservar su salud y la de sus familias.



Figura 8.3 Regadores, primer eslabón de riesgo por el reúso de aguas residuales

Es importante recordar que en zonas con reúso de aguas residuales siempre existirá un riesgo de contraer enfermedades entre los grupos expuestos (**Tabla 8.1**).

Tabla 8.1 Riesgos a la salud por grupo expuesto al contacto con las aguas residuales en zonas de reúso

Grupo expuesto	Riesgos a la salud		
	Infeción por Parásitos (Helmintos)	Infecciones por bacterias y virus	Infecciones por protozoos
<p><i>Consumidores de productos agrícolas contaminados</i> Los niños y adultos mayores, son el grupo más vulnerable, sobre todo cuando los productos han estado en contacto con el agua de riego como sucede frecuentemente cuando el riego es por gravedad.</p>	<p><i>Parasitosis por lombrices</i> La enfermedad más común que afecta a los humanos es la Ascariasis.</p>	<p><i>Infecciones gastrointestinales</i> (leves, severas o agudas), que se contraen al consumir productos o bebidas contaminados.</p>	<p>Infecciones por Amibas y Giardias Se contraen al consumir alimentos contaminados. La vía más común de contagio se ha dado por el consumo de verduras crudas, que han sido regadas con aguas residuales.</p>
<p><i>Agricultores y sus Familias</i> Los regadores y niños son el grupo más vulnerable. Principalmente cuando entran en contacto con el agua de riego, sin las prendas de protección adecuadas (botas, guantes y tapabocas).</p>	<p>Esta enfermedad se produce al consumir productos o bebidas contaminados con huevecillos de áscaris, que es común encontrarlos en las aguas residuales.</p>	<p>Las enfermedades más comunes son el Cólera, la Fiebre tifoidea y la Shigellosis.</p>	<p>Las enfermedades más comunes que se presentan en humanos son: la Amebiasis y la Giardiasis.</p>
<p><i>Población de comunidades cercanas</i> Los niños y adultos mayores son el grupo más vulnerable, sobre todo cuando en la zona de riego existe riego por aspersión que a través del viento puede diseminar el agua residual, contaminando alimentos o agua de bebida.</p>	<p>Esta enfermedad puede no presentar síntomas en el corto plazo, pero a medida que avanza se pueden presentar dolor de estómago, fiebre baja e incluso se pueden expulsar lombrices por las heces.</p>	<p>Uno de los síntomas característicos de estas enfermedades son las diarreas con cólicos abdominales, vómitos y deshidratación.</p>	<p>Los síntomas se pueden presentar entre los 7 a 28 días del contagio, y pueden abarcar dolor abdominal, diarrea y pérdida de peso.</p>

Fuente: Elaboración propia, con datos de las Guías OMS (2006), y complementado con información médica sobre las principales enfermedades gastrointestinales.

8.2.1 Uso de prendas de protección

En virtud del riesgo que existe al manipular aguas residuales, y contraer enfermedades de la piel, enfermedades gastrointestinales y de otro tipo; se recomienda que todos los trabajadores agrícolas que entren en contacto con el agua de riego y con los cultivos o productos de la cosecha, utilicen ropa de protección, lo que sin duda reducirá enormemente el riesgo de contraer enfermedades. Las prendas de protección que se recomienda para regadores son:

- *Uso de botas de hule* que protegerán sus pies y evitarán el contacto con el agua y el suelo, donde pueden estar presentes larvas de lombrices como *Acylostoma duodenale* y *Necator americano*, que son capaces de atravesar la piel desnuda de los pies no protegidos, causando en principio dermatitis cutánea y en estados avanzados anquilostomiasis, cuyos síntomas son debilidad y anemia entre otros. Una variante al uso de botas de hule puede ser el uso de las botas-pantalón (**Figura 8.4**) que además de proteger los pies, evitan que todo el torso bajo del cuerpo entre en contacto con el agua o roce con los cultivos de porte bajo y medio.
- *Uso de mascarillas* (para partículas), que protegerá boca y nariz de las micropartículas contaminadas y de los gases que desprenden las aguas residuales al ser manejadas para encauzarlas hacia las parcelas. Además, mediante su uso, se evita que el trabajador pueda llevar residuos de tierra con sus manos al área de la boca o nariz y que de esta forma ingresen al organismo causando enfermedades. El uso de la mascarilla también protegerá a los trabajadores que participen de las labores culturales de parcelas regadas con aguas residuales, donde las labores propias del trabajo generan polvos. Observar esta práctica también disminuirá riesgos de contraer enfermedades de las vías respiratorias.
- *Uso de guantes de látex* (para trabajo pesado o industrial), para proteger las manos durante la manipulación del agua de reúso o suelo donde se encuentra establecido el cultivo o las compuertas, para distribuir el agua en la parcela. El uso de los guantes resulta muy útil para evitar el contacto de las manos con el agua y el suelo y para evitar que se acumulen residuos de tierra bajo las uñas,

con lo que se reduce el riesgo de contraer enfermedades principalmente de tipo dérmico y gastrointestinal.

- *Vestimenta de trabajo.* Se recomienda que la vestimenta habitual de trabajo sea de algodón y de colores claros (como camisola de manga larga, pantalón y gorra o sombrero o cualquier otro accesorio que proteja del sol), que por ser fresca, hace más llevadero el uso de las prendas de protección que deberá portar el regador durante su jornada de trabajo.

Nota importante: al final de la jornada laboral las botas y los guantes deberán ser lavados con agua limpia, antes de quitárselos, para evitar la autocontaminación.

Las prendas de protección que se recomienda para otros trabajadores agrícolas que participen de labores culturales o de la cosecha de productos, son básicamente las mismas que para regadores, solo que cumplen funciones adicionales y el material de que estén hechos puede variar:

- *Uso de botas de hule o cuero,* para proteger los pies del contacto con el suelo húmedo, la tierra suelta o el polvo, donde pueden estar presentes diversos patógenos provenientes de las aguas residuales; la función adicional de las botas son brindar protección de la picadura de algún animal.
- *Uso de mascarillas* (para partículas), para proteger boca y nariz, del polvo y de residuos de tierra que podrían contener patógenos provenientes de las aguas residuales, adicionalmente esta prenda protege el área de nariz y boca, a fin de evitar que sean tocadas con las manos conteniendo residuos de plantas o frutos que pudieran estar contaminados.
- *Uso de guantes de látex* (para trabajo pesado), que protegen manos durante la manipulación de malezas, cultivos o frutos de cosecha que pudieran estar contaminados por elementos contenidos en las aguas residuales.
- Los trabajadores que participen de la labor de preparación, mezcla o aplicación de plaguicidas no deberán usar guantes de cuero o tela, pues estos absorben los plaguicidas, por lo que se recomienda en este caso los hechos de materia como el neopreno ligero o nitrilo.
- *Vestimenta de trabajo,* se recomienda que sea de algodón (por ejemplo, camisola de manga larga, pantalón y gorra o sombrero), que es fresca y permite realizar con comodidad labores en el campo, además es de fácil lavado. En el caso de trabajadores que participen de la preparación, mezcla y aplicación de plaguicidas se recomienda que sobre su vestimenta se coloquen un traje de protección completo (overol con capucha).

Nota importante: Las botas y los guantes deberán ser lavados con agua limpia al final de la jornada laboral, antes de quitárselos, para evitar la autocontaminación.



Figura 8.4 Uso de prendas de protección en un regador donde se reúsan aguas residuales para el riego agrícola

8.2.2 Higiene durante la jornada de trabajo y después de ella

Partiendo de que existe una responsabilidad personal de mantener la salud, se esbozan de manera general las prácticas de higiene que deberán observar los trabajadores agrícolas, durante la jornada de trabajo, que tienen que ver con:

- El uso adecuado de las prendas de protección durante la jornada laboral
- No ingerir alimentos o bebidas durante las labores dentro de la parcela
- Lavarse las manos con agua limpia y jabón durante su receso para tomar alimentos o bebidas fuera de la parcela

Se recomiendan las siguientes prácticas de higiene que deberán observar los trabajadores agrícolas después de la jornada de trabajo:

- Bañarse diariamente (usando agua limpia y jabón), para quitarse cualquier residuo que se hubiera adherido a su ropa o cuerpo durante su labor en la parcela

- Cambio de ropa por prendas limpias y secas
- No almacenar ropa sucia de trabajo que pueda ser manipulada por niños o animales, contaminándose de esta forma e incrementando los riesgos de contraer alguna enfermedad
- Lavado de ropa de trabajo (usando agua limpia y jabón), y de preferencia secarla al sol
- Mantener limpias y recortadas las uñas
- Revisarse minuciosamente y en su caso tratar cualquier lesión
- Cumplir con su programa de desparasitación (al menos 2 veces al año)
- Acudir al servicio médico en caso de presentar síntomas de cualquier enfermedad

8.2.3 Recomendaciones generales para preservar la salud de las familias

Las familias de los trabajadores agrícolas constituyen el segundo eslabón en la cadena de riesgos asociados al reúso de las aguas residuales en la agricultura, derivado del contacto que existe entre el trabajador expuesto directamente, los aperos de trabajo que traslada del campo a su hogar, de la ropa de trabajo que requiere ser lavada en casa, así como de productos agrícolas producidos en la zona para integrarlos a su dieta. Por lo que las recomendaciones generales sobre higiene se deben extender a toda la familia a fin de preservar su salud. Las principales prácticas de higiene que deberán observar las familias tienen que ver con:

- Aseo personal diario, poniendo énfasis en el lavado de manos antes de preparar o consumir alimentos o bebidas
- Lavado, desinfección o cocido de alimentos provenientes de los campos de labor, antes de ser consumidos
- Participar del lavado de ropa de trabajo para evitar que se acumule ropa sucia que contenga residuos que pongan en riesgo la salud de la familia
- Mantener fuera de la vivienda cualquier apero o herramienta de trabajo que se use en los campos agrícolas y manteniéndolos fuera del alcance de niños o animales
- Cumplir con el programa familiar de desparasitación (al menos 2 veces al año)

8.2.4 Recomendaciones generales para mejorar la calidad sanitaria de los productos de consumo

Los consumidores constituyen el último eslabón en la cadena de riesgos asociados al reúso de aguas residuales tratadas para riego agrícola, por lo cual en este apartado se esbozarán algunas recomendaciones generales de higiene que deberán observar los

consumidores a fin de mejorar la calidad sanitaria de los productos provenientes de zonas agrícolas con reúso.



Figura 8.5 Compra de productos agrícolas en los mercados

En virtud de que los productos agrícolas que llegan a la mayoría de los mercados o centros de abasto (**Figura 8.5**), carecen de una etiqueta que especifique el lugar de procedencia y mucho menos se puede saber con certeza que calidad de agua fue usada en el riego agrícola, se cierne sobre la población un riesgo de salud, asociado al consumo de alimentos. Por ello es muy importante que el consumidor esté consciente de los riesgos de enfermedades de tipo gastrointestinal que están asociadas al riego con aguas residuales en cultivos agrícolas y tome medidas que coadyuven a preservar la salud propia y de sus familias. Las principales medidas de higiene que deberán observar los consumidores se relacionan con:

- Descartar cualquier vegetal, tubérculo o fruta que presente rajaduras
- Lavar con agua limpia y desinfectar o pelar productos vegetales, hortalizas o frutas que se vayan a consumir en crudo
- Lavar con agua limpia y jabón y también pelar tubérculos o raíces que vayan a usarse en jugos (por ejemplo, zanahorias, betabel, etc.)
- Enjuagar con agua limpia y cocinar adecuadamente cualquier producto de origen agrícola que sea comprado en fresco (habas, chícharos, papas, chayotes, berenjenas, camotes, etc.)

- Solo guardar productos lavados o desinfectados si no van a ser consumidos de inmediato
- Cumplir con un programa familiar de desparasitación (al menos 2 veces al año)



Figura 8.6 Lavado y pelado de vegetales

Glosario

9

9 GLOSARIO

Aguas de reúso. Aguas residuales que han sido tratadas y que cumplen con calidad para su reutilización en diversas actividades productivas, entre ellas la agricultura de riego.

Agricultura de riego con aguas residuales. Cultivo de la tierra con aplicación de agua de riego proveniente de un efluente tratado que le permite al productor rural obtener algún beneficio económico o satisfactor en especie.

Acolchado plástico. Es una técnica empleada en agricultura en la que se usa una película de polietileno sobre los surcos o camas de siembra con el objetivo de reducir la evaporación del agua de riego, controlar malezas, aumentar la temperatura del suelo y acelerar la cosecha, reducir la erosión y evitar el contacto entre el agua de riego y el cultivo, lo que redundará en una mejor calidad sanitaria de los productos agrícolas.

Calidad del agua. Se refiere a la condición del agua en función de las características fisicoquímicas y bacteriológicas que guarda dependiendo de su origen, del uso a que se destinó y del reúso que se le pretenda dar. Desde la perspectiva de su gestión, la calidad del agua se define por su uso final. Es un factor que determina la salud de los ecosistemas y el bienestar humano; de ella depende en parte la biodiversidad, la calidad de los alimentos obtenidos y el desarrollo de actividades económicas en lugares marginados. Influye en la pobreza o riqueza de una zona o región económica.

Calidad sanitaria de productos. Condición de los productos agrícolas de estar libres de elementos nocivos principalmente para sus consumidores.

Coliformes fecales, Es un grupo de bacterias que tiene ciertas características bioquímicas en común y que resultan de gran importancia como indicadores de contaminación del agua y de los alimentos. El término coliforme viene de la bacteria principal de este grupo que es la *Escherichia coli*, de origen fecal. Se utilizan como indicadores de contaminación bacteriológica del agua residual de riego.

Descartar. Es el acto consciente de desechar, rechazar, o excluir algún producto por la presunción fundada de estar contaminado o por representar riesgos de salud para los consumidores.

Desparasitación. Tratamiento que los médicos recomiendan para eliminar parásitos en humanos que han estado expuestos a productos contaminados.

Divulgación de riesgos. Término que se aplica al acto de dar a conocer al público, a través de material informativo de cualquier tipo, sobre la probabilidad de ocurrencia de daño o perjuicio en virtud del reúso con aguas residuales en el riego agrícola.

Entutorado de cultivos. Es una técnica de manejo del cultivo que consiste en colocar líneas guía compuestas de palos, cañas o estacas, además de cuerdas u otro material, en la proximidad de las plantas para que estas se apoyen en ellas y crezcan en dirección vertical. Se utiliza para mantener las plantas erguidas, evitando el contacto de los frutos con el suelo y el agua de riego. Su uso más común es en cultivos hortícolas y en vid.

Ensilar. Proceso de conservación del forraje cortado basado en una fermentación anaerobia controlada, por un lapso de tiempo establecido, antes de dar el forraje al ganado.

Eslabón de riesgo. Pieza o elemento necesario en la sucesión de hechos de ocurrencia de daño o perjuicio por el aprovechamiento de las aguas residuales en el riego agrícola. Los principales eslabones de riesgo son los trabajadores agrícolas y los consumidores de productos provenientes de las zonas de reúso

Forestación. Actividad que se ocupa de gestionar la práctica de las plantaciones de árboles con fines medioambientales o comerciales regadas, en este caso específico, con aguas residuales.

Grasas y aceites. Lípidos residuales contaminantes del agua que se pueden presentar en el agua de reúso en estado sólido o líquido y que poseen diversas estructuras químicas, y que cuando sobrepasan los límites establecidos por la normatividad vigente, pueden causar daños a los suelos donde se apliquen para el riego.

Henificar. Es el proceso por el cual un forraje cortado se convierte en verde, en un producto que puede ser almacenado de forma segura, lo que disminuye las pérdidas de materia seca y nutrientes. Se basa en almacenar los forrajes reduciendo su humedad de un 70 a 90 %, que es el porcentaje con que entran al silo, hasta reducirla a 20 o 25 %.

Huevos de helmintos. El huevo constituye la etapa contagiosa de los parásitos de helminto (gusanos llamados lombrices), que son excretados por las heces y que contaminan las aguas, el suelo o los alimentos y que pueden parasitar a los humanos o animales. Se utilizan generalmente como indicadores de contaminación bacteriológica del agua de reúso.

Lavado de sales. Medida de mejoramiento de suelos para combatir la salinización de terrenos agrícolas de riego, que consiste en aplicar una lámina de sobreriego para desplazar las sales a estratos inferiores a la zona de raíces.

Manto freático. Agua de infiltración en el suelo que se ubica a poca profundidad; también es llamada capa freática o tabla de agua y corresponde a la zona saturada del suelo donde los huecos o poros entre los granos de tierra se llenan de agua. Una

aportación excesiva de agua (riego o lluvia), puede elevar el manto freático hacia la zona de raíces. El movimiento ascendente del nivel freático es una de las causas de problemas de salinización de terrenos con riego.

Malezas. Son plantas indeseables que crecen como organismos macroscópicos junto con las plantas cultivadas, interfiriendo en su desarrollo y productividad.

Melga. Porción generalmente rectangular de terreno utilizada para la siembra de cultivos, limitada por bordos o canales y donde generalmente el agua de riego se aplica por inundación.

Monitoreo de calidad del agua. Es una herramienta fundamental en el manejo de las aguas residuales de reúso. Consiste en el muestreo sistemático de toma de muestras de agua de riego y acciones para su análisis, bajo un procedimiento metodológico y técnicas seleccionadas, que tienen como objetivo determinar y controlar la calidad del agua de reúso en un punto, una zona o un sitio de interés.

Nivelación del suelo. Es la tarea que consiste en obtener una pendiente uniforme del terreno, eliminando los altos o bajos. Dicha pendiente debe ser no erosiva y permitir el movimiento del agua de riego para una distribución uniforme, de manera que favorezca una reducción de la cantidad de agua a aplicar en las parcelas agrícolas.

NOM-001-SEMARNAT-1996. Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Patógenos. Microorganismos (bacterias, virus, protozoos y helmintos) que pueden estar presentes en las aguas de reúso y causar daño o enfermedades a través de la ingesta de productos contaminados.

Permeabilidad del suelo. Es la propiedad que tienen los suelos agrícolas, de permitir la infiltración del agua y el aire. El concepto permeabilidad puede recibir también las acepciones de conductividad o transmisividad hidráulica, dependiendo del contexto en el cual sea empleado.

Población expuesta. Grupo o conglomerado de personas que son susceptibles de padecer una enfermedad al entrar en contacto con algún contaminante presente en las aguas de reúso o ingerir algún producto contaminado con ellas.

Plantas halófitas. El término halófita se refiere a plantas tolerantes a las sales presentes en la solución del suelo. No existe una definición universalmente aceptada de ese término, sin embargo, se usa para clasificar a las plantas que crecen en ambientes con suelos salinos y que presentan tolerancia a la salinidad.

Patrón de cultivos. Conjunto de cultivos que se establecen de forma tradicional en determinados ciclos agrícolas en una zona específica.

Prácticas de higiene. Son los hábitos, cuidados, prácticas, acciones o técnicas que se realizan de manera personal o en grupo, tendientes a conservar la salud o prevenir enfermedades.

Prácticas de manejo del cultivo. Son las acciones específicas que se toman para proteger al cultivo o sus frutos, buscando que tenga una calidad sanitaria óptima para no poner en riesgo a los consumidores.

Prendas de protección. Es el equipo que debe portar el trabajador agrícola durante toda su jornada laboral y que lo protege de la exposición a contaminantes presentes en el agua residual de reúso o en los cultivos regados con esta.

Restricciones. Limitaciones o reducciones, naturales o impuestas, según corresponda. El concepto se utiliza para marcar un límite en cuanto a la calidad del agua de riego según el tipo de cultivos.

Riesgos de salud. Exposición de un individuo o grupo de individuos a ciertos contaminantes, lo que aumenta su probabilidad de sufrir una enfermedad.

Riego de gravedad. Es el método de riego más antiguo, que utiliza las pendientes naturales o artificiales del terreno y la fuerza de gravedad para aplicar y distribuir el agua de riego en una parcela.

Riego presurizado. Es un método de riego moderno, que incluye el riego por aspersión en sus distintas modalidades y el riego por goteo. Utiliza tuberías, mangueras o cintilla, a través de las cuales se conduce el agua de riego a una presión por encima de la presión atmosférica, lo que permite accionar los aspersores o goteros.

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

Riego no restringido. La utilización del agua residual destinada a la actividad de siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas en forma ilimitada, es decir, agua con calidad para riego de forrajes, granos, frutas, legumbres y verduras.

Salinización de terrenos. Es un fenómeno que se presenta en mayor medida en zonas agrícolas ubicadas en zonas áridas y semiáridas, donde se ve favorecido por el tipo de suelo, altas temperaturas y tasas de evaporación, así como por la presencia de drenaje deficiente y mantos freáticos someros, mala práctica del riego y uso de aguas de riego de mala calidad fisicoquímica.

SEMARNAT. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales que se encarga de impulsar la protección, restauración y conservación de los ecosistemas y recursos naturales y bienes y servicios ambientales con el objetivo de propiciar su aprovechamiento y desarrollo sustentable.

Sólidos disueltos totales (TDS o STD). Es la cantidad total de sólidos disueltos en el agua. Es una medida de la presencia en el agua de sustancias orgánicas e inorgánicas en forma molecular, ionizada o microgranular. Los SDT se utilizan como un indicador de la contaminación química o concentración de sales en el agua.

Surco. Canal pequeño de tierra que se hace con un arado para conducir el agua en el riego por gravedad.

Referencias

10

REFERENCIAS

- Aguilar, E., Aparicio, J. y Gutiérrez, L.A. (2007) Sistema de drenaje principal de la Ciudad de México. Gaceta del IMTA. [En línea] <<http://www.imta.gob.mx/gaceta/anteriores/g04-08-2007/sistema-drenaje-mexico.html>> [Consultado el 06 de junio de 2016].
- Antelo, J. (2001) Uso de aguas residuales, una alternativa para riego agrícola, en el Distrito de Riego 052, Estado de Durango. En: *XI Congreso Nacional de Irrigación*. Guanajuato, México, Septiembre 19-21 de 2001.
- Araya, M. y Boschini, F. (2005) Producción de forraje y calidad nutricional de variedades de *Pennisetum purpureum* en la Meseta Central de Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 16(1) pp. 37-43.
- Ayers, R.S. y Westcot, D.W. (1987) La calidad del agua en la agricultura. *Estudio FAO: Riego y Drenaje* 29, Rev. 1. Roma: Food and Agriculture Organization.
- Baeza, R., Segura, M.L., Contreras, J.I., Eymar, E., García, C., Moreno, J. y Suárez, F. (2012) *Gestión Sostenible de la Reutilización de aguas residuales urbanas en los cultivos hortícolas*. Almería: Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera. Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente.
- Boletín Oficial del Estado (2007) Real Decreto/620/2007, de 07 de diciembre. Régimen Jurídico de la Reutilización de las aguas depuradas. Boletín Oficial de Estado No. 249/08/12/2007.
- Bonilla y Fernández, M.N., Ayala, A.I., González, S., Santamaría, J.D. y Silva, S.E. (2015) Calidad fisicoquímica del agua del D.R. 030 "Valsequillo" para riego agrícola. *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*, 3.
- Braatz, S. y Kandiah, A. (1996) Utilización de aguas residuales urbanas para el riego de árboles y bosques. En: F. Serván, ed. *FAO-Unasylva-No. 185*. Disponible en: <www.fao.org/docrep/w0312s/w0312s09.htm> [Consultado el 05 de julio de 2016].
- Brega Filho, D. y Mancuso, P.C.S. (2003) Conceito de reúso de água. En: P.C.S. Mancuso y H.F. dos Santos, eds. *Reúso de Água*. São Paulo: Universidad de São Paulo. Cap. 2.
- Campos, C., Oron, G., Salgot, M. y Gillerman, L. (2000) Behaviour of the fecal pollution indicators in a soil irrigated with treated wastewater under onsurface and subsurface drip irrigation. *Water science and technology*, 42(1), pp. 75-79.
- Cisneros, O.X., Zatarain, F., González, J., Pulido, Madrigal, L. y Díaz, J.A. (2008) *Diagnóstico del uso de las aguas residuales en la agricultura en México*. Jiutepec: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

- Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (2005) *Estudio de Factibilidad para el manejo integral del Agua en la Zona del Valle de Juárez y en la zona urbana de Ciudad Juárez*. Ciudad Juárez: Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza.
- CONAGUA. (2015) Estadísticas del Agua en México.
- Comisión Nacional del Agua (2014) *Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía*. México: Consejo de Cuenca Río Balsas.
- D'itri, F.M. (1981) *Municipal Wastewater in Agriculture*. Nueva York: Academic Press.
- Sistema de Aguas de la Ciudad de México (2012) *El Gran Reto del Agua en la Ciudad de México. Pasado, Presente y Prospectivas de Solución para una de las Ciudades más complejas*. [En línea] Disponible en: <www.islaurbana.mx/contenido/biblioteca/investigaciones/aguadf/SACM2013elGranRetodelAguaenlaciudaddeMéxico.pdf> [Consultado el 22 de julio de 2016].
- Fasciolo, G. (2001) Reuso de Efluentes para Riego. *Memorias del Seminario Cuyano de Ecología, Ambiente y Salud*. Mendoza, Argentina.
- Gaona Quesada, R. (2013) *Factibilidad Económica para el aprovechamiento de Aguas Tratadas de PTAR Atapaneo en Módulos II al IV del D.R. 020 Morelia-Queréndano, utilizando un SIG*. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados.
- García, J. (2010) *Experiencias en prácticas de manejo de aguas servidas para la producción agrícola a pequeña escala. Recomendaciones de políticas públicas en el ámbito local*. Santiago de Chile: Alfabeta Artes Gráficas.
- Garduño, H., Reta, J., Cantú, Suárez, M., Jaeger, P. y Vidal, A.M. (2003) Administración del Derecho de Agua. Experiencias, asuntos relevantes y lineamientos. *FAO: Estudio Legislativo*, 81. Roma: Food and Agriculture Organization.
- Gobierno de España-Ministerio de Economía. (2010) *Ejemplos prácticos de reutilización de agua residual tratada y regenerada para el riego de cultivos. Evaluación de Riesgos*. Consolider Tragua.
- Graham, P.H. y Vance, C.P. (2003) Legumes: Importance and constraints to greater use. *Plant Physiology*, 131(3), pp. 872-877.
- IMTA-CONAGUA (2007) *Formulación del Plan Director para la Modernización Integral del Riego del Distrito de Riego 052*. Estado de Durango.
- Jáquez, S.V. (2014) *Estudio del Impacto Socio-Ambiental, causado por el uso de plaguicidas en zonas agrícolas del Valle de Guadiana, Durango*. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional.
- Jami Al-Ahmadi, M. y Kafi, M. (2006) Salinity effects on germination properties of *Kochia scoparia*. *Asian Journal of Plant Sciencies*, 5(1), pp. 71-76.
- Kanarek, A. y Michail, M. (1996) Groundwater recharge with municipal effluent: Dan region reclamation project, Israel. *Journal of Water Science and Technology*, 34(11), pp. 227-233.

- Labrador, J. (2003) La materia orgánica, base de la fertilización en agricultura ecológica. En: J. de las Heras, Ibáñez, C. Fabeiro, Cortés y R. Meco, Murillo, eds. (2003) *Fundamentos de agricultura ecológica: realidad y perspectivas*. Universidad de Castilla-La Mancha. Pp. 109-134.
- Lazarova, V. y Bahri, A. (2008) Water reuse practices for agriculture En: B. Jimenez y T. Asano eds. (2008) *Water Reuse: An International Survey of current practice, issues and needs*. Londres: IWA Publishing. Cap. 10.
- Lazarova, V. y Bahri, A. (2004) *Water Reuse for Irrigation: Agriculture, Landscapes, and Turf Grass*. Nueva York: CRC Press.
- Le Houérou, H.N. (1992) The role of Opuntia cacti in the agricultural development of the mediterranean arid zones. *Segundo Congreso Internacional de Tuna y Cochinilla*. Santiago, Chile, 22-25 Septiembre de 1992.
- Linares, O.J.P., Monroy, V.A. y Melgarejo, L.V. (1986) *Evaluación de la paja de pasto salado (Distichlis spicata), tratado con amonio en la engorda de bovinos*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Maciel, L.H., Robles, F.J., Zamarripa, J.M., Jiménez, C.A., Domínguez, R.F., Cortés, M.A., Baltazar, E. y Macías, L.M. (2009) Modernización Integral del Distrito de Riego 001 Pabellón Aguascalientes. México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Mara D.D. y Cairncross, S. (1990) *Directrices para el uso sin riesgos de aguas residuales y excretas en agricultura y acuicultura: Medidas de protección a la salud pública*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.
- McVaugh, R. (1983) Gramineae. En W. Anderson ed. *Flora Novo Galiciana. A descriptive account of the vascular plants of Western Mexico*. Ann Arbor: The University of Michigan Press. Vol. 14.
- Mastrantonio, A. (2006) *Reuso agrícolas de efluentes industriales y cloacales: efectos en la calidad del agua y suelo*. Organización de Estados Iberoamericanos.
- Mellink, B.E. y Quintanilla, A.N. (1979) *Valor nutritivo del zacate salado (Distichlis spicata. L. Greene) producido en el ex-lago de Texcoco*. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Chapingo.
- México en el tiempo (1999) Del desagüe del Valle de México al drenaje profundo. *México en el tiempo*. [En línea] Disponible en: <www.mexicodesconocido.com.mx/del-desague-del-valle-de-mexico-al-desague-profundo.html> [Consultado el 06 de junio de 2016].
- Moreno, L., Fernández, M.A., Rubio, J.C., Calaforra, J.M., López, J.A., Beas, J., Alcaín, G., Murillo, J.M. y Gómez, J.A. (2003) *La depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

- Murillo-Amador, B., López-Aguilar, R., García-Hernández, J.L., Nieto-Garibay, A., Troyo-Dieguéz, E. Ávila-Serrano, N., Espinoza-Villavicencio, J.L., Ortega-Pérez, R., Palacios-Espinosa, A., Plascencia Jorquera, A. (2009) Cultivos alternativos para zonas áridas. En: *Ciencia y Tecnología e Innovación para el desarrollo. Biotecnología y Ciencias Agropecuarias*. Año 1, Núm. 21.
- Murillo-Amador, B., Troyo-Dieguéz, E., García-Hernández, J.L., Landa-Hernández, L. y Larrinaga-Mayoral, J.A. (2000) El frijol yorimón leguminosa tolerante a sequía y salinidad. La Paz, BCS, México. Editorial Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste SC.
- Nobel, P.S. (1995) Environmental biology. En: G. Barbera, P. Inglese y E. Pimienta, Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*. Roma: Food and Agriculture Organization. Pp. 36-48.
- OMM/Premia (2006) Agroplasticultura y Riego Localizado. *Agroplasticultura y Riego Localizado*. Sin publicar.
- Orcutt, D.M. y Nielsen, E.T. (2000) *Physiology of Plant Under Stress: Soil and Biotic Factors*. John Wiley & Sons.
- Orta, L.T. (1985) *Criterios para el aprovechamiento de aguas residuales en México*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pereira, L.S. y Trout, T.J. (1999) Irrigation methods. En: H.N. van Lier, L.S. Pereira y F.R. Steiner, eds. *CIGR-handbook of agricultural engineering. Vol. I: Land and water engineering*. American Society of Agricultural Engineers. Pp. 297-379.
- Pérez, Nieto, S., Martínez, Elizondo, R., Nieto, Angel, R., Scotch, M.A., Horna, Fernández, N. y Renteria, Delmar, G. (2001) Efecto de las aguas residuales en la Calidad y Rendimiento en Calabacita en Chiconautla, México. *XI Congreso Nacional de Irrigación*. Guanajuato, México, Septiembre 19-21 de 2001.
- Pescot, M.B. (1992) Wastewater treatment and use in agriculture. *FAO Irrigation and Drainage*, 47. Roma: Food and Agriculture Organization.
- Quipuzco, Ushñahua, L.E. (2004) Valoración de las aguas residuales en Israel como un recurso agrícola: consideraciones a tomar en cuenta para la gestión del agua en Perú. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG*, 7(13), pp. 64-72.
- Rembio (2015) *Red Mexicana de Bioenergía A.C. Biocombustibles Líquidos*. [En línea] Disponible en: <www.rembio.org.mx> [Consultado el 15 de abril de 2015].
- Riasi, A., Danesh, Mesgaran, M., Stern, M.D. y Ruiz, Moreno, M.J. (2008) Chemical composition, in situ ruminal degradability and post-ruminal disappearance of dry matter and crude protein from the halophytic plants *Kochia scoparia*, *Atriplex dimorphostegia*, *Suaeda arcuate* and *Gamanthus gamacarpus*. *Animal Feed Science and Technology*, 141(s 3-4), pp. 209-219.
- Shahba, M.A., Quian, Y.L. y Lair, K.D. (2008) Improving seed germination of saltgrass under saline conditions. *Crop Science*, 48, pp. 756-762.

- Shuterland J., Cooley J., Neary D., Urie D. (1974) Irrigation of trees and crops with sewage stabilization pond effluents in southern Michigan. EPA. 660/2-74-041.
- Silva J., Torres P. y Madera, C. (2008) Reúso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una Revisión. *Agronomía Colombiana*, 26(2), pp. 347-359.
- Soto, Y. (2003) *Antecedentes de investigaciones en pastos y forrajes*. Santo Domingo: Centro Nacional de Investigaciones Pecuarias (CENIP), Secretaría de Estado de Agricultura.
- Toral, C.O., Iglesias, J.M., Montes de Oca S., Sotolongo, J.A., García, S. y Torsti, M. (2008) *Jatropha curca* L., una especie arbórea con potencial energético en Cuba. *Pastos y Forraje*, 31(3).
- USDA-PLANT Database (2008) *Plant Detail: Distichlis spicata*. [En línea] Disponible en: <<http://www.evergreen.ca/nativeplants/search/view-plant.php?ID=01368>> [Consultado el 14 de abril de 2015].
- World Health Organization (2006) *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Vol. 2: Wastewater use in agriculture*. Ginebra: World Health Organization.
- World Health Organization (2006) *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Vol. 1: Policy and regulatory aspects*. Ginebra: World Health Organization.



www.gob.mx/imta