



SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL DE PROGRAMACIÓN
GERENCIA DE ESTUDIOS PARA EL DESARROLLO
HIDRAULICO INTEGRAL

PERSPECTIVA DE APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS
RESIDUALES EN LA AGRICULTURA

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA
COORDINACIÓN DE TECNOLOGIA, DE RIESGO Y DRENAJE
SUBCOORDINACIÓN DE CONTAMINACIÓN Y DRENAJE AGRICOLA

Diciembre de 2001



Clasif. P
2241

C.B. 43978

Proced. DONACION

Fecha 07.05.04



**SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
GERENCIA DE ESTUDIOS PARA EL DESARROLLO
HIDRÁULICO INTEGRAL**



**PERSPECTIVA DE APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS
RESIDUALES EN LA AGRICULTURA**

**INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
COORDINACIÓN DE TECNOLOGÍA DE RIEGO Y DRENAJE
SUBCOORDINACIÓN DE CONTAMINACIÓN Y DRENAJE AGRÍCOLA**

Diciembre de 2001



**INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
CENTRO DE CONSULTA DEL AGUA**

PERSPECTIVA DE APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LA AGRICULTURA

**M. C. Olga Xochitl Cisneros Estrada
M. S. Jorge González Meraz
Dr. Carlos Fuentes Ruiz**

Diciembre de 2001

DIRECTORIO

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Director General

Ing. Cristóbal Jaime Jaquez

Subdirector General de Programación

Ing. Cesar Herrera Toledo

Gerente de Estudios para el Desarrollo Hidráulico Integral

Dr. Gustavo A. Paz Soldán Córdova

Subgerente de Integración de Programas de Proyectos Hidroagrícolas

Ing. Mario Villarreal Pulido

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

Director General

Dr. Alvaro A. Aldama Rodríguez

Coordinador de Tecnología de Riego y Drenaje

Dr. Benjamín de León Mojarro

Subcoordinador de Contaminación y Drenaje Agrícola

Dr. Carlos Fuentes Ruiz

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE LÁMINAS	v
RESUMEN EJECUTIVO	vi
Introducción	1
1. Generalidades.....	2
2. Diagnóstico de la calidad del agua en la cuenca	3
3. Caracterización de asentamientos humanos.....	3
4. Generación de aguas residuales municipales e infraestructura de tratamiento existente	3
5. Caracterización de los suelos	5
6. Determinación del patrón de cultivos.....	7
7. Correlación de información e implementación de propuestas de desarrollo	7
8. Estudio de caso. La cuenca del Río Fuerte.....	9
8.1 Generalidades de la cuenca del Río Fuerte	10
8.2 Diagnóstico de calidad del agua de la cuenca del Río Fuerte	10
8.3 Caracterización de los asentamientos humanos en la cuenca del Río Fuerte	11
8.4 Generación de aguas residuales municipales e infraestructura de tratamiento existente	13
8.4.1 Aguas residuales municipales	13
8.4.2 Aguas residuales industriales	14
8.4.3 Infraestructura para tratar aguas residuales municipales	14
8.4.4 Volúmenes proyectados de aguas residuales municipales	15
8.5 Caracterización de los suelos	16
8.6 Determinación del patrón de cultivos	18
8.7 Correlación de la información y propuestas de desarrollo	20
8.8 Escenarios para el aprovechamiento de las aguas residuales municipales en la cuenca del Río Fuerte	20
8.8.1 Tratamiento biológico convencional para riego agrícola	21
8.8.2 Tratamiento combinado para riego agrícola y acuicultura	23
8.8.3 Tratamiento con humedales para poblaciones menores a 10,000 habitantes	24
9. Conclusiones	28
ANEXO 1	29
1. Antecedentes sobre el uso de las aguas residuales en México	30
1.1 Desarrollo Histórico del riego en el Valle del Mezquital.....	30
1.2 Programas para el aprovechamiento de las aguas residuales.....	30
1.3 Riego con aguas residuales en Distritos de Riego.....	32
ANEXO 2	35
2. Características del agua residual	36

2.1 Carga contaminante.....	38
2.2 Contaminantes básicos.....	38
2.3 Contaminantes patógenos y parásitos.....	38
2.4 Otros contaminantes.....	38
 ANEXO 3.....	 39
3. Aspectos legales para el aprovechamiento de las aguas residuales	40
3.1 Norma Oficial Mexicana ECOL-001-96.....	44
 ANEXO 4.....	 46
4. Alternativas de aprovechamiento de las aguas residuales	47
4.1 Tratamientos convencionales.....	49
4.1.1 Tratamiento primario.....	50
4.1.2 Tratamiento secundario.....	51
4.1.3 Tratamientos avanzados.....	55
4.2 Sistemas de tratamiento biológico.....	57
4.2.1 Tratamiento con macrófitas.....	57
4.2.2 Humedales o Wetlands.....	59
4.3 Comparativo entre tipos de tratamiento.....	62
 ANEXO 5.....	 63
5. Riego con aguas residuales	64
5.1 Consideraciones de salud pública.....	66
5.2 Consideraciones agronómicas.....	68
5.2.1 Tipos de suelos.....	68
5.2.2 Profundidad de los mantos acuíferos.....	72
5.2.3 Manejo del Riego.....	72
5.2.4 Selección de cultivos.....	73
 ANEXO 6	 75
6. Monitoreo de la calidad del agua de riego	76
6.1 Tipos de muestreo.....	76
6.2 Selección de sitios de muestreo.....	76
6.3 Consideraciones en la toma de muestras.....	77
 ANEXO 7.....	 78
7. Reportes de experiencias en el aprovechamiento De aguas residuales	79
7.1 Reuso de aguas residuales en Nicaragua.....	82
7.2 Reuso de aguas residuales en Argentina.....	82
7.3 Reuso de aguas residuales en Calcuta, India.....	82
7.4 Reuso de aguas residuales en Australia.....	83
7.5 Reuso de aguas residuales en España.....	83
7.6 Reuso de las aguas residuales en Portugal.....	84
7.7 Reuso de las aguas residuales en Francia.....	84
7.8 Reuso de las aguas residuales en Italia	85
7.9 Reuso de las aguas residuales en Grecia	86
7.10 Reuso de las aguas residuales en Malta	86

7.11 Reuso de las aguas residuales en Túnez	86
7.12 Reuso de las aguas residuales en Israel	87
7.13 Reuso de las aguas residuales en Arabia Saudita	88
BIBLIOGRAFÍA	90
AGRADECIMIENTOS	97

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Calidad del influente y calidad requerida del efluente para uso agrícola de las aguas residuales municipales del Río Fuerte ...	11
Cuadro 2. Principales asentamientos humanos en la cuenca del Río Fuerte	12
Cuadro 3. Número de asentamientos humanos de la cuenca del Río Fuerte, por número de habitantes	13
Cuadro 4. Demanda anual de abastecimiento para uso municipal.....	13
Cuadro 5. Principales descargas de agua residual industrial en la cuenca del Río Fuerte	14
Cuadro 6. Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales	14
Cuadro 7. Volúmenes proyectados de agua residual municipal en la cuenca del Río Fuerte	15
Cuadro 8. Volúmenes proyectados de agua residual municipal para la zona urbana y conurbada del Río Fuerte.....	16
Cuadro 9. Principales series de suelos en el DR 075	18
Cuadro 10. Cultivos principales del DR 075 en el ciclo 1996-97	19
Cuadro 11. Localidades con posibilidad de reuso y recirculación de agua según prioridades	31
Cuadro 12. Localidades con conflicto por disponibilidad de agua	32
Cuadro 13. Superficie de riego con aguas residuales según distrito y número de beneficiarios	33
Cuadro 14. Posible distribución sobre la utilización del agua residual en distritos de riego.....	33
Cuadro 15. Principales cultivos y su consumo de agua.....	34
Cuadro 16. Características relevantes del agua residual y su interpretación.....	36
Cuadro 17. Principales contaminantes del agua residual según su origen.....	37
Cuadro 18. Carga contaminante generada por descargas municipales e industriales....	38
Cuadro 19. Límites máximos permisibles para contaminantes patógenos Presentes en agua de riego agrícola.....	38
Cuadro 20. Criterios de calidad del agua para uso agrícola en 1982	41
Cuadro 21. Valores máximos permisibles de las descargas a los cuerpos receptores en 1986	42
Cuadro 22. Límites máximos permisibles de contaminantes de aguas residuales para riego agrícola en 1990	43
Cuadro 23. Límites máximos permisibles de contaminantes de aguas residuales para agricultura en 1993	44
Cuadro 24. Límites máximos permisibles para contaminantes básicos en riego agrícola en 1997, según la NOM-ECOL-001.....	45
Cuadro 25. Tipo de contaminantes y su remoción de acuerdo al proceso o sistema de tratamiento	49
Cuadro 26. Guía para interpretar suelos para lagunas de oxidación de aguas negras	55
Cuadro 27. Eficiencias globales de remoción obtenidas con los LPA	60
Cuadro 28. Eficiencias de remoción por sistema de tratamiento de lechos de plantas acuáticas	61

Cuadro 29. Principales ventajas y desventajas de los tipos de tratamiento para aguas residuales	62
Cuadro 30. Clasificación del agua de acuerdo con su conductividad eléctrica	64
Cuadro 31. Características epidemiológicas de patógenos entéricos	66
Cuadro 32. Enfermedades causadas por microorganismos entéricos presentes en agua residual	67
Cuadro 33. Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros en suelos agrícolas	68
Cuadro 34. Tiempo estimado para que suelos regados con aguas residuales alcancen su límite de carga de metales (lámina anual de 1.2 m)	69
Cuadro 35. Tiempos de supervivencia de patógenos en suelo y planta	71
Cuadro 36. Movimiento de bacterias patógenas a través del suelo, después del riego con aguas residuales	72
Cuadro 37. Clasificación de cultivos de acuerdo con su tolerancia a las sales	74
Cuadro 38. Límite máximos permisibles de metales pesados en agua de riego	74
Cuadro 39. Lapso de tiempo a considerar en la toma de muestras de agua	77
Cuadro 40. Antecedentes de uso de aguas residuales en algunos países extranjeros	79
Cuadro 41. Reuso de las aguas residuales en países del norte de Africa, Medio Oriente, zona europea mediterránea, zona europea del este y otros	80
Cuadro 42. Eficiencia de tres plantas de tratamiento de aguas residuales en Israel	87

ÍNDICE DE LÁMINAS

Lámina 1. Esquema general de tratamiento para el agua residual municipal	4
Lámina 2. Esquema general de tratamiento para generar agua residual municipal a partir de agua residual industrial	6
Lámina 3. Esquema general de reuso de agua residual en agricultura	8
Lámina 4. Plano general de la cuenca del Río Fuerte	9
Lámina 5. Principales poblaciones del a cuenca del Río Fuerte	11
Lámina 6. Plano de textura superficial del suelo del DR 075 Río Fuerte, Sinaloa	16
Lámina 7. Plano de profundidad del manto freático del DR 075 Río Fuerte, Sinaloa	17
Lámina 8. Escenario general de tratamiento biológico convencional y reuso de las aguas residuales municipales de la ciudad de Los Mochis, Sinaloa	21
Lámina 9. Escenario general de tratamiento biológico combinado y reuso de las aguas residuales municipales de la ciudad de Los Mochis, Sinaloa.....	23
Lámina 10. Escenario general de tratamiento biológico, y reuso de las aguas residuales domésticas en comunidades con menos de 10,000 habitantes.....	25
Lámina 11. Vista parcial de una planta de tratamiento con un sistema biológico convencional.....	26
Lámina 12. Un sistema de humedal para tratar agua residual municipal	26
Lámina 13. Humedales para tratar agua residual doméstica	27
Lámina 14. Croquis del tren de tratamiento de la planta en Orizaba, Ver	60
Lámina 15. Croquis del tren de tratamiento de la planta en Quilehtla, Tlax,	61

RESUMEN EJECUTIVO

Se realizó una revisión bibliográfica sobre aguas residuales en México, que abarca antecedentes del uso del agua residual, características de las aguas residuales, aspectos legales del aprovechamiento de las aguas residuales, alternativas para el aprovechamiento de las aguas residuales, consideraciones agronómicas y de salud pública para el riego con aguas residuales, monitoreo de la calidad del agua y de las cosechas, y experiencias en otros países sobre el mismo tema.

Se propuso una guía metodológica que contempla los siguientes procedimientos,

- (i) Generalidades, que incluye definiciones importantes, y recomendaciones para la búsqueda y obtención de información general;
- (ii) Diagnóstico de la calidad del agua en la cuenca, que incluye la actualización de la calidad del agua, a través del monitoreo de puntos fijos de descarga de aguas residuales municipales, y la toma de muestras para determinar sus componentes fisico-químicos y bacteriológicos;
- (iii) Caracterización de asentamientos humanos, es decir, las poblaciones asentadas en la zona de acuerdo a su número de habitantes, servicios de agua potable y alcantarillado, y su ubicación geográfica;
- (iv) Generación de aguas residuales municipales e infraestructura de tratamiento existente, determinando la población total asentada en la zona de estudio, la dotación media de agua limpia en m³/hab/día, y el volumen que se genera de agua residual municipal. Se deberá realizar un inventario de la infraestructura disponible para tratar el agua, determinando su localización, el tipo y número de plantas, su capacidad instalada, volumen tratado y eficiencias de operación. En caso de no existir ningún tipo de tratamiento, los tipos de tratamiento a seleccionar y sus eficiencias de operación dependen, en última instancia, de los constituyentes del agua residual cruda (influyente), y de las concentraciones admitidas para los usos designados del efluente final. Para llegar a estas decisiones, deben definirse la calidad deseada del efluente en términos cuantitativos precisos. Esta es una premisa fundamental para el diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales;
- (v) Caracterización de los suelos, por textura, permeabilidad, la profundidad del nivel freático, pendiente general, y de ser posible, realizar un diagnóstico de la calidad de los suelos a través del monitoreo para determinar calidad fisico-química de los mismos a través de parámetros como pH, CE, sodio, potasio, carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, cloruros, calcio y magnesio;
- (vi) Determinación del patrón de cultivos, de modo que la introducción de las aguas residuales no represente cambios drásticos en los sistemas de producción agrícola de la localidad;
- (vii) Correlación de información e implementación de propuestas de desarrollo, a través de un procesamiento, que permita un manejo más ágil de los datos (por ejemplo, la digitalización y sobreposición de planos). Una vez procesada la información, la(s) superficie(s) delimitadas deberá(n) someterse a un estudio de factibilidad, el cual proporcionará un análisis técnico y socio-económico más detallado, donde se indicarán la ubicación precisa y las inversiones para la ejecución del proyecto (obra nueva o complementaria, tecnologías nuevas o complementarias de producción, proyecciones a futuro, relaciones beneficio/costo, etc.).

Se realizó un estudio de caso para la cuenca del Río Fuerte, donde se propusieron tres alternativas de reuso,

1. Aguas residuales municipales de la ciudad de Los Mochis, con tratamiento biológico convencional, para riego agrícola y/o lavado de suelos salinos.
2. Aguas residuales municipales de la ciudad de Los Mochis, en una combinación de tratamientos, biológico convencional y humedales, para riego agrícola y/o aprovechamiento acuícola.
3. Aguas residuales doméstica, para poblaciones con menos de 10,000 habitantes, con sistema de humedales, para riego de solares, huertos familiares y/o disposición segura de efluentes.

El tipo de reuso es el principal factor que va a condicionar el nivel de tratamiento que deba recibir el agua residual en una zona determinada, y ésto a su vez, determinará el sistema de tratamiento a implantar. En el presente estudio, aparte del reuso en riego, se da el ejemplo del reuso en acuicultura, siendo ésta una necesidad específica de la zona de estudio. Será necesario, en ciertos casos, que el reuso se deba dirigir a otros fines, como el industrial, riego de áreas forestales, producción en viveros y para fines recreativos.

Se concluye que cada área de estudio requerirá de un tren de tratamiento muy específico, de acuerdo a sus condiciones. No debe existir un recetario de sistemas de tratamiento, sino un análisis detenido de opciones, y cuya decisión final estará en función de consideraciones técnicas, de salud pública y socio-económicas. En general, a mayor nivel de calidad de agua deseada y caudal a tratar, mayor será el costo de tratamiento.

Introducción

Aproximadamente el 80% del agua limpia entregada se convierte en agua residual, y dada la creciente escasez del recurso, esta fuente de agua ha adquirido gran importancia como un recurso alternativo con posibilidades de aprovecharse, y de esta forma disminuir la presión social que existe en el sector agrícola por el uso de agua limpia, el cual consume aproximadamente el 65% del total del recurso disponible.

Se han realizado diversos estudios sobre el aprovechamiento de aguas residuales en Chile, Perú, México, Estados Unidos, Israel, Túnez, Marruecos, Alemania y Austria entre otros. Sin embargo son trabajos que se encuentran dispersos, por lo que se observa la necesidad de analizarlos y sistematizarlos en un documento de consulta. Así también es muy importante contar con guías de procedimientos para el aprovechamiento de las aguas residuales en la agricultura dentro de un concepto hidrológico integral, lo que permitirá una mejor administración y aprovechamiento del recurso agua.

En este contexto la Comisión Nacional del Agua (CNA) y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), a través de la Subcoordinación de Contaminación y Drenaje Agrícola, participaron en la elaboración del presente estudio bibliográfico y de análisis, desde las perspectivas agronómica, sanitaria y ambiental. Además, se propone una guía de procedimientos para el aprovechamiento de las aguas residuales en el ámbito hidrológico integral, con el fin de contar con una herramienta de apoyo, con lineamientos específicos para el reuso en agricultura, principalmente, aunque dicha propuesta esta abierta al planteamiento de escenarios para otro tipo de reuso. Los objetivos planteados en el presente estudio incluyen precisamente estos tres elementos, es decir, la elaboración de una revisión bibliográfica, una guía de procedimientos y la definición de escenarios de reuso para un estudio de caso.

PERSPECTIVA DE APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN UNA CUENCA

1 Generalidades

Es conveniente establecer definiciones importantes sobre los tipos de aguas residuales.

Agua residual.- aquella que ya no es agua de primer uso.

Agua residual doméstica.- aquella que proviene exclusivamente del uso residencial, es decir, casas habitación. Sus principales contaminantes son los microorganismos patógenos y altas cargas de sólidos disueltos y en suspensión (los cuales provocan deficiencia de oxígeno disuelto, turbidez y malos olores). También presentan altas concentraciones de nitrógeno y fósforo.

Agua residual municipal.- incluye el agua residual doméstica mas el agua residual proveniente de servicios y comercios propios de una población (restaurantes, centros comerciales, talleres de servicios en general, clínicas u hospitales, etc.). Aparte de los contenidos en el agua residual doméstica, presenta una gran variedad de contaminantes, principalmente metales pesados y sustancia orgánicas, aunque en concentraciones comparativamente mas bajas que aquellas encontradas en las descargas industriales.

Agua residual industrial.- aquella proveniente de los procesos de transformación de materias primas a materias elaboradas en gran escala (industria petroquímica, farmacéutica, textil, automotriz, de la curtiduría, etc.). Los elementos contaminantes de este tipo de agua residual, son muy variables, pero generalmente son muy específicos y se encuentran en muy altas concentraciones. Predominan metales pesados y sustancias orgánicas muy tóxicas.

Agua residual agrícola.- aquella que, después de ser aplicada al suelo para auxiliar algún cultivo, drena superficial o subsuperficialmente. Sus principales contaminantes son sólidos en suspensión, sólidos inorgánicas disueltos y sustancias organo-fosforados y organoclorados (pesticidas). En zonas de agricultura intensiva las concentraciones de estos elementos son muy altas, y con el tiempo, alcanzan los mantos acuíferos.

En los Anexos 1 y 2 se presenta un panorama completo sobre la situación general del uso de las aguas residuales en México, y la composición de las mismas, respectivamente.

Es también importante mencionar que la presente metodología solo incluirá el aprovechamiento las aguas residuales de origen municipal, es decir, aquellas aguas residuales que no tenga origen industrial, dado que dichas aguas residuales deberán de ser analizadas caso por caso, para determinar el tipo específico de tratamiento que se requiera para su descarga o reuso, debido a la gran heterogeneidad y alta concentración de algunos de sus elementos.

Una vez seleccionada el área de estudio, se inicia la recopilación de información existente, siendo fundamental la consulta de datos estadísticos emitidos por organismos oficiales como el Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI), la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), el Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Forestales y Pecuarias (INIFAP), la Comisión Nacional del Agua (CNA), y las Asociaciones de Usuarios, entre otras.

Una vez seleccionada el área de estudio, es necesario realizar su delimitación, para la generación de un plano base, a partir del cual se obtendrán otros más. Es también importante determinar las características generales de ubicación geográfica, clima, fisiografía, y condiciones socioeconómicas de la cuenca de estudio.

2 Diagnóstico de la calidad del agua en la cuenca

En general, los contaminantes en las aguas residuales municipales que son de importancia para la salud humana se clasifican en biológicos y químicos. Los agentes biológicos (microorganismos patógenos) son los que representan los mayores riesgos a la salud, de modo que los controles de calidad van a estar dirigidos principalmente hacia su eliminación y control. El control de contaminantes químicos se hace necesario solo para cuando el agua tratada sea utilizada para otros usos, en especial cuando tenga contacto directo con la población, o con productos de consumo directo.

Debido a que en la actualidad se ha hecho necesario utilizar fuentes alternas de agua para abastecer las actividades altamente consumidoras de agua, como la agricultura y la industria, para poder abastecer mayores volúmenes de agua limpia hacia la población, es importante determinar la calidad de las fuentes de agua dentro de una cuenca. Los parámetros de calidad de agua que deben ser analizados son los contaminantes básicos y los contaminantes patógenos (ver Anexo 2).

Se deberán consultar los estudios sobre calidad del agua realizados (si existen), y de ser posible, realizar un diagnóstico actualizado de la calidad del agua a través del monitoreo de puntos fijos de descarga de aguas residuales municipales, tomando muestras para determinar sus componentes físico-químicos y bacteriológicos (ver Anexo 6). En este punto es conveniente generar un plano que ubique la red de monitoreo.

3 Caracterización de asentamientos humanos

A fin de establecer un marco de referencia sobre la calidad del agua residual de tipo municipal, es conveniente caracterizar a las poblaciones asentadas en la zona de acuerdo a su número de habitantes, servicios de agua potable y alcantarillado, y su ubicación geográfica.

El volumen de agua *per capita* generada por una comunidad es muy variable, y esta variabilidad refleja las diferencias en el consumo de agua entre las diversas comunidades dentro de la cuenca, y lo cual a su vez, es función del precio del agua y de las facilidades de abastecimiento y alcantarillado existentes.

4 Generación de aguas residuales municipales e infraestructura de tratamiento existente

El primer paso es determinar el volumen total de agua blanca utilizada en las distintas actividades económicas de la zona (básicamente uso municipal). Se deben considerar tanto las fuentes de agua superficiales (manantiales, ríos, presas), como las subterráneas (bombeos de acuíferos subyacentes), estableciendo los volúmenes destinados a las distintas

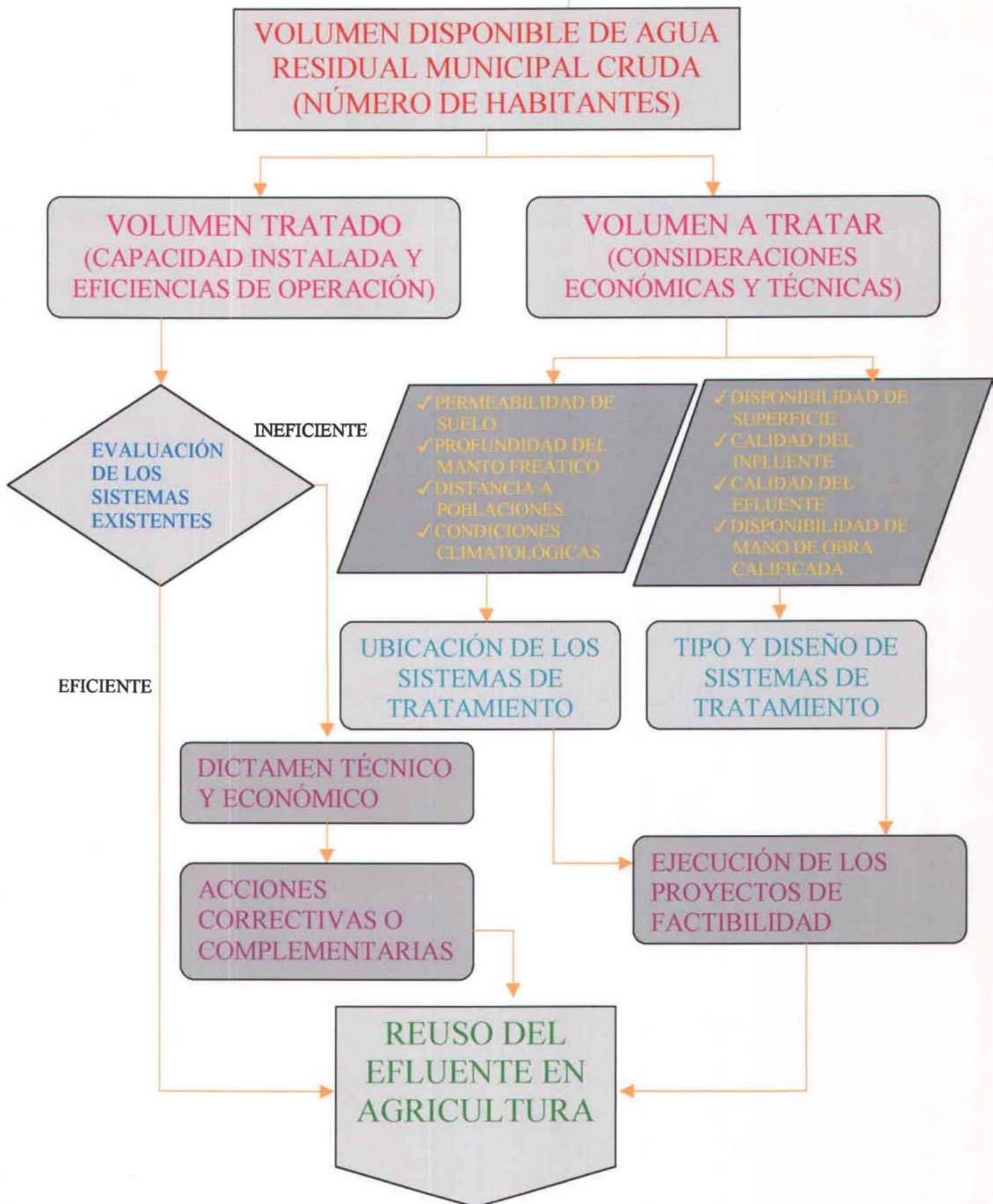


Lámina 1. Esquema general de tratamiento para el agua residual municipal

actividades económicas (uso industrial, urbano o agrícola). Igualmente importante es conocer los volúmenes finales del agua de salida del sistema municipal (percolación, evaporación, aguas residuales municipales, etc.), para finalmente poder establecer un balance general de las entradas y salidas de agua del sistema.

Aquí es importante distinguir que las aguas residuales municipales pueden provenir de sistemas establecidos de conducción (alcantarillado), o simplemente descargadas directamente a cuerpos de agua superficiales, o drenes abiertos, que conducen el cauce hasta una planta de tratamiento, si existe, o simplemente continúan su curso a lo largo de los cauces naturales.

Es necesario determinar la población total asentada en la zona de estudio, la dotación media de agua limpia en $\text{m}^3/\text{hab}/\text{día}$, para finalmente poder estimar (o preferentemente medir) el volumen que se genera de agua residual municipal. Se deberá realizar un inventario de la infraestructura disponible para tratar el agua, determinando su localización, el tipo y número de plantas, su capacidad instalada, volumen tratado y eficiencias de operación. Será conveniente generar el plano de ubicación de dicha infraestructura. En la Lámina 1 se presenta un plan general de tratamiento para generar un efluente de origen municipal para reuso agrícola.

En caso de que no exista infraestructura de tratamiento, o la capacidad instalada sea insuficiente, los tipos de tratamiento a seleccionar para purificar el agua residual municipal, y sus eficiencias de operación dependen, en última instancia, de los constituyentes del agua residual cruda (influyente) y de las concentraciones admitidas para los usos designados del efluente final (ver Anexos 3 y 4, y Lámina 1). Para llegar a estas decisiones, deben definirse las metas en cuanto a calidad del agua en términos cuantitativos precisos. Esta es una premisa fundamental para el diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales.

Las descargas de aguas residuales industriales generalmente contienen muy altas concentraciones de elementos específicos, lo que resulta en aguas altamente tóxicas, inclusive al simple tacto, en algunos casos. Ejemplos de estos elementos tóxicos son el cromo hexavalente (Cr^{6+}) generado en las industrias de la curtiduría; y el plomo (Pb^{4+}) e hidrocarburos bencénicos provenientes de la industria petroquímica.

El agua residual industrial debe entonces de recibir un pre-tratamiento específico para disminuir la concentración de los elementos tóxicos que contiene antes de ser descargada a los drenajes, de modo que, después del pre-tratamiento, pueda ser considerada como agua residual de tipo municipal, para que sea tratada con los sistemas convencionales que existan en la zona para ese tipo de agua residual, y finalmente pueda ser reutilizada con seguridad (Lámina 2).

5 Caracterización de los suelos

Debido a que parte importante del estudio es para aprovechar las aguas residuales municipales en el riego agrícola, es necesario establecer el tipo de suelos, su permeabilidad, la profundidad del nivel freático (ver Anexo 5). En esta fase es importante consultar los

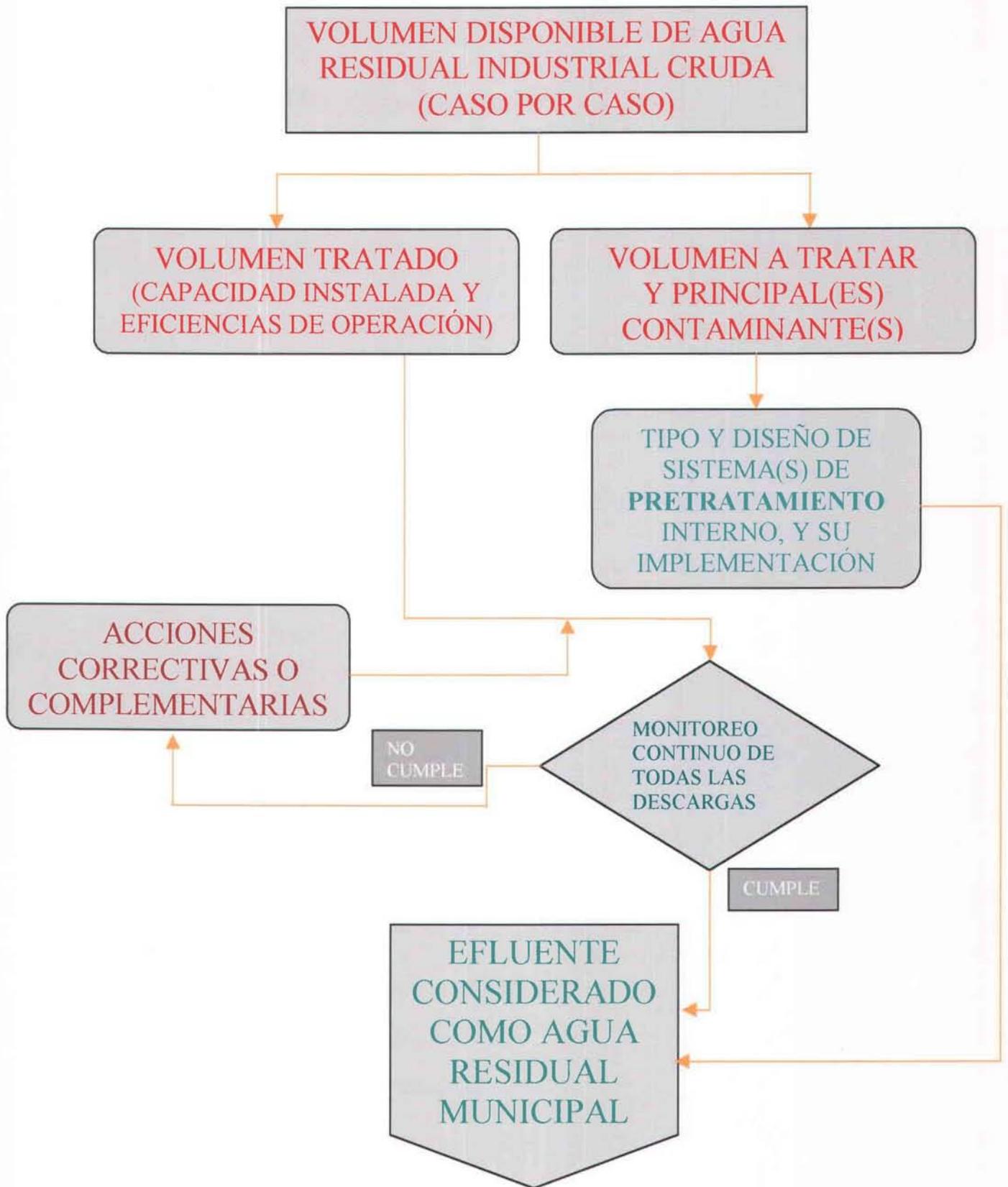


Lámina 2. Esquema general de tratamiento para generar agua residual municipal a partir de agua residual industrial.

estudios edafológicos y de profundidad de mantos freáticos existentes, y de ser posible realizar un diagnóstico de la calidad de los suelos a través del monitoreo para determinar calidad fisicoquímica de los mismos a través de parámetros como pH, CE, sodio, potasio, carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, cloruros, calcio y magnesio.

En caso de no existir información sobre la edafología de la zona, se deberán realizar consultas con los técnicos locales mas experimentados para determinar conjuntamente las áreas convenientes para este tipo de proyectos. Será importante diseñar un plan rápido de barrenaciones para verificar texturas superficiales y subsuperficiales, y profundidad y calidad del agua de mantos freáticos someros (si existen).

6 Determinación del patrón de cultivos

Es recomendable mantener el patrón local de cultivos, o en su defecto, promover un cambio gradual del mismo, de modo que la introducción de las aguas residuales no represente cambios drásticos en los sistemas de producción agrícola de la localidad, y que no repercuta negativamente en la productividad de la zona.

Sin embargo, se debe proponer cultivos y prácticas de manejo adecuados (ver Anexo 5), considerando que se va a utilizar agua residual para la producción,

7 Correlación de información e implementación de propuestas de desarrollo

Una vez que se cuente con la información cartográfica se procederá a su procesamiento, mediante la digitalización de información temática, lo que permite un manejo mas ágil de la información, como por ejemplo, la sobreposición de planos, para su análisis y discusión, a fin de generar información sobre las áreas mas adecuadas para la ubicación del proyecto (lejos de los núcleos de población), y considerando el nivel de tolerancia a la salinidad, sodicidad, boro, o cualquier elemento potencialmente tóxico a los cultivos propuestos.

Sobre la base de la información de calidad y volumen disponible para riego (determinada a partir de los usos consuntivos de los cultivos a establecer), a la información de suelos, y a la información del patrón de cultivos a seguir, se debe establecer un plan general para aprovechar las aguas residuales municipales tratadas para riego agrícola (Lámina 3), que considere los aspectos agronómicos (suelo, agua, cultivo, clima) y de salud pública.

Una vez procesada la información, la(s) superficie(s) delimitadas deberá(n) someterse a un estudio de factibilidad, el cual proporcionará un análisis técnico y socio-económico mas detallado, donde se indicarán la ubicación precisa y las inversiones para la ejecución del proyecto (obra nueva o complementaria, tecnologías nuevas o complementarias de producción, proyecciones a futuro, relaciones beneficio/costo, etc.).

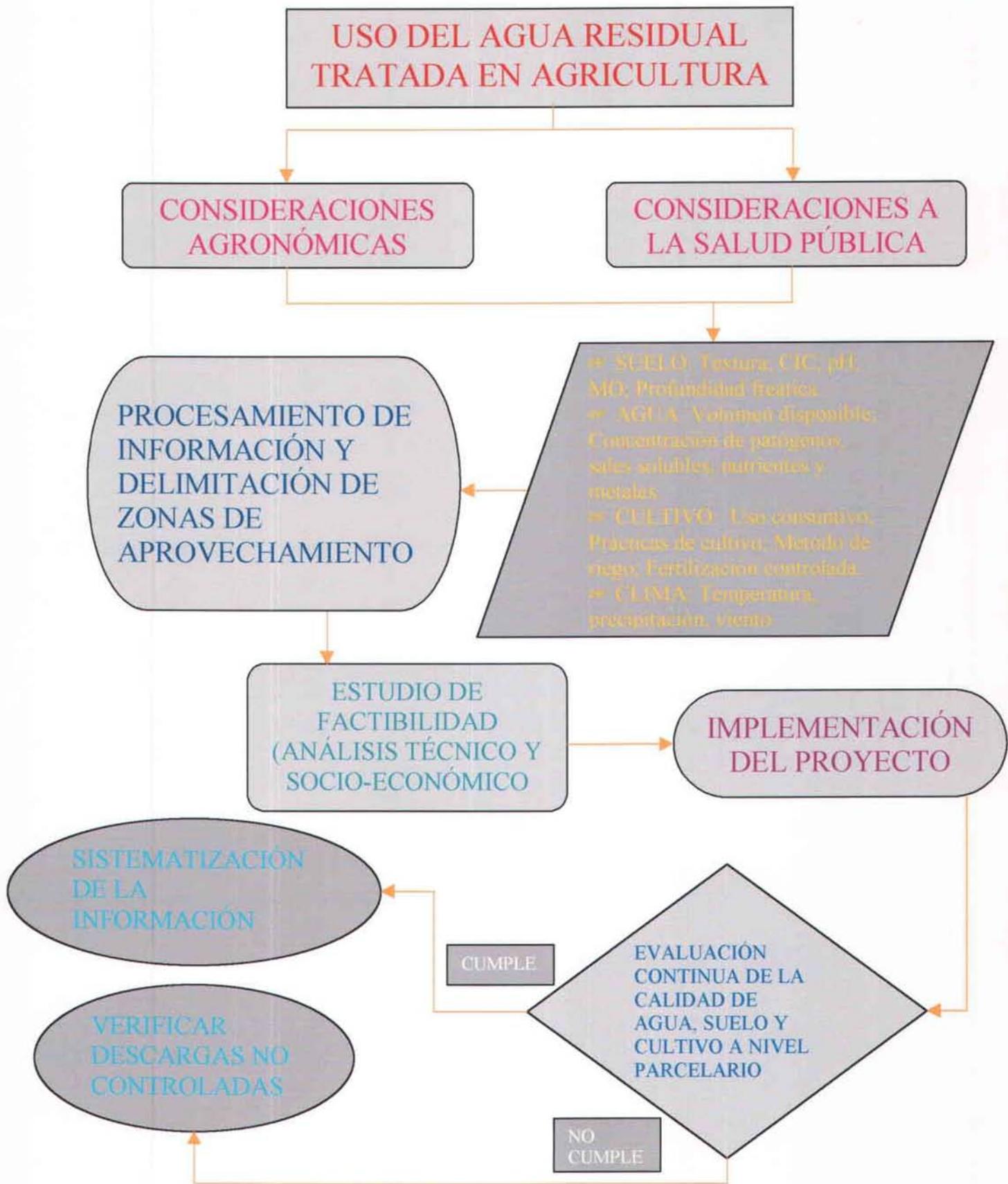


Lámina 3. Esquema general de reuso de agua residual en agricultura.

8. ESTUDIO DE CASO. LA CUENCA DEL RÍO FUERTE

La cuenca del Río Fuerte (Lámina 4) se localiza al noroeste de la República Mexicana, abarcando parte de los estados de Sinaloa, Chihuahua, Sonora y Durango. Limita al norte con la cuenca del Río Mayo en el estado de Sonora, al sur con la cuenca del Río Sinaloa, al Oeste con el Golfo de California, y al este con las cuencas de los ríos Yaqui, Conchos y Nazas en la sierra madre occidental. Geográficamente se ubica entre los 106°30' y 190° 00' de longitud Oeste y entre los 25° 10' y 26°45' de latitud norte del meridiano de Greenwich.

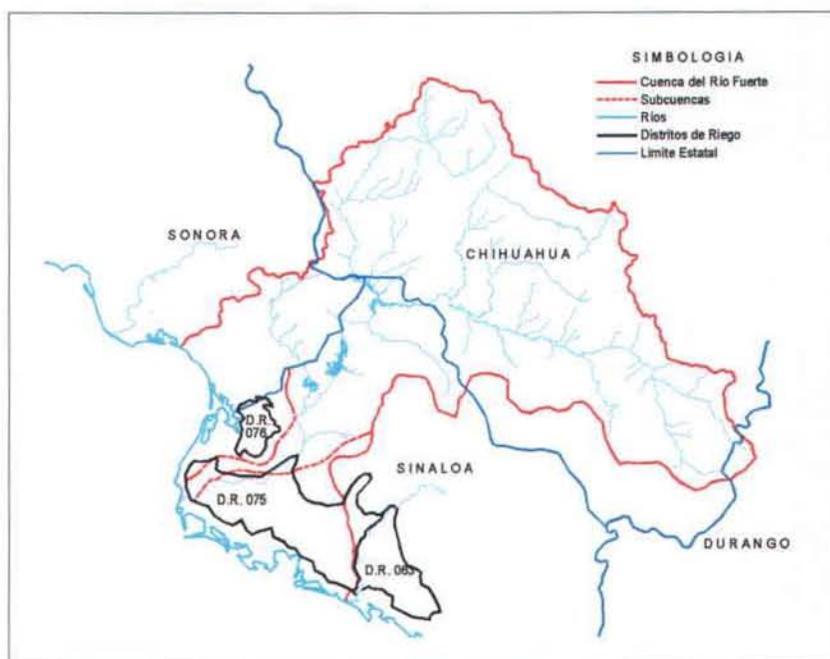


Lámina 4. Plano general de la cuenca del Río Fuerte.

En la cuenca se presentan tres franjas climáticas predominantes que atraviesan la cuenca en sentido norte-sur. La primera franja corresponde a la zona costera, donde el clima según la clasificación de Koppen, modificado por E. García, corresponde a un BW (h') es decir muy seco, muy cálido y cálido, con una temperatura media anual de 24°C, y temperatura máxima de 45° C. La segunda franja, en orden ascendente, corresponde a un BS (h') que corresponde a clima muy cálido y cálido con lluvias en verano. La tercera franja corresponde a un BS1 (h') que es clima semi-seco muy cálido y cálido, con una temperatura media anual de 25.1° C.

Esta cuenca recibe una precipitación media de 717 mm anuales, su área drenada es de 33 390 km², el volumen precipitado es de 23,941 hm³, mientras que el volumen escurrido es de 4,734 hm³. Su extensión total es de 43,135 km².

8.1 Generalidades de la cuenca del Río Fuerte

Se presentan vientos dominantes provenientes del oeste, con velocidades medias de 16 km/h y máximas de 25 km/h. Entre diciembre y marzo se presentan vientos de oeste-noroeste húmedos y fríos con velocidades medias de 15 km/h. De abril a junio se presentan vientos cálidos y secos del suroeste y sur-suroeste, con velocidades medias de 15 km/h y máximas de 28 km/h. En septiembre soplan vientos con dirección oeste-suroeste con velocidades medias de 10 km/h. En noviembre dominan los vientos del este, y en casos donde el invierno llega adelantado se presentan vientos del norte con velocidades medias de 12 km/h y máximas de 20 km/h.

Los ciclones se presentan entre julio y octubre, con lluvias moderadas que aportan humedad al continente provocando lluvias moderadas. Se presentan dos períodos de lluvias definidos, el primero se presenta de junio a septiembre, con precipitaciones medias de 500 a 700 mm anuales. El segundo período ocurre de diciembre a febrero, provocando lluvias de poca intensidad, presentándose principalmente hacia las zonas de la sierra.

La contaminación salina se presenta en 7,860 ha de las cuales 5,945 ha son suelos salinos y 1,915 ha son de suelos salino-sódicos.

8.2 Diagnóstico de la calidad del agua en la cuenca del Río Fuerte

En cuanto a la calidad del agua superficial, datos de un estudio sobre calidad del agua de la cuenca del Río Fuerte, realizados durante 1984-85, por la CNA, en el Laboratorio Regional ubicado en la ciudad de Los Mochis, Sin., indican de manera general que las zonas de captación de agua de las presas tienen corrientes limpias, con aguas recomendables para todos los usos, y conforme se desciende en la cuenca, donde se localizan dispersos aproximadamente 38 asentamientos humanos, la calidad de las aguas superficiales va disminuyendo.

Aguas abajo de la presa Josefa Ortíz de Domínguez y del poblado de El Fuerte, la contaminación de las aguas superficiales comienza a aumentar, llegando a los niveles más altos de la cuenca aguas abajo de la ciudad de Los Mochis. Desafortunadamente no se cuenta con información precisa sobre los contaminantes químicos y biológicos de estas descargas, por lo que se considerarán valores típicos promedio de concentración para los efectos de este estudio.

La contaminación de las aguas se origina principalmente en las descargas de aguas residuales municipales e industriales de la zona urbana y conurbada de la ciudad de Los Mochis, además de las aguas de retorno del DR 075. Todas las aguas residuales municipales, industriales y agrícolas son descargadas hacia diversos drenes secundarios que van a confluír a los drenes colectores Juárez, Mochis, Cañero y San Miguelito.

Cuadro 1. Calidad del influente y calidad requerida del efluente para uso agrícola de las aguas residuales municipales de la cuenca del Río Fuerte.

PARÁMETROS	Calidad inicial	Calidad final deseada
Temperatura, °C	40	25
Grasas y aceites, mg/L	60	25
Sólidos sedimentables, mL/L	7	2
Sólidos suspendidos totales, mg/L	260	125
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO), mg/L	274	150
Nitrógeno total, mg/L	60	40
Fósforo total, mg/L	30	8
Coliformes fecales, NMP/100 mL	16×10^8	$< 1 \times 10^3$
Huevos de helminto, No./mL	5	1

(1) Fuente: SARH, s/f

(2) Fuente: Diario Oficial de la Federación, 6 de Enero de 1997 (promedio diario).

8.3 Caracterización de los asentamientos humanos en la cuenca del Río Fuerte

En la cuenca del Río Fuerte existen 38 núcleos de población, con un total estimado de 550,070 habitantes (Cuadro 2). Las poblaciones asentadas en la cuenca del Río Fuerte quedaron clasificadas en 3 rangos de acuerdo a su número de habitantes (Cuadro 3).

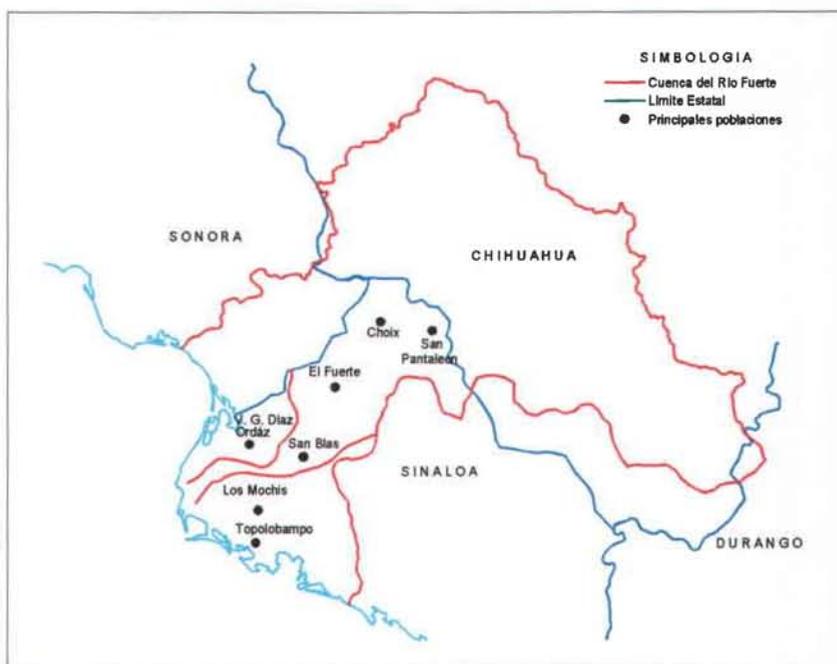


Lámina 5. Principales poblaciones de la cuenca del Río Fuerte.

Cuadro 2. Principales asentamientos humanos en la cuenca del Río Fuerte.

POBLADO	Municipio	Población total
Los Mochis	Ahome	359,146
El Fuerte	Fuerte	89,515
Juan José Ríos	Guasave	23,472
Choix	Choix	7,320
Topolobampo	Ahome	7,279
San Blas	Fuerte	6,101
Constancia	Fuerte	5,604
Mochicahui	Fuerte	4,801
Bagojo	Ahome	4,221
Compuertas	Ahome	3,998
Primero de Mayo	Ahome	3,446
Ejido los Mochis	Ahome	2,812
Charay	Ahome	2,780
Grullas Margen Izq.	Ahome	2,354
Lázaro Cárdenas	Fuerte	2,117
Nueve de Diciembre	Ahome	2,075
Ricardo Flores Magón	Ahome	2,029
Ohuira	Ahome	1,916
Benito Juárez vinateria	Fuerte	1,845
Taxtes	Fuerte	1,462
Benito Juárez	Ahome	1,419
Dos de abril	Fuerte	1,413
Bachomobampo (dos)	Ahome	1,360
Plan de Ayala (camp 5)	Ahome	1,316
Teroque el Viejo	Fuerte	1,217
Macapule	Ahome	1,216
Pochotal	Fuerte	1,189
Huepaco	Fuerte	1,168
Bachomobampo (uno)	Ahome	1,021
Vallejo	Ahome	979
Dieciocho de marzo	Ahome	916
Loussiana	Ahome	828
El Porvenir	Ahome	638
El Bule	Ahome	487
Bachoco	Ahome	283
Antonio Rosales	Choix	135
La Florida Vieja	Ahome	118
Vinaterias	Choix	74
TOTAL		550,070

Fuente: INEGI, XII Censo General de Población y Vivienda. 2000.

La ciudad de los Mochis (Lámina 5) concentra la mayor cantidad de población dentro de la cuenca, donde el 82% de la población cuenta con agua potable, y el 72% con alcantarillado.

Sus aguas residuales municipales son descargadas principalmente a los drenes San Miguelito, Juárez y Mochis. El Fuerte (Lámina 5), es la segunda población en importancia, donde el 75% de la población cuenta con agua potable, pero sólo el 19% cuenta con drenaje conectado a la red pública, y un 20% cuenta con fosas sépticas y el 61% restante carece de drenaje.

Cuadro 3. Número de asentamientos humanos de la cuenca del Río Fuerte, por número de habitantes.

Número de poblados	Rango de Población
2	> 50,000 hab.
11	2500 – 50,000 hab.
25	< 2500 hab.

Fuente: INEGI, XII Censo General de Población y Vivienda, 2000.

Según lo establecido por la NOM-ECOL-001, la ciudad de los Mochis debió haber cumplido con el tratamiento de sus descargas de aguas residuales municipales, durante el año 2001, en tanto que 11 poblados deberán cumplir con el tratamiento de sus aguas residuales al 01 de enero de 2010, no determinando la fecha de cumplimiento para el tratamiento de las descargas de aguas residuales de los 25 poblados restantes que se asientan en la cuenca.

8.4 Generación de aguas residuales municipales e infraestructura de tratamiento existente

La cobertura de los servicios de agua potable en la cuenca del Río Fuerte es de 75.5%. La cuenca posee 153 fuentes de abastecimiento para agua potable, 33 de las cuales son pozos profundos, 29 pozos indios, 3 manantiales, 2 galerías filtrantes horizontales y 86 catalogadas como "otras", en donde se incluyen aquellos abastecimientos de canales, ríos o embalses.

8.4.1 Aguas residuales municipales

Según datos del censo de población y vivienda INEGI (2000), la población en la cuenca del río Fuerte es de 550,070 habitantes. Considerando una dotación promedio por habitante de 240 L/día, entonces se estima (Cuadro 4) que la demanda de agua para uso municipal en la cuenca es de 48.2 Mm³/año.

Cuadro 4. Demanda anual de abastecimiento para uso municipal.

FUENTE	Volumen demandado (Mm ³)	%
Agua subterránea	19.6	40.6
Agua superficial	28.6	59.4
Total	48.2	100.0

No se cuenta con registros de aforo de los drenes que conducen las aguas residuales municipales de la ciudad de Los Mochis, por lo que se debe hacer un estimado con base en los datos de población y dotación promedio por habitante.

Considerando que la población de Los Mochis representa el 66% del total de la cuenca del Río Fuerte, que aproximadamente el 70% de las aguas servidas se convierten en aguas residuales (SARH, s/f), y que el 72% de la ciudad cuenta con servicio de drenaje municipal, entonces el caudal promedio de aguas residuales generado por dicha ciudad es de 16.0 Mm³/año (0.51 m³/s).

8.4.2 Aguas residuales industriales

Los giros industriales con la mayor descarga de aguas residuales en la cuenca, son el ingenio azucarero y las procesadoras de alimentos. El caudal promedio descargado de aguas residuales industriales en la cuenca del Río Fuerte es de 24.499 Mm³/año o 0.78 m³/s (Cuadro 5), los descargan a drenes agrícolas (REPDA, CNA, 1997).

Cuadro 5. Principales descargas de agua residual industrial en la cuenca del Río Fuerte.

Municipio	Empresa	Descarga, miles m ³ /año
Ahome	Cía. Azucarera de los Mochis, S. A. de C. V.	23,328
Ahome	Productos industrializados del Fuerte S. A de C. V.	584
El Fuerte	Alimentos del Fuerte S. A de C. V.	448
Ahome	Maíz industrializado del Norte S. A de C. V.	139
TOTAL		24,499

Fuente: Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), CNA, 1997.

Los caudales municipales e industriales suman 1.29 m³/s, y representan el 39.5% y el 60.5% del total generado, respectivamente.

8.4.3 Infraestructura para tratar aguas residuales municipales

El tratamiento de las aguas residuales municipales que se generan en la región, se realiza utilizando principalmente reactores enzimáticos y lagunas de estabilización. En el cuadro 6, se mencionan las plantas de tratamiento de aguas residuales en operación que se encuentran dentro de la cuenca.

Cuadro 6. Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.

Estado	Municipio	No. de plantas	Capacidad instalada, lps	Volumen tratado (miles m ³ /año)
REGIÓN III		46	---	82,000.74
EN SINALOA		26	1,054	40,078.89
Cuenca del Fuerte	Choix	1	11	346.89
	El Fuerte	1	36	1,135.29

Fuente: Anuarios estadísticos Estatales, INEGI, 1996.

Del cuadro anterior se deduce que, el tratamiento de las aguas residuales en la cuenca es muy escaso. La ciudad de Los Mochis, que es la mayor generadora de aguas residuales municipales en la cuenca, no cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales. Todas las aguas residuales de dicha ciudad son vertidas a los drenes agrícolas, para finalmente ser vertidas a las lagunas costeras.

De acuerdo con la información proporcionada por la CNA, el reuso de aguas residuales tratadas o crudas en la cuenca es una práctica poco común, pero que, debido a las intensas sequías en los últimos años, se ha incrementado, básicamente para el riego de cultivos como maíz, ajonjolí, avena y frijol, principalmente, pero sin recibir tratamiento alguno.

En la cuenca del Río Fuerte, debido a la sequía presentada en años anteriores y al costo de los volúmenes del agua utilizada, algunas industrias han tenido la necesidad de optimizar el uso de este recurso, promoviendo el reuso del agua residual para riego agrícola. Este es el caso de la Compañía Azucarera de los Mochis, S.A de C.V., que ha solicitado la concesión de las aguas residuales municipales, para ampliar su superficie de siembra en 4,032 hectáreas de caña de azúcar (CNA, 2000).

8.4.4 Volúmenes proyectados de aguas residuales municipales

Para pronosticar los volúmenes de descarga de agua residual municipal, se tomó como referencia las estadísticas de población y la tasa de crecimiento para la cuenca (Cuadro 7). Primero, se hace una proyección del crecimiento de la población, y luego se estima un volumen de agua residual generada, con base en los parámetros mencionados en [8.4.1]. De esta manera se estimó que para el año 2020, la demanda municipal de agua será de 58.1 Mm³/año.

Cuadro 7. Volúmenes proyectados de agua residual municipal en la cuenca del Río Fuerte.

Año	Número de habitantes	Descarga de agua residual, Mm ³ /año*
2000	550,070	48.2
2010	617,654	54.1
2020	663,731	58.1

*Estimado para la ciudad de Los Mochis, Sin.

Fuente: Proyecciones de crecimiento de la CNA, Gerencia Regional en Sinaloa. 1996.

Para hacer una proyección de las descargas industriales en la zona urbana y conurbada de la ciudad de Los Mochis (Cuadro 8), se tomaron los datos estimados en los Cuadros 5 y 7, dado que existe mayor incertidumbre para pronosticar volúmenes de aguas residuales industriales, y no hay tendencias que permitan hacer una estimación confiable.

Las estimaciones de los caudales de las descargas industriales se realizaron considerando que el incremento de dichas descargas industriales crece en forma proporcional al crecimiento de la población en la zona urbana y conurbada de la ciudad de Los Mochis.

Cuadro 8. Volúmenes proyectados de agua residual para la zona urbana y conurbada de la ciudad de Los Mochis, Sinaloa.

Año	Descarga de agua residual municipal, Mm ³ /año	Descarga de agua residual industrial, Mm ³ /año	Descarga total de agua residual, Mm ³ /año
2000	22.39	24.49*	47.13
2010	25.14	27.78	52.92
2020	27.01	29.85	56.86

* Dato de 1997

8.5 Caracterización de los suelos:

Los suelos de la cuenca del Río Fuerte son originados por material del período cenozoico, con afloramientos de rocas ígneas intrusivas, metamórficas y sedimentarias. Las rocas sedimentarias son las que ocupan la mayor superficie y están constituidas por una alternancia de gravas, arenas, limos y arcillas en proceso de litificación (SARH, 1984, SARH, 1985).

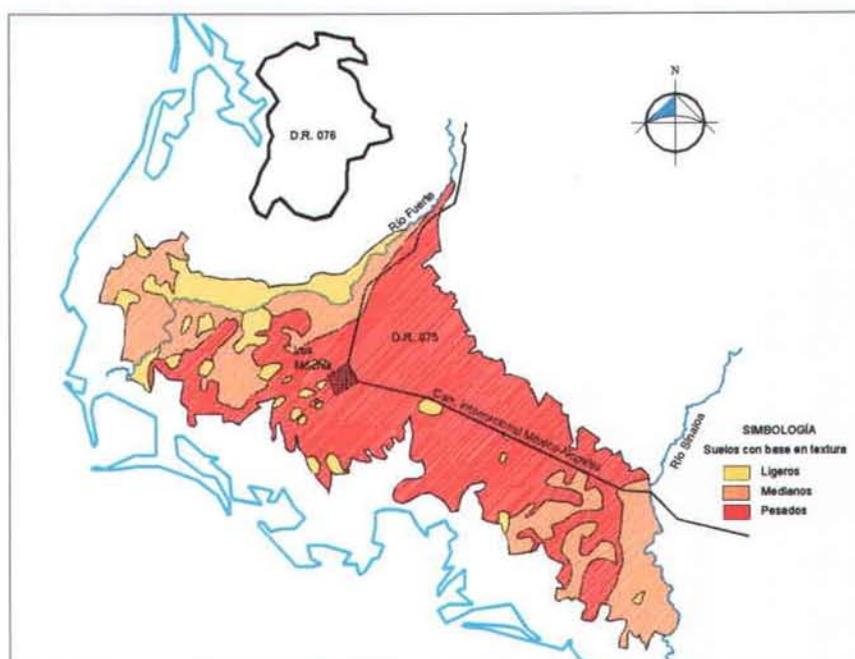


Lámina 6. Plano de textura superficial del suelo del DR 075 Río Fuerte, Sinaloa.

Dentro de los distritos de riego, se definen texturas bien diferenciadas, producto de los acarrees originados por las avenidas de los ríos Fuerte y Sinaloa, dando origen a suelos de origen aluvial, profundos y poco desarrollados. En las márgenes de las corrientes mencionadas, predominan las texturas medias y gruesas como arenas francosas y franco-arenosas, y conforme se avanza hacia el centro geográfico, las texturas son cada vez más finas, hasta alcanzar proporciones de 50 a 70% de arcilla (SARH-1990, citado por Pulido, 1998).

Gran parte de los suelos en la zona posee un pH entre 6.5 y 7.5, aunque suelos afectados por sales varía según la concentración salina, en especial la del sodio. En suelos con fases sódicas el pH es mayor de 8.2. En estudios agrológicos realizados por la SARH, entre 1984 y 1990, en las unidades segunda, tercera, quinta y sexta del DR 075, se describieron 23 series de suelos, en las que se observan fases salinas, salino-sódicas y sódicas (Cuadro 9). Las series Benito Juárez, Santa Fe, Tajito, Bacahira, Emiliano Zapata, Gallo y Bachoco no tienen problemas de salinidad.

En cuanto a la clasificación del suelo con base en texturas, aproximadamente el 70% lo constituyen suelos de textura fina, 20% los suelos tiene textura media, y el 10% restante son suelos de textura gruesa (ver Lámina 6). En las cercanías de la ciudad de Los Mochis, se observa que los suelos son predominantemente arcillosos, aunque existen algunas áreas con texturas medias.

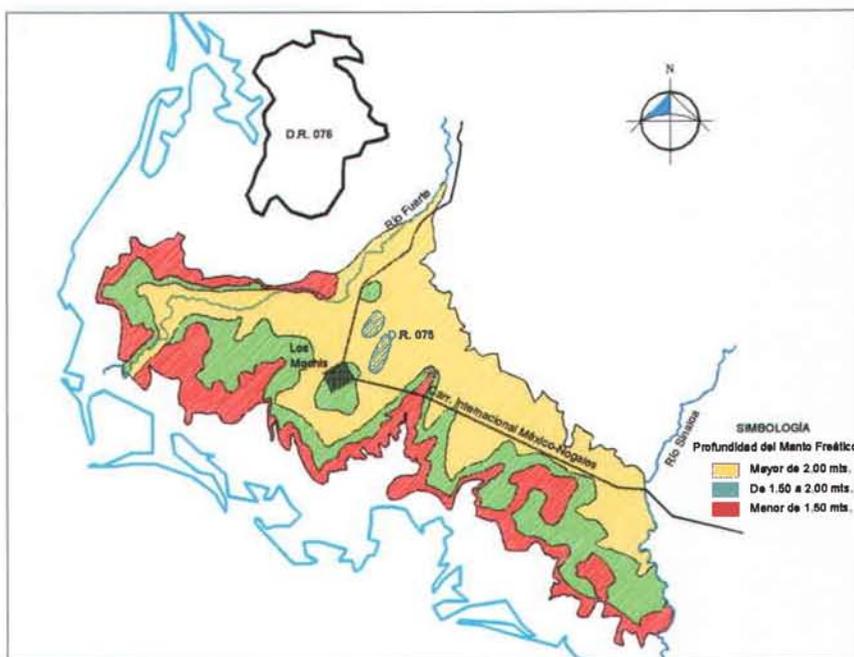


Lámina 7. Plano de profundidad del manto freático del DR 075 Río Fuerte, Sinaloa.

En cuanto a la profundidad del nivel freático, la Lámina 7 muestra tres niveles:

- < 1.50 m de profundidad, se ubica principalmente en la franja costera, por debajo de la cota 5, y en áreas localizadas en los extremos del distrito
- De 1.50 a 2.00 m de profundidad, esta superficie se sitúa por encima de la anterior, con un ancho promedio de 4 km, extendiéndose a lo largo del canal Valle del Fuerte, por su margen derecha.
- > 2.00 m de profundidad. – Esta franja se sitúa por encima de la antes mencionada y se extiende a lo largo y ancho del resto del distrito.

De la Lámina 7, se observa que en el área aledaña a Los Mochis, se presentan mantos freáticos a una profundidad mayor a 1.5 m.

Cuadro 9. Principales series de suelos en el DR 075.

Ubicación	Serie	Superficie (ha)	Problemas de salinidad
Sexta Unidad	Baroten	2,900	Ninguno
“	Lagunas	728	Ninguno
“	Las cabras	116	Ninguno
Quinta Unidad	Higuera	5,585	Muy ligeros
“	San Vicente	5,362	Muy ligeros
“	Cachoana	3,129	Ninguno
“	La Despensa	2,672	De moderado a alto
“	Matacahui	1,323	De moderado a alto
Tercera Unidad	Taxtes	19,040	Con fase salina y una fase salino-sódica
“	Mochis	18,348	Con fase salina y una fase salino-sódica
“	Santa Rosa	9,248	Presenta una fase salina
“	Camajoa	9,214	Con fase salina y una fase salino-sódica
“	Charay	8,520	Presenta una fase salina
“	Ohuira	6,272	Con fase salina y una fase salino-sódica
“	Baroten	3,504	Ninguno
Segunda Unidad	Miguel Alemán	18,659	Con fase salina y una fase salino-sódica
“	Juan José Ríos	13, 221	Con fase salina y una fase salino-sódica
“	Ruíz Cortínez	7,640	Presenta una fase salina
“	Corerepe	2,009	Presenta una fase sódica
“	Parritas	1,925	Presenta una fase sódica y una salino-sódica
“	Campestre	1,572	Presenta una fase salina
“	Hornos	1,515	Presenta una fase salino-sódica
“	San Ignacio	1,371	Presenta una fase salino-sódica

Fuente: SARH, 1997; 1984, 1985.

8.6 Determinación del patrón de cultivos

En las zonas agrícolas de la cuenca, se siembran principalmente cereales como maíz y trigo, leguminosas como frijol y soya, hortalizas como jitomate y papa, y perennes como caña de azúcar y pastos. Los cultivos de riego establecidos en el DR 075 son frijol, jitomate, maíz, papa y trigo, en el ciclo otoño-invierno; y frijol, jitomate, maíz, sorgo y soya en el ciclo primavera-verano. Existen cultivos perennes, como caña de azúcar y pastos.

Según datos de la estadística agrícola del DR 075, del año 1996-1997, se cosechó una superficie de 255,529 ha. estableciéndose 11 cultivos principales en el ciclo otoño-invierno y dos cultivos principales en el ciclo primavera-verano, así como dos principales en segundos cultivos (Cuadro 10).

El frijol es uno de los cultivos que el productor selecciona para su siembra en el ciclo de otoño-invierno. Durante los últimos 5 años (1995-2000) se han cosechado aproximadamente 45,000 ha, con rendimientos medios de 1,700 kg/ha en suelos francos y medios de los municipios de Ahome, el Fuerte, Guasave y Sinaloa de Leyva (INIFAP-CEVAF, 1997).

El maíz es un cultivo sembrado, tanto en el ciclo de otoño-invierno, como en primavera-verano. En un año agrícola en la zona se siembran alrededor de 116,000 ha, con una media de rendimiento de 7.8 ton/ha, sembrado en suelos de textura arcillosa (barriales) y en suelos de texturas medias (aluviones) (INIFAP-CEVAF, 1997).

El trigo es el cultivo principal en el ciclo de otoño-invierno, cultivado en suelos predominantemente arcillosos, y con un rendimiento promedio de 4.0 ton/ha. (INIFAP-CEVAF, 1997).

El sorgo, es un cultivo que se siembra en el ciclo de primavera-verano, sembrándose en suelos de texturas medias (aluviones), y en menor proporción en suelos arcillosos (barriales). Anualmente se cultivan alrededor de 11,000 ha con sorgo, con un rendimiento medio de 5.3 ton/ha (INIFAP-CEVAF, 1997).

Cuadro 10. Cultivos principales del Distrito de Riego 075 en el ciclo 1996-97.

CULTIVOS	Ciclo	Sup. Cosechada (ha)	Rend. medio (ton/ha)
Caña de azúcar	Perennes	13,822	96.52
Maíz	Otoño-invierno	100,222	8.07
Frijol	“	26,788	2.19
Tomate	“	9,319	34.29
Garbanzo	“	8,390	2.22
Papa	“	8,355	22.10
Trigo	“	5,536	4.09
Flor Forrajera	“	4,755	11.28
Calabaza	“	4,774	16.33
Algodón	“	3,965	3.1
Chile	“	2,252	28.27
Maíz	Primavera-verano	30,561	6.0
Sorgo	“	18,478	5.67
Arroz	Segundos cultivos	8,106	4.14
Maíz	“	10,203	4.32

Fuente: Estadística agrícola del Distrito de Riego 075. – CNA. Año 1996/97.

8.7 Correlación de información y propuestas de desarrollo

La información cartográfica fue concentrada y sistematizada. Se delimitó la cuenca en un plano general, donde se indican los principales núcleos de población, y se digitalizaron los planos de textura superficial y niveles freáticos del DR 075.

Debido a que los volúmenes mayores de aguas residuales se generan a partir de los núcleos de población grandes, la información relevante para este tipo de estudios tiende a concentrarse en las cercanías de las zonas urbanas. Tal es el caso de la ciudad de Los Mochis, dentro de la cuenca del Río Fuerte.

Con base en los planos de textura superficial y niveles freáticos se pueden delimitar áreas con posibilidad de recibir aguas residuales tratadas para riego de cultivos. Se buscan suelos cuya profundidad del nivel freático sea mayor a 1.5 metros, y la textura superficial sea media (suelos de texturas francas), o fina (suelos de textura franco arcillosa). En general, se deben preferir suelos bien estructurados, con una conductividad hidráulica (K) moderada (0.5 – 5.0 cm/hr), aunque el parámetro importante de diseño es el estrato con el menor valor de K, profundos (mas de 2 metros), y suelos no sódicos, principalmente.

Esta información cartográfica, junto con aquella de calidad del agua del influente, condiciones climatológicas, caudales medios, máximos y mínimos generados, calidad del agua deseada del efluente, patrón de cultivos a establecer, y topografía general, va a ser el sustento para hacer diversas propuestas de desarrollo. Estudios mas detallados de factibilidad deben contemplar, aparte de los aspectos técnicos (diseños de sistemas de tratamiento; diseños de métodos de riego apropiados; diseño de infraestructura adicional o complementaria; etc.), los aspectos sociales (principalmente tenencia de la tierra; aceptación de esta práctica entre los agricultores involucrados; cambio de patrón de cultivos), económicos (básicamente rentabilidad de los sistemas agrícolas propuestos; rentabilidad de cambio de uso del suelo, en su caso; otros beneficios adicionales) y aspectos ambientales (consideraciones a la salud pública, consideraciones a la flora y fauna nativa, entre otras).

8.8 Escenarios para el aprovechamiento de las aguas residuales municipales en la cuenca del Río Fuerte

En el presente estudio se pretende mostrar tres escenarios para el reuso de las aguas residuales municipales en la cuenca del Río Fuerte. Estos escenarios fueron definidos en función del tamaño de la comunidad generadora de aguas residuales, el tipo de reuso y la disponibilidad de superficie. En todos los casos, la calidad del efluente debe cumplir con los límites establecidos en la NOM. Los tres escenarios definidos son

1. Aguas residuales municipales de la ciudad de Los Mochis, con tratamiento biológico convencional, para riego agrícola y/o lavado de suelos salinos.
2. Aguas residuales municipales de la ciudad de Los Mochis, en una combinación de tratamientos, biológico convencional y humedales, para riego agrícola y/o aprovechamiento acuícola.

3. Aguas residuales doméstica, para poblaciones con menos de 10,000 habitantes, con sistema de humedales, para riego de solares, huertos familiares y/o disposición segura de efluentes.

8.8.1 Tratamiento biológico convencional, para riego agrícola

En este escenario se plantea el uso de un sistema de tratamiento biológico convencional, similar al mostrado en la Lámina 11. Para este escenario y el siguiente, se debe considerar que se requiere de superficies del orden de 200 ha para el tratamiento de los caudales estimados (1.29 m³/s), y la calidad deseada del efluente para reuso en riego (Cuadro 1).

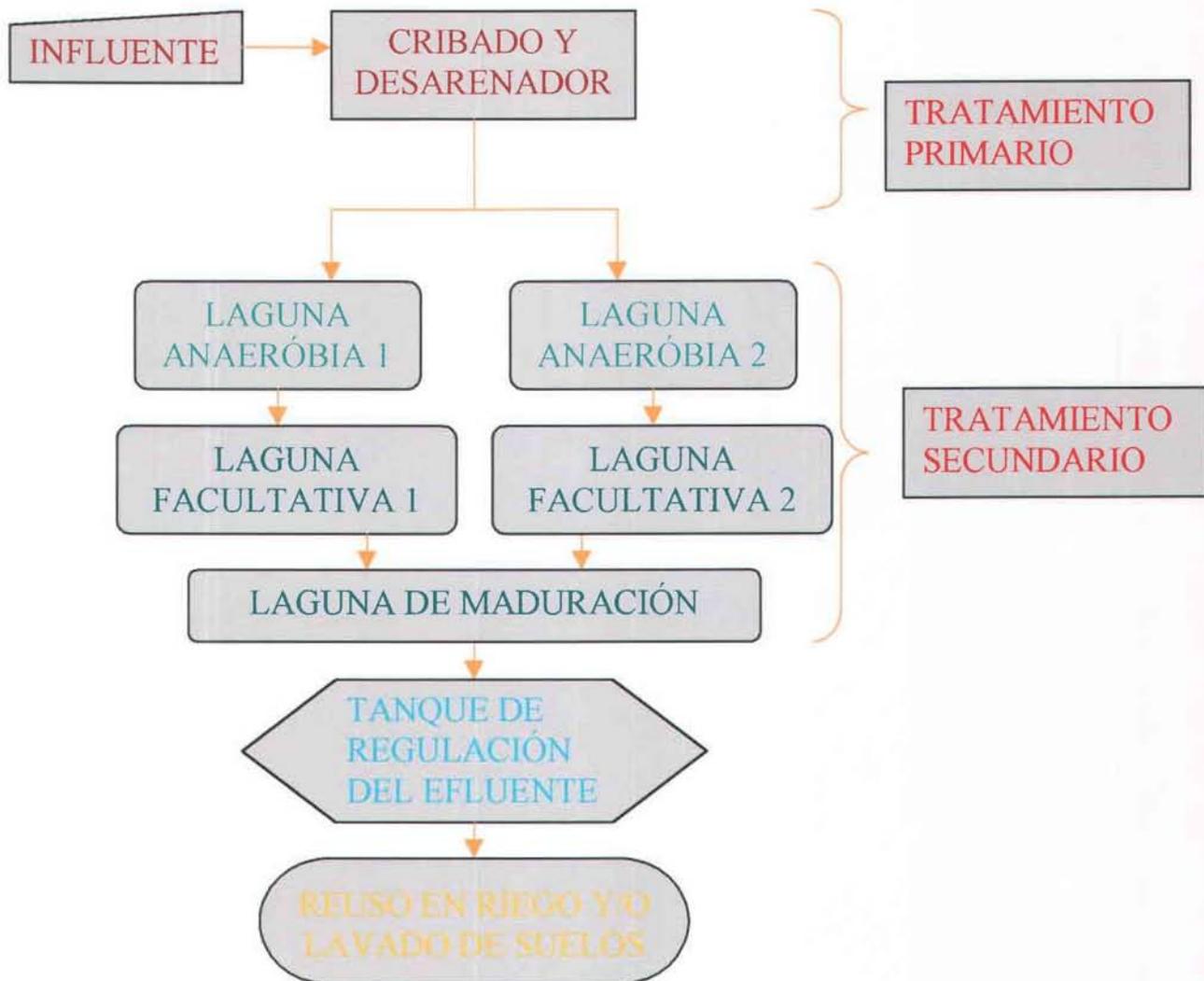


Lámina 8. Escenario general de tratamiento biológico convencional y reuso de las aguas residuales municipales de la ciudad de Los Mochis, Sinaloa.

La primera etapa de este sistema (Lámina 8) consiste en un tratamiento primario, compuesto de una criba, para separar desechos sólidos mayores, y un desarenador, para

sedimentar los sólidos suspendidos más pesados. En esta etapa solo se removerá del 35 al 50% de la DBO, y del 50 al 70% de los sólidos suspendidos totales.

En una segunda etapa, el tratamiento secundario consiste en una serie de lagunas de oxidación, cada una con objetivos diferentes. Las primeras lagunas proporcionan condiciones ideales (lagunas profundas, de 1.5 a 3 m) a los microorganismos anaerobios para que realicen la mineralización de la materia orgánica de los lodos que continúan sedimentándose. Se deben de diseñar para tener tiempos de retención (generalmente de 20 a 30 días) que permitan alcanzar este objetivo. En esta etapa se removerá la mayor parte de la DBO, y una parte de los microorganismos patógenos.

Las segundas lagunas se van a diseñar para que proporcionen otras condiciones (lagunas menos profundas), de modo que ahora los microorganismos aeróbios predominen, y promuevan la oxidación de los compuestos reducidos que provienen de las condiciones de anaerobiosis de las lagunas anteriores. En esta etapa, el efluente debe resultar prácticamente cristalino pero no libre de concentraciones altas de microorganismos patógenos.

La tercera laguna o laguna de maduración, proporciona condiciones (lagunas poco profundas) para el desarrollo de algas fotosintéticas que seguirán reduciendo la concentración de coliformes fecales y huevos de helmintos hasta un nivel que estará en función del tiempo de retención. Incluso pueden reducir significativamente los niveles de nitrógeno, dependiendo de la temperatura ambiente y del tiempo de retención.

Finalmente, el efluente deberá almacenarse en un tanque de regulación, para después ser distribuido para el riego de las parcelas de cultivo. Con la calidad bacteriológica esperada (Cuadro 1), podrán regarse cultivos anuales no restringidos, aunque este efluente debe ser analizado para determinar las concentraciones de aniones y cationes mayores, aunque deberá ponerse especial énfasis en la conductividad eléctrica, sodio, boro, y nitrógeno.

El efluente podrá también ser reutilizado para el lavado de suelos ensalitrados en proceso de recuperación, ya que para estas prácticas se requiere de gran cantidad de agua. Este proceso deberá ser previamente evaluado desde las condiciones iniciales de calidad de suelo y agua, y realizado bajo un programa de trabajo establecido.

Dado que los suelos de la zona son predominantemente arcillosos, el efluente final deberá ser adecuadamente aplicado, de modo que se minimicen los riesgos de contacto directo con los agricultores, la población cercana y los consumidores de los productos. Para ello, se requerirá de un estudio de factibilidad mas detallado que contemple consideraciones agronómicas, de salud pública y viabilidad socioeconómica (ver Anexo 5).

8.8.2 Tratamiento combinado para riego agrícola y acuicultura.

El esquema mostrado en la Lámina 9, consiste en el mismo tratamiento primario que en el esquema mostrado en 8.8.1. El tratamiento secundario presenta una variante con respecto al esquema propuesto en el primer esquema, y que consiste en que, después de las lagunas

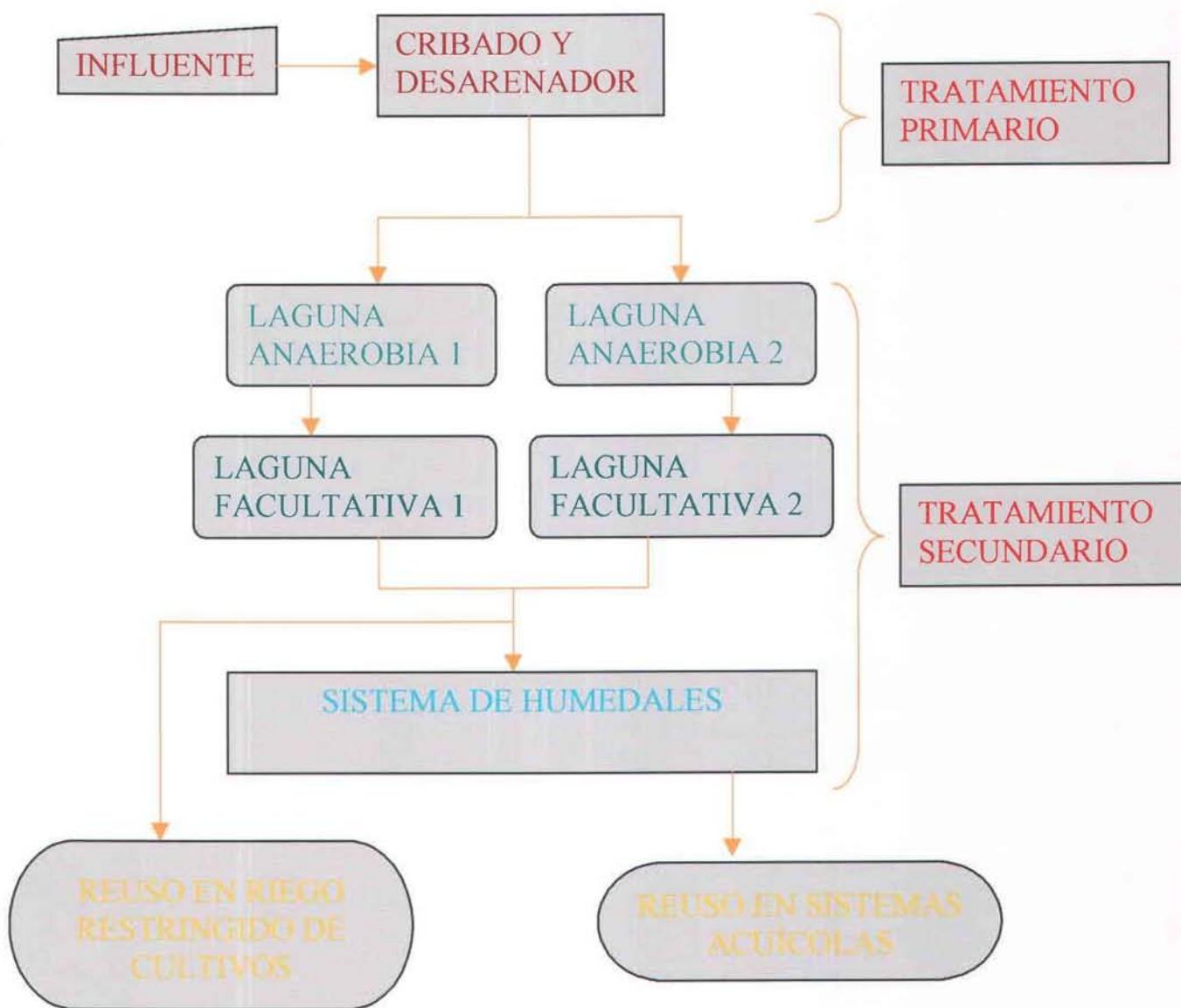


Lámina 9. Escenario general de tratamiento biológico combinado y reuso de las aguas residuales municipales de la ciudad de Los Mochis, Sinaloa.

facultativas, se proponen dos alternativas de reuso. La primera es que el efluente se utilice para riego restringido (ver Anexo 5); y la segunda alternativa de reuso es continuar el tratamiento mediante un sistema de humedales (ver Anexo 4).

Un humedal es un sistema natural de tratamiento de aguas residuales domésticas en el cual se utilizan plantas vivas en toda la superficie del lecho, a través de las cuales se hace pasar el agua residual para filtrarla y depurarla (Lámina 12). Dependiendo del diseño del humedal, la calidad del agua puede alcanzar diversos niveles de tratamiento, siendo que en algunos casos se alcanzan niveles de DBO, sólidos suspendidos y nitrógeno, tan bajos como 5, 5, y 1 mg/L, respectivamente.

En México, esta tecnología está poco desarrollada, y las experiencias documentadas se encuentran en países de latitudes altas, donde las temperaturas ambientales son bajas con respecto a países que se ubican en los trópicos. Este hecho hace que las perspectivas de estos sistemas en México y en otros países del área sean muy promisorias. Una posible desventaja de este sistema es la necesidad de disponer de mayores extensiones de terreno para su establecimiento, con respecto a los sistemas biológicos convencionales (lagunas de oxidación).

En el presente esquema se propone un humedal para producir efluente que pueda ser reutilizado en acuicultura, que es una actividad que está creciendo en la región costera del noroeste de México, y que es muy redituable para los pobladores de la zona. Además, se minimizan los riesgos a la salud pública, y existe disponibilidad de superficie para su establecimiento.

Todas las aguas de drenaje agrícola descargan a los esteros, siendo ahí donde se cultivan ciertas especies como camarón y ostión, que son especies que se consumen en crudo, y en algunos casos son productos de exportación. Estas aguas llevan gran cantidad de agroquímicos, producto de las aplicaciones realizadas en la zona del distrito de riego, y tienden a acumularse en los esteros, donde se encuentran las mencionadas granjas acuícolas.

Como en el primer esquema propuesto, se deberá de realizar un estudio de factibilidad más detallado que contemple consideraciones técnicas, de salud pública y viabilidad socioeconómica e impacto ambiental.

8.8.3 Tratamiento con humedales para poblaciones menores de 10,000 habitantes.

Para este escenario se propone un sistema para tratar el agua residual doméstica de comunidades menores a 10,000 habitantes (Lámina 10), que es el tamaño de comunidad dominante en la cuenca del Río Fuerte. Se asume que no existen descargas de tipo industrial aguas arriba de las fuentes de abastecimiento de estas comunidades.

El sistema consiste en un cribado y un desarenador del influente para retirar residuos sólidos mayores. Dado que la mayoría de las comunidades cuentan con fosas sépticas, éstas pueden realizar la labor de un estanque anaerobio o biodigestor. El agua debe ser bombeada al humedal para que sea depurada. Dependiendo del volumen de agua generado, y del reuso que se destine, el efluente del humedal puede ser conectado una laguna facultativa para recibir una mayor depuración.

Finalmente, el efluente puede ser captado en un tanque de regulación para su disposición final en riego de huertos familiares, jardines, o descargado a una corriente natural (Lámina 13).

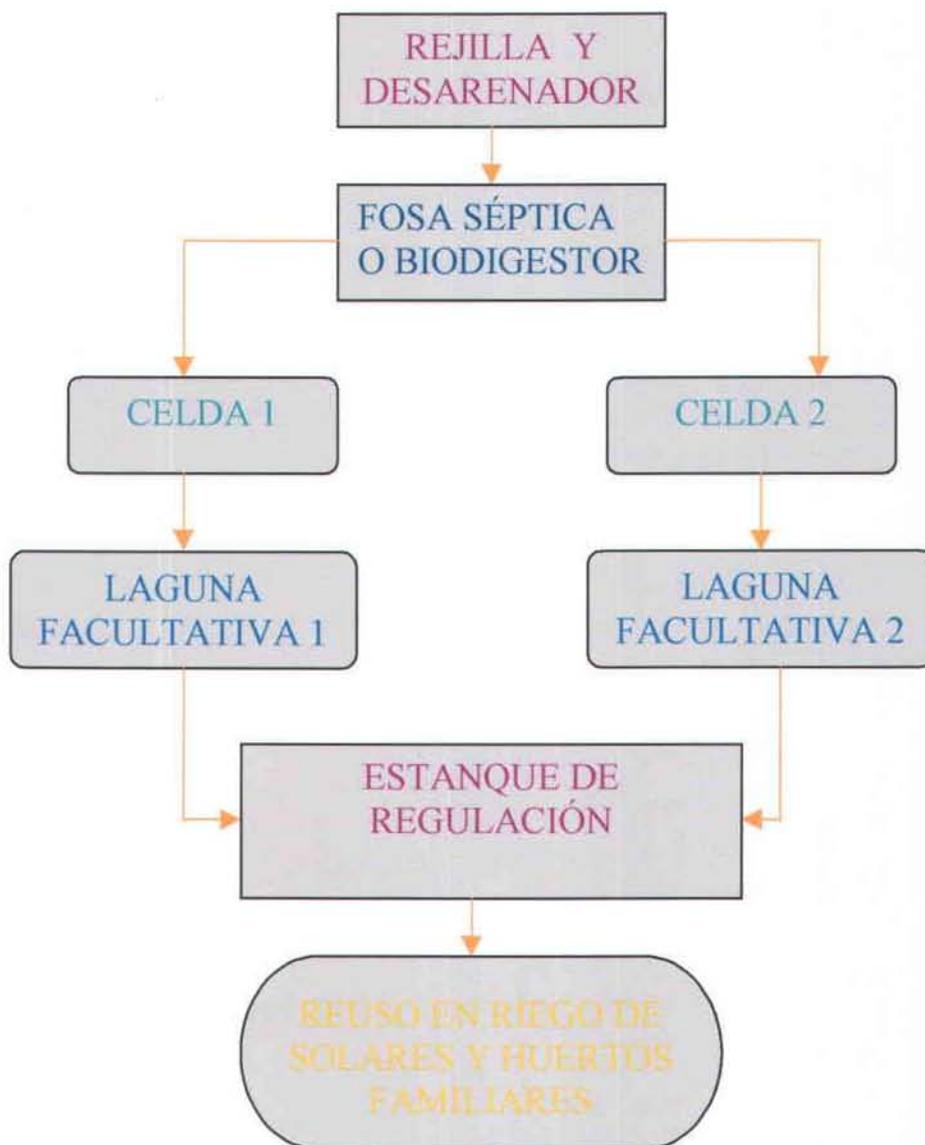


Lámina 10. Escenario general de tratamiento biológico, y reuso de las aguas residuales domésticas en comunidades con menos de 10,000 habitantes.



Lámina 11. Vista parcial de una planta de tratamiento con un sistema biológico convencional.



Lámina 12. Un sistema de humedal para tratar agua residual municipal.

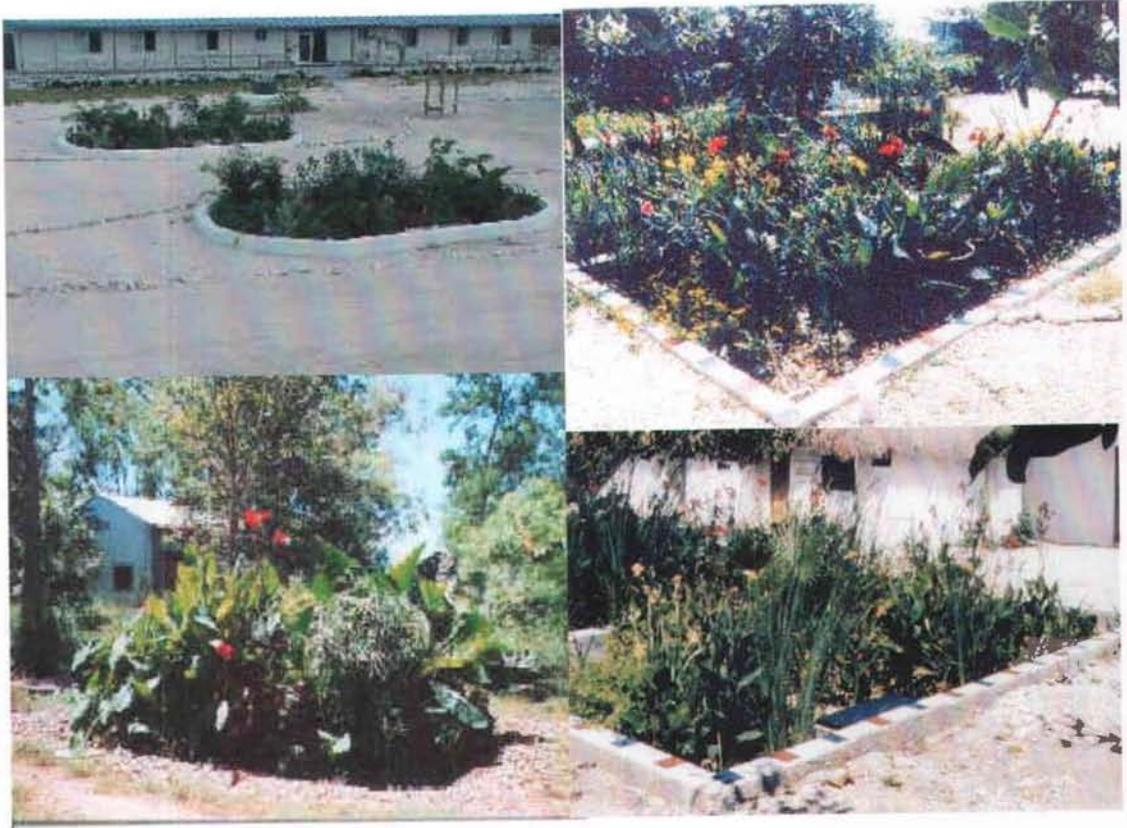


Lámina 13. Humedales para tratar agua residual doméstica.

9. CONCLUSIONES

El reuso de las aguas residuales municipales en agricultura se ha convertido en una necesidad real, que debe ser considerada como una alternativa viable, segura y redituable para el ahorro de agua limpia, siempre y cuando se establezcan proyectos bien diseñados para cumplir con necesidades específicas de la zona, y para cumplir con los límites establecidos en las normas oficiales sobre la calidad del efluente, en cuanto a salud pública, carga orgánica carga de nutrientes.

Es muy importante considerar que las aguas residuales de origen industrial deben de recibir un pretratamiento interno (dentro de la misma industria) antes de ser descargadas a los cuerpos de agua, de modo que las concentraciones de tóxicos, característicos para cada giro industrial, sean disminuidas hasta niveles establecidos por las normas oficiales, y poder después considerar estas descargas como descargas municipales, y puedan ser tratadas como tales en los sistemas de tratamiento municipal.

Los sistemas de tratamiento a establecer deben estar diseñados en función de las condiciones específicas de la zona problema, es decir, del caudal de aguas residuales (máximo, medio y mínimo) a tratar, la calidad inicial del influente y la calidad final del efluente, el clima local, el tipo de reuso, la disponibilidad de superficie, la disponibilidad de mano de obra calificada de acuerdo al sistema a implantar, y al resultado de un análisis socioeconómico.

Por lo anterior, cada área de estudio requerirá de un tren de tratamiento muy específico, de acuerdo a sus condiciones. En otras palabras, no debe existir un recetario de sistemas de tratamiento, sino un análisis detenido de opciones, y cuyas decisiones finales estarán en función de consideraciones técnicas, de salud pública y socioeconómicas. En general, a mayor nivel de calidad de agua deseada y caudal a tratar, mayor será el costo de tratamiento.

El reuso de los efluentes en agricultura deberá realizarse en áreas previamente seleccionadas, a través de un estudio de factibilidad, el cual debe considerar factores del suelo y subsuelo, métodos de riego adecuados al caso, calendarización de cultivos a establecer, y practicas agronómicas que deberán incorporarse o modificarse, para que, de esta manera, el sistema de producción pueda recibir dichos efluentes, de modo que no representen riesgos mayores para la salud de los agricultores, consumidores y cualquier persona que tenga contacto con los cultivos producidos.

El tipo de reuso es el principal factor que va a condicionar el nivel de tratamiento que deba recibir determinada agua residual, y ésto a su vez, determinará el sistema de tratamiento a implantar. En el presente estudio, aparte del reuso en riego, se da el ejemplo del reuso en acuicultura, siendo ésta una necesidad específica de la zona de estudio. Será necesario, en ciertos casos, que el reuso se deba dirigir a otros fines, como pueden ser, el industrial, riego de áreas forestales, producción en viveros y para fines recreativos.

ANEXO 1

1. ANTECEDENTES SOBRE EL USO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN MÉXICO

La superficie actual bajo riego en México es de 6.1 millones de ha, correspondiendo 3.3 millones de ha a los distritos de riego, de las cuales 156,5 mil ha son regadas con agua residual. Actualmente se puede considerar que más del 60% de las aguas residuales generada en las grandes ciudades, se aprovechan en el riego agrícola. Este es el caso de las aguas residuales provenientes de las ciudades de México, D. F., Monterrey, N. L., Torreón, Coah., Gómez Palacio, Dgo., Salamanca, Gto., Ciudad Juárez, Chih., Culiacán Sin., Orizaba, Ver., Puebla, Pue., León, Gto., Monclova, Coah., Tijuana, B. C. N., y Hermosillo, Son., entre otras (Solís y Longoria, 1981; Orta, 1984).

Como un producto desecho, el agua residual, contiene una gran cantidad de elementos, algunos considerados como nutrientes, pero otros son tóxicos y biológico-infecciosos, y que restringen su aprovechamiento. Desde la década de los 50, se iniciaron trabajos de investigación sobre el uso de aguas residuales en el riego, con el propósito de conjuntar la relación de los conocimientos teóricos con la experiencia obtenida sobre aspectos relacionados con la calidad del agua, el tipo de suelo, y la calidad sanitaria del cultivo. Estos estudios se realizaron principalmente en los distritos 003 Tula, Hgo., 100 Alfajayucan, Hgo., 041 Río Yaqui, Son. y en zonas cercanas a Texcoco, Edo de México, Xochimilco, D. F., General Escobedo, N. L., y Naucalpan, Edo. de México; (Orta, 1984; Arias, 1989; De la Parra, 1991; Comisión Nacional del Agua, 1995; Díaz, 1996).

1.1 Desarrollo histórico del riego en el Valle del Mezquital

En el Valle del Mezquital, Hgo., se inició en 1896 el riego con aguas residuales provenientes de la Ciudad de México, específicamente en las áreas de Tlaxcoapan y Tlahuelilpan. En 1920, se regaron 10 mil ha con agua residual en la parte central del Valle, y para 1926 se había incrementado la superficie regada a 14 mil ha. En 1950, con el funcionamiento del túnel de Tequixquiac, se aumentó la superficie de riego a 28 mil ha. La captación y almacenamiento de aguas residuales provenientes de la Ciudad de México en la presa Endhó, permitió que para 1960 se regaran 38.5 mil ha.

Con la apertura al riego de la zona Bojay en 1972, se incrementó la superficie de riego a 39.5 mil ha. La construcción y funcionamiento de los canales el Centro, Chilcuautla y Xochitlán, y la zona de riego Alfajayucan, en 1977 permitió alcanzar una superficie regada de 66.4 mil ha. En 1979 se llegó a una superficie regada de 68.9 mil ha, gracias a la construcción de los canales el Tigre, Alto Tepetitlan, Chicavasco y Demacú,

En 1984 se aumentó la superficie regada a 71.4 mil ha gracias a la utilización de las aguas de los canales Xotho y el Salto Tlamanca, y con la ampliación de dichos canales en 1985, se logró regar 74.2 mil ha. En 1986, la construcción del canal Alto Alfajayucan permitió incrementar la superficie de riego a 75.4 mil ha, y para 1987 esta superficie alcanzó 85.1 mil ha. Con los proyectos Ajacuba, El Tumba, Artículo 127 y Tepatepec, la superficie de riego con agua residual se incrementó a 99.4 mil ha (Romero, 1988; Arias, 1989; Díaz, 1990.b; CNA, 1995).

1.2 Programas para el aprovechamiento de las aguas residuales

A principios de la década de los 80, se instrumentó el Plan Regidor para Aguas Residuales, dando congruencia al Plan Nacional de Desarrollo Industrial, que entre otros objetivos tenía reducir los problemas de reuso y recirculación de agua. Tomando ésto como marco de referencia, el Plan Regidor para Aguas Residuales, determinó las localidades que dentro de las zonas prioritarias tienen posibilidades de reuso y recirculación de agua (Cuadro 11).

Cuadro 11. Localidades con posibilidad de reuso y recirculación de agua, según prioridades.

ESTADO	LOCALIDAD
PRIORIDAD I A	
Michoacán	Lázaro Cárdenas
Oaxaca	Juchitán de Zaragoza y Salina Cruz
Tamaulipas	Ciudad Madero y Tampico
Veracruz	Coatzacoalcos, Minatitlán y Pánuco
PRIORIDAD I B	
Aguascalientes	Aguascalientes
Baja California Norte	Ensenada, Mexicali y Tijuana
Campeche	Campeche
Coahuila	Acuña, Piedras Negras, Monclova y Torreón
Colima	Manzanillo
Chihuahua	Chihuahua y Juárez
Chiapas	Tapachula y Tuxtla Gutiérrez
Durango	Gómez Palacio y Lerdo
Guanajuato	Celaya, Irapuato, León, Salamanca, Silao y Villagran
Jalisco	Lagos de Moreno
Querétaro	Querétaro
San Luis Potosí	Cd. Valles, Ebanos y San Luis Potosí
Sinaloa	Culiacán, Guasave, Ahome y Mazatlán
Sonora	Cananea, Empalme, Guaymas, Huatabampo y Nogales.
Tabasco	Cárdenas y Comalcalco
Tamaulipas	Mante, Matamoros, Nuevo Laredo, Río Bravo, Reynosa y Valle Hermoso
Veracruz	Acahualtán, Poza Rica, Tuxpan y Veracruz.
Yucatán	Mérida y Progreso
Zacatecas	Zacatecas

Fuente: Plan Regidor para Aguas Residuales, 1982.

El Plan Nacional Hidráulico jerarquizó localidades que presentan conflictos de disponibilidad de agua ante la creciente demanda, y otras con probabilidades de presentar dichos problemas en el futuro. En este contexto el Plan Regidor para Aguas Residuales, buscó dar atención precisamente a estas mismas localidades de manera coordinada (Cuadro 12).

Cuadro 12. Localidades con conflicto por disponibilidad de Agua.

Aguascalientes	Aguascalientes
Baja California Norte	Ensenada, Mexicali y Tijuana
Baja California Sur	La paz
Campeche	Campeche y Cd. Del Carmen
Coahuila	Coahuila, Nueva Rosita, Monclova, Saltillo y Torreón
Colima	Colima y Manzanillo
Chihuahua	Chihuahua, Juárez, Cuauhtémoc, Delicias e Hidalgo del Parral
Chiapas	Tuxtla Gutiérrez y Tapachula
Durango	Durango, Gómez Palacio y Lerdo
Guanajuato	Celaya, Salamanca, Guanajuato, León e Irapuato
Guerrero	Acapulco, Chilpancingo e Iguala
Hidalgo	Pachuca, Cd. Sahagún y Tulancingo
Jalisco	Guadalajara, Lagos de Moreno y Ocotlán
México	Toluca
Michoacán	Zamora, Morelia, Zitácuaro y Uruapan
Morelos	Cuatla y Cuernavaca
Nayarit	Tepic
Nuevo León	Monterrey
Oaxaca	Juchitán, Salina Cruz y Oaxaca
Puebla	Puebla y Tehuacan
Querétaro	Querétaro y San Juan del Río
Quintana Roo	Chetumal
San Luis Potosí	Matehuala, San Luis Potosí y Cd. Valles
Sinaloa	Guasave, Los Mochis, Culiacán y Mazatlán
Sonora	San Luis Río Colorado, Nogales, Hermosillo, Guaymas, Empalme, Cd. Obregón y Navjoa.
Tabasco	Cárdenas
Tamaulipas	Nuevo Laredo, Matamoros, Reynosa, Cd. Victoria, Cd. Mante, Cd. Madero y Tampico
Tlaxcala	Apizaco y Tlaxcala
Veracruz	Tuxpan, Poza Rica, Jalapa, Veracruz, Córdoba, Coatzacoalcos y Minatitlán
Yucatán	Mérida
Zacatecas	Fresnillo y Zacatecas

Fuente: Plan Regidor para Aguas Residuales, 1982.

1.3 Riego con aguas residuales en Distritos de Riego

En 1993 se estimaba una producción de aguas residuales domésticas en el país de 320 m³/s, de las cuales se aprovechaban 55 m³/s para el riego de 156,000 ha, siendo en su mayoría aguas crudas. De la superficie regada, 82, 900 ha se encuentran distribuidas en siete distritos de riego, correspondiendo 43,000 ha al DR 003, Tula, Hgo.; 3,000 ha al DR 009, Cd. Juárez, Chih.; 300 ha al DR 028, Tulancingo, Hgo.; 17,600 ha al DR 030, Valsequillo, Pue.; 4,300 ha al DR 088,

Chiconautla, Méx.; y 14,700 ha al DR. 100, Alfajayucan, Hgo. (Arango y Molina, citados por Romero, 1993; Overseas Development Administration, 1995).

Según datos de las Gerencias Regionales de la Comisión Nacional del agua en 1996, se tenía registrada una superficie de 188,224 ha regadas con aguas residuales, beneficiando a 86,579 usuarios (Cuadro 13).

Cuadro 13. Superficie de riego con aguas residuales según distrito y número de beneficiarios.

Distrito de Riego	Sup. Registrada (ha)	No. de usuarios beneficiados
003 Tula Hgo.	45,214	27,894
088 Chiconautla, Méx.	4,398	3,032
100 Alfajayucan, Hgo.	31,482	19,187
030 Valsequillo, Pue.	33,820	10,793
028 Tulancingo, Hgo.	1,178	451
009 Cd. Juárez, Chih.	16,000	2,876
016 Morelos, Mor.	35,188	17,867
052 Durango, Dgo.	20,944	4,479
Total	188,224	86,579

Fuente: CNA, 1996.

Para el año 2,000 se estimó una disponibilidad de 6,000 Mm³ de agua al año, de los cuales 1,800 eran aguas residuales industriales. Con respecto a éstas últimas, el 85% la producirán 5,000 industrias distribuidas en el país, principalmente las industrias azucarera (35%), química (22%), de la celulosa y papel (8%), la petrolera (7%) y las de bebidas, alimentos, textiles y siderúrgica (11%) (García, 1982).

La generación de aguas residuales urbanas e industriales presenta un potencial para ser utilizada en el riego agrícola de 1'055,000 ha. En el Cuadro 14 se presenta la posible utilización del agua residual en los distritos de riego del país (Overseas Development Administration, 1995).

Cuadro 14. Posible distribución sobre la utilización potencial del agua residual en distritos de riego.

DISTRITOS DE RIEGO	SUPERFICIE ACTUAL (HA)
003, Tula Hgo.	50,000
009, CD. Juárez, Chih.	14,500
010, Culiacán-Humaya, Sin.	223,000
011, Alto Río Lerma, Gto.	102,000
016, Estado de Morelos	34,600
017, Región Lagunera.	150,000
020, Morelia y Queréndaro, Mich.	33,900
026, Bajo Río San Juan, Tamps.	79,500.
028, Tulancingo, Hgo.	800
030, Valsequillo, Pue.	16,200
041, Río Yaqui, Son.	93,800
061, Zamora, Mich.	17,900
075, Valle del Fuerte, Sin.	223,000
082, Río Blanco, Ver.	1,600
100, Alfajayucan, Hgo.	14,200
Superficie total potencial	1'055,000

Fuente: Overseas Development Administration, 1995.

Las actividades con mayor demanda de agua son la agricultura, la industria y el abastecimiento público. Dado que la actividad que hasta la fecha demanda un mayor volumen de agua es la agricultura de riego, el Plan Nacional Hidráulico estimó los requerimientos de agua que se tendrían en dicho sector en el año 2000, los cuales serán de 94,597 millones de m³.

Actualmente la agricultura de riego utiliza aprovechamientos superficiales y subterráneos en un 66 y 34% respectivamente para suplir sus requerimientos. Según datos de la SARH (1990), los principales cultivos en cuanto a superficie sembrada e importancia económica fueron los cereales (Cuadro 15).

Cuadro 15. Principales cultivos y su consumo de agua.

Cultivo	Consumo promedio, m ³ /ha
Trigo	9,311
Cártamo	5,822
Frijol	7,095
Soya	9,437
Maíz	7,326
Ajonjolí	6,070
Sorgo	7,723
Arroz	20,475

Fuente SARH, 1990.

Estos altos consumos se deben a que en los distritos de riego del país, aún se tiene muy baja eficiencia en el uso del agua de riego, es decir, aplicación excesiva de láminas de riego por desconocimiento de los requerimientos hídricos reales de los cultivos, preparación inadecuada de los terrenos y del trazo de riego, mala calidad del agua, costos subvaluados en el riego, etc. En el país la eficiencia de conducción media es del orden del 60%, la eficiencia en la aplicación a nivel de parcela es de 55%, y la eficiencia global en los distritos de 33% aproximadamente (Peña *et al.*, 1999).

ANEXO 2

2. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL

El agua residual presenta concentraciones elevadas de diversos compuestos, que pueden tener efectos adversos sobre los suelos, cultivos, y el medio ambiente (Cuadro 16). La interacción de éstos compuestos da como resultado las propiedades específicas del agua residual, algunas de las cuales se denominan parámetros o variables de referencia en la normatividad oficial mexicana, y son empleadas en la clasificación física, química y biológica del agua (Arias, 1989; Díaz, 1990).

Cuadro 16. Características relevantes del agua residual y su interpretación.

PARÁMETROS FÍSICOS	INTERPRETACIÓN
Temperatura	Daña y provoca la muerte a seres vivos cuando rebasa ciertos valores.
Color	Orienta sobre la presencia de algunos contaminantes físicos y químicos.
Olor	Indirectamente señala contaminación por derivados del azufre y nitrógeno.
Turbiedad	Su presencia afecta la infraestructura de riego y modifica las características del suelo.
Sólidos	Afectan las presiones osmóticas del suelo, planta y organismos vivos, produce azolvamiento, disminuyen la concentración de oxígeno disuelto (OD), cambian la geometría del receptor de agua.
Grasas y aceites	Forman películas superficiales que impiden la transferencia de oxígeno y paso de la luz, aumentan la demanda bioquímica de oxígeno y forman lodos que afectan la vida del fondo
Oxígeno disuelto	Su ausencia indica contaminación orgánica
PARÁMETROS QUÍMICOS	
pH	Condiciona la disponibilidad de nutrientes para los cultivos.
Sales solubles	Afecta la presión osmótica y afecta la infraestructura de riego.
Elementos nutricionales	Contiene una elevada cantidad de elementos necesarios para el crecimiento de las plantas.
Substancias activas al azul de metileno	Señala contaminación por detergentes, provoca sobrepoblación de la flora acuática.
Metales pesados y plaguicidas	Provoca toxicidad, cambios en la estructura celular de los organismos y son potencialmente cancerígenos.
PARÁMETROS BIOLÓGICOS	
Virus	Provocan infecciones y enfermedades virales como cólera y diarreas.
Bacterias	Producen infecciones y enfermedades como enteritis, fiebres, tifoidea, disentería bacilar.
Protozoarios	Crean enfermedades como giardiasis, esquistosomiasis, parasitosis.
Helmintos	Provocan enfermedades como la parasitosis.
Demanda bioquímica de oxígeno	Señala las cargas orgánicas biológicamente degradables del agua.
Demanda química de oxígeno	Señala las cargas orgánicas de desechos totales del agua

Fuente: SRH, s/f. a; SRH, s/f. b; SRH, s/f. c; Kowal *et al.*, 1980; Shuval *et al.*, 1986; Cortéz, 1990; Strauss, 1991; Pescod, 1992.

Las diferentes actividades económicas desarrolladas por los distintos sectores del país producen aguas residuales con características propias (Cuadro 17), y en cantidades diversas. En cuanto al origen del agua residual, el sector industrial las produce en los sistemas de enfriamiento, sistemas de enjuague y procesamiento, el sector municipal y de servicios produce aguas residuales de uso doméstico, de las redes de alcantarillado, rastros municipales y edificios públicos, mientras que el sector agropecuario genera aguas residuales de granjas agrícolas, porcícolas y piscícolas y aguas de retorno agrícola (Maturano, 1988).

Cuadro 17. Principales contaminantes del agua residual según su origen.

SECTOR	SUBSECTOR	PRINCIPALES CONTAMINANTES
Industrial	Industria azucarera	Sólidos orgánicos en suspensión y disueltos, hojas, cachaza, guarapo, vinaza.
Industrial	Industria petroquímica	Petróleo crudo o productos elaborados, sólidos suspendidos, amoniaco, fenoles, sulfuros, pH altos, trazas de tetracetileno de plomo, mercaptanos.
Industrial	Industria de la celulosa y del papel	pH elevados o muy bajos, colores oscuros, materia orgánica disuelta y en suspensión, metales pesados.
Industrial	Industria petrolera	Materia orgánica disuelta y en suspensión, compuestos de azufre orgánico, ácidos orgánicos, compuestos asfálticos, aceites, polímeros, resinas, emulsiones de aceite, cera, jabones, ésteres, materia inorgánica en suspensión.
Industrial	Industria de fundición del hierro y acero	Suspensión de sólidos inorgánicos, escoria de fierro, metales pesados.
Industrial	Industria textil	Sólidos orgánicos en suspensión y disueltos.
Industrial	Industria alimenticia	Sólidos orgánicos en suspensión, cáscaras, semillas, pulpas, hojas, tallos.
	Industria vitivinícola	Materia orgánica en suspensión y disueltas, bagazo, semilla, granos.
Industrial	Industria de la extracción y beneficio de minerales no metálicos	Sólidos sedimentables, grasa, aceites, sólidos suspendidos y disueltos, sustancias activas al azul de metileno, material flotante, metales pesados.
Industrial	Termoeléctrica	Calor
Municipal y de servicios	Usos doméstico y municipal.	Materia orgánica disuelta y en suspensión, grasas, jabones, detergentes, pH muy bajos o elevados, alcalinidad y nutrientes
Agropecuario	Agropecuario	Materia orgánica disuelta, agroquímicos, plaguicidas, semillas, rastrojo, grasas, detergentes, alcalinidad

Fuente: Tejeda, 1985; Cortéz y Bravo, 1980; Maturano, 1988; Arias, 1989; Díaz, 1990.

2.1 Carga contaminante

Se define como la cantidad de un contaminante, expresada por el aporte de unidades de masa por unidad de tiempo, en una descarga de aguas residuales. En México, se han identificado estas cargas para las descargas municipales e industriales (Cuadro 18).

Cuadro 18. Carga contaminante generada por descargas municipales e industriales.

Descargas Municipales			Descargas Industriales		
Rango de Población	Número	Carga orgánica generada (%)	Rango de carga contaminante DBO y SST (ton/día)	Número	Carga orgánica generada (%)
>50,000 hab.	139	72	>3.0	294	80
De 20,001 a 50,000 hab.	181	5	1.2 a 3.0	506	15
De 2501 a 20,000 hab.	2,266	14	<1.2	31,657	5
Totales	2,586	91		32,457	100

Fuente: Contreras y Vázquez, 1999.

2.2 Contaminantes básicos

Son aquellos compuestos y parámetros que se presentan en las descargas de aguas residuales y que pueden ser removidos o estabilizados mediante tratamientos convencionales. Se consideran dentro de éste rubro a grasas y aceites, materia flotante, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nitrógeno total (suma de las concentraciones de nitritos y nitratos, expresadas en mg/L de nitrógeno), fósforo total, temperatura y pH.

2.3 Contaminantes patógenos

Son aquellos microorganismos, quistes y huevos de parásitos que pueden estar presentes en las aguas residuales, y que representan un riesgo a la salud humana, flora o fauna. En lo que corresponde a la norma oficial NOM-ECOL-001, sólo se consideran a los coliformes fecales y los huevos de helminto (Cuadro 19).

Cuadro 19. Límites máximos permisibles para contaminantes patógenos presentes en agua para riego agrícola.

Parámetros	Concentración, NMP/100 ml	
	promedio mensual	promedio diario
coliformes fecales	1,000	2,000
	Concentración, huevos/litro	
	riego restringido	riego no restringido
huevos de helmintos	1	5

Fuente: NOM-ECOL-001-96.

2.4 Otros contaminantes

Aunque en pequeñas cantidades, y dependiendo del origen del agua residual, ésta puede contener líquidos volátiles, que por lo general hierven a menos de 100 grados centígrados, por ejemplo, la gasolina.

ANEXO 3

3. ASPECTOS LEGALES PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES

La legislación en materia de calidad del agua tiene como objetivo preservar y mejorar la calidad de las aguas nacionales y posibilitar su uso eficiente.

Las aguas residuales en México fueron concesionadas a los productores agrícolas antes de que la Ley Federal de Aguas las definiera y regulara. La concesión a los productores agrícolas y su uso se llevaba a cabo sin ningún control sanitario. La presencia de infecciones y enfermedades en zonas agrícolas atribuidas al agua residual de riego, motivó que se elaboraran y aplicaran criterios, reglamentos y normas para el uso y aprovechamiento de las aguas residuales para uso agrícola.

La primera clasificación de las aguas residuales incluía tres categorías (Orta, 1984):

1. Adecuada, uso que no representa riesgos aún en las condiciones más adversas de suelo, clima o cultivo.
2. Condicionada, agua cuya aplicación puede causar afectación si no cumplen ciertas condiciones o cuando por su calidad, aún con clima y cultivo adecuado, afecta al suelo si se aplican incorrectamente lavados o mejoradores.
3. No recomendable, aguas con sustancias tóxicas en exceso, y donde es necesario un tratamiento.

Las disposiciones jurídicas relativas a la contaminación de aguas tuvieron su origen en la Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental y el Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación de Aguas. Estos ordenamientos tuvieron vigencia de 1971 a 1982. Posteriormente, el 11 de febrero de 1982 entró en vigor la Ley Federal de Protección al Ambiente que abrogó las anteriores (Hernández, 1988).

En el Reglamento de 1971 no se exponen normas específicas para la calidad de las aguas residuales y los cuerpos receptores donde son vertidas. No obstante, consideraba tres etapas: Etapa 1, Inventario de descargas de aguas residuales; Etapa 2, Revisión de las instalaciones para verificar descargas de acuerdo con los informes preliminares de ingeniería; Etapa 3, Clasificación de cuerpos receptores en función de su uso y establecimiento de condiciones particulares de las descargas en los cuerpos clasificados (Cuellar y Martínez, 1978).

Con el Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación de Aguas, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 29 de marzo de 1973, el Estado interviene de manera más firme en la inspección y vigilancia del uso de las aguas y su disposición en el ambiente. El Artículo 8 de dicho reglamento, solicita a los responsables de descargas residuales el nombre y domicilio, punto de descarga con su respectivo croquis, características físicas, químicas y bacteriológicas de las aguas residuales, gastos máximos, promedio y mínimos y la descripción general de los dispositivos y plantas de tratamiento. El Artículo 13 del mismo reglamento incluye los máximos tolerables de sólidos suspendidos (1.0 mg/L), y grasas y aceites (70 mg/L).

Las altas demandas de agua por parte de la actividad agrícola de riego, han obligado a los productores a reusar el agua residual proveniente de otras actividades, de manera cruda o mezclada con aguas blancas. Por ello, desde 1982 el Plan Regidor para Aguas Residuales, estableció criterios de calidad del agua (Cuadro 20), y de manera paulatina a través del tiempo, éstos han sufrido modificaciones en virtud de las condiciones prevalecientes. Las distintas instituciones encargadas de regular este uso, han emitido una normatividad para llevar un mejor control de este uso y disminuir el riesgo que el manejo de aguas residuales sin tratamiento o contaminadas puede traer como consecuencia a la salud pública.

Cuadro 20. Criterios de Calidad del Agua para Uso Agrícola en 1982.

PARÁMETRO	UNIDADES	CONCENTRACIÓN MÍNIMA	CONCENTRACIÓN MÁXIMA
Arsénico	mg/L	---	0.050
Bario	mg/L	---	0.1
Cadmio	mg/L	---	0.1
Cianuro	mg/L	---	0.5
Cobre	mg/L	---	0.2
Cromo	mg/L	---	0.1
Fierro	mg/L	---	5.0
Flúor	mg/L	---	2.0
Manganeso	mg/L	---	0.2
Mercurio	mg/L	---	0.000146
Nitratos	mg/L	---	0.1
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	---	0.05
Plata	mg/L	---	0.250
Plomo	mg/L	---	5.0
Selenio	mg/L	---	0.02
Sulfato	mg/L	---	200
Zinc	mg/L	---	2.0
Alcalinidad (Ca CO ₃)	mg/L	---	30
Dureza (Ca CO ₃)	mg/L	---	500
Oxígeno Disuelto	mg/L	4	—
Sólidos disueltos	mg/L	---	1000
Sólidos suspendidos	mg/L	---	100
Coliformes fecales	NMP/100 ml	---	1000
pH	Unidades	5	9
Turbidez	UT	---	10
Aldrín	mg/L	---	0.0000076
Clordano	mg/L	---	0.001343
DDT	mg/L	---	0.0000024
Dieldrín	mg/L	---	0.0000079
Endrín	mg/L	---	0.002
Heptacloro	mg/L	---	0.00001
Toxafeno	mg/L	---	0.000007

Fuente: Plan regidor para aguas residuales 1982.

Para 1986, la Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), emitió el Reglamento Para la Prevención y Control de la Contaminación de las Aguas, determinando los límites máximos permisibles de las descargas a los cuerpos receptores superficiales en función del uso. En el Cuadro 21 se muestran los límites máximos para el uso agrícola.

Cuadro 21. Valores máximos permisibles de las descargas a los cuerpos receptores en 1986.

PARÁMETROS/UNIDADES	LÍMITES PERMISIBLES
pH	6.0 – 9.0
Temperatura, ° C.	30
Coliformes fecales NMP/100 ml	1000, 2,000 prom. mensual, menor 4,000
Grasas y aceites	Ausencia de película visible
Materia flotante	Ausente
Arsénico, mg/L	0.050
Boro, mg/L	0.7
Cadmio, mg/L	0.1
Cobre, mg/L	0.2
Cromo hexavalente, mg/L	0.1
Plomo, mg/L	5.0
Selenio, mg/L	0.02

Fuente: Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecología, 1986.

Con la publicación de la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), del 28 de enero de 1988, se actualiza la normatividad para la prevención de la contaminación del agua, ampliándose hacia la prevención de la contaminación del suelo. En el Artículo 119 de ésta ley se presentan diez ordenamientos, entre los que sobresalen aquellos que indican "el promover el reuso de aguas residuales tratadas en actividades agrícolas e industriales" y "la expedición de normas técnicas ecológicas para el uso y aprovechamiento de aguas residuales". Éste último ordenamiento es el antecedente directo de las Normas Oficiales Mexicanas en materia de protección ambiental. En el Artículo 121 de la LGEEPA, se menciona que no podrán descargarse o infiltrarse en cualquier cuerpo o corriente de agua o en el suelo o subsuelo, aguas residuales que contengan contaminantes sin previo tratamiento y sin el permiso de la autoridad federal o local.

En 1990, la Comisión Nacional del Agua publicó el Manual Técnico para el Uso, Aprovechamiento y Manejo de Aguas Residuales en Riego Agrícola, donde especifica los límites máximos permisibles de contaminantes en agua residual para riego agrícola (Cuadro 22), con la finalidad de normar el uso de dichas aguas en los distritos de riego. En dicho manual se señala que el aprovechamiento de las aguas residuales debe considerar aspectos de calidad del agua, tipo de cultivo, forma de riego, características del suelo, existencia o uso de infraestructura hidroagrícola, acuíferos, cuerpos receptores de excedentes de riego, localización de los asentamientos humanos e impacto ambiental.

Cuadro 22. Límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales para riego agrícola en 1990.

PARÁMETROS	Niveles máximos permisibles (mg/L), excepto cuando se indique otra.
Acreolina	0.1
Aldrín	0.02
Aluminio	5.0
Antimonio	0.1
Arsénico	0.1
Bicarbonatos	100.0
Berilio	0.1
Boro	0.7
Cadmio	0.01
Carbonato de sodio residual (meq/l)	2.5
Cianuro	0.02
Clordano	0.003
Cloruros	147.5
Cobre	0.2
Conductividad eléctrica (mS/m)	1000.0
Cromo hexavalente	1.0
DDE	0.04
Dieldrín	0.02
Fierro	5.0
Fluoruros (como F)	1.0
Fosfato total	5.0
Heptacloro	0.02
Níquel	0.2
Nitratos	0.1
Nitrógeno total	30.0
Plomo	5.0
Potasio	250.0
pH, unidades	4.5 – 9.0
Relación de Adsorción de Sodio (sin unidades)	18.0
Salinidad efectiva	15.0
Salinidad Potencial	15.0
Selenio (como selenato)	0.02
Sodio (meq/L)	250.0
Sólidos disueltos	500.0
Sólidos suspendidos	50.0
Sulfatos	130.0
Toxafenos	0.005
Zinc	2.0
Radiactividad alfa total (Bq/l)	0.1
Radiactividad beta total (Bq/l)	1.0

Fuente: Comisión Nacional del Agua. 1990

Además, en el manual antes mencionado, se clasifica el agua residual en función del uso y el contenido de coliformes fecales en las siguientes categorías:

- a) Uso libre, cuando los contenidos de coliformes fecales sean menores de 10^3 NMP/100 ml y no exista presencia de un huevo de helminto viable/l para todas las hortalizas con intervalos mínimos entre el último riego y la cosecha de 15 días.

- b) Uso semicondicionado, cuando los contenidos de coliformes fecales sean de 10^3 a 10^5 NMP/100 ml de agua; para cultivos de arroz, vegetales que se consuman cocinados, vegetales que se consuman crudos, ajo, cebolla y aquellos que no tengan contacto con el agua de riego.
- c) Uso condicionado, cuando los contenidos de coliformes fecales sean mayores de 10^5 NMP/100 ml/agua, para cultivos forrajeros excepto arroz; granos para producción de semillas, cultivos para procesamiento industrial, silvicultura, ornato, industriales y frutales.

En 1993, la SEDUE publicó los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales de origen urbano o municipal que se dispongan mediante riego agrícola (Cuadro 23).

Cuadro 23. Límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales para agricultura en 1993.

Parámetros	Límites máximos permisibles, en mg/L, excepto cuando se indique otra.
pH	6.5 - 8.5
Conductividad eléctrica (micromhos/cm)	2,000
Demanda bioquímica de oxígeno	120
Sólidos suspendidos totales	120
Aluminio	5.0
Arsénico	0.1
Boro	1.5
Cadmio	0.01
Cianuros	0.02
Cobre	0.2
Cromo	0.1
Fierro	5.0
Fluoruros	3.0
Manganeso	0.2
Níquel	0.2
Plomo	5.0
Selenio	0.02
Zinc	2.0

Fuente: SEDUE, 1993.

3.1 Norma Oficial Mexicana, NOM-ECOL-001-96

Con base en las reuniones de Engelberg, Suiza en 1985, y en Adelboden y Ginebra, Suiza en 1987, la OMS, en colaboración con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, financiaron y publicaron directrices orientadas a combatir la propagación de enfermedades transmisibles de origen microbiológico, que incluyen medidas para evaluar los riesgos sanitarios del uso del agua residual en la agricultura (OMS, 1989). Entre estos riesgos se consideró la protección a los productores agrícolas, el riesgo de consumo de productos regados con agua residual y las prácticas de manejo de agua y suelo (Romero, 1988; Mara y Cairncross, 1990).

En México en la actualidad tiene vigencia la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (Cuadro 24), que fue publicada en el Diario Oficial de la Federación, con fecha 6 de Enero de 1997. Dicha norma tiene como objeto proteger la calidad del agua y posibilitar sus usos y su observancia es obligatoria para los responsables de dichas descargas. Ésta especifica los tipos de cuerpos receptores y fija los límites máximos permisibles para contaminantes básico, patógenos y tóxicos. Así como los tiempos de cumplimiento en función del tipo de descarga y la concentración de contaminantes.

La NOM-ECOL-002 especifica el control y tratamiento de las descargas a los sistemas de alcantarillado municipal. Su objetivo es el control de contaminantes de tipo municipal, y proteger la infraestructura del alcantarillado y los propios sistemas de tratamiento.

La NOM-ECOL-003 se refiere al uso de las aguas residuales tratadas, y su objetivo es proteger la salud de los usuarios así como al medio ambiente de los subproductos del tratamiento.

Los criterios para el uso y manejo de las aguas residuales en la agricultura, se han basado en los efectos causados por los constituyentes del agua residual al sistema suelo-planta-animal-hombre, en las prácticas de manejo que contribuyen a la atenuación de posibles efectos adversos al sistema agrícola y en las concentraciones permisibles para los constituyentes del agua residual (Alvarez, 1988). Estos criterios permitieron elaborar guías sobre el efecto y beneficio de las aguas residuales utilizadas en el riego, que incluyeron la aportación de nutrientes, la carga orgánica, la transmisión de patógenos, la acumulación de tóxicos en la cadena alimenticia, la calidad del suelo, la acumulación de sales, la eficiencia de los tratamientos propios del suelo y la contaminación de acuíferos (Ramírez, 1988).

Otros criterios consideran la dosis mínima infecciosa de la bacteria entérica, la relación del número más probable de coliformes fecales contra la concentración de bacterias entéricas (Rico et al., 1988). y parámetros físicos y químicos contra la presencia de microorganismo patógenos en forma específica para sitios determinados (Leal y Vázquez, 1988).

Cuadro 24. Límites máximos permisibles para contaminantes básicos en riego agrícola en 1997, según la NOM-ECOL-001.

PARÁMETROS	Ríos		Embalses		Suelos	
	PM*	PD**	PM	PD	PM	PD
Temperatura °C (1)	NA	NA	40	40	40	40
Grasas y aceites (2)	15	25	15	25	15	25
Materia flotante (3)	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos sedimentables	1	2	1	2	1	2
Sólidos suspendidos totales	150	200	75	125	75	125
Demanda Bioquímica de oxígeno	150	200	75	150	75	150
Nitrógeno total	40	60	40	60	40	60
Fósforo total	20	30	20	30	20	30

(1) Lectura instantánea

(2) Muestra simple Promedio Ponderado

(3) Ausente según el método de prueba definido en la NMX-AA-006

NA = No Aplicable

(A), (B) Tipo de cuerpo receptor de acuerdo según la Ley Federal de Derechos

Fuente: Diario Oficial de la Federación del 6 de Enero de 1997.

ANEXO 4

4. ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES

En el país se generan al año 7.4 km^3 ($239 \text{ m}^3/\text{s}$) de aguas residuales municipales, de las cuales sólo 5.89 km^3 se recolectan en el alcantarillado ($187 \text{ m}^3/\text{s}$). La infraestructura de tratamiento con que cuenta el país tiene una capacidad instalada de $63 \text{ m}^3/\text{s}$, con 914 plantas de tratamiento. La capacidad en operación es de $41 \text{ m}^3/\text{s}$. Con una operación adecuada de las plantas se obtiene un gasto de $29.3 \text{ m}^3/\text{s}$, por lo que se descargan sin tratar $146 \text{ m}^3/\text{s}$. De las aguas residuales industriales se estima una generación de $5.36 \text{ km}^3/\text{año}$ equivalentes a $170 \text{ m}^3/\text{s}$, sin considerar las descargas de las centrales termoeléctricas. El caudal de aguas residuales industriales tratado es de sólo $0.69 \text{ km}^3/\text{año}$ ($21.9 \text{ m}^3/\text{s}$), lo que representa el 13% de lo generado, existiendo 1,314 plantas de tratamiento de aguas residuales industriales (Castillo, 2000).

Lo apropiado es tratar el efluente de aguas residuales antes de ser usado en la agricultura, a fin de cumplir con los lineamientos de calidad microbiológica y fisicoquímica a bajo costo y con requerimientos mínimos de operación y mantenimiento.

Al seleccionar un sistema de tratamiento es importante contar con una buena caracterización del agua residual a utilizar, conociendo su concentración de materia orgánica, el volumen de agua a tratar, la temperatura del agua y del medio ambiente a lo largo del año y las características fisicoquímicas y bacteriológicas que debe cumplir de acuerdo a la ley vigente en materia de agua o bien a las condiciones particulares de descarga. Por ejemplo de manera general para seleccionar un sistema de tratamiento de aguas municipales, que se sabe que en el mayor de los casos son aguas domésticas con escasa presencia de sustancias tóxicas, y gran parte de sus componentes son considerados biodegradables, se puede seleccionar algún proceso biológico. Por lo tanto, el aprovechamiento de las aguas residuales dependerá de la calidad requerida y de la selección adecuada del proceso para eliminar los contaminantes (Cuadro 25). Dichos procesos pueden ser físicos, químicos o biológicos:

- a) Procesos físicos, estos incluyen cribado, mezclado, adsorción, desorción, transferencia de gas, flotación, sedimentación y filtración.
- b) Procesos químicos, que utilizan la adición de reactivos químicos que permiten la precipitación química, el ajuste de pH, la coagulación y la desinfección.
- c) Procesos biológicos, en los cuales la remoción de los contaminantes se realiza a través de la oxidación biológica de la materia orgánica.

Los procesos fisicoquímicos, por lo general, son aplicados en aguas con contaminantes inorgánicos o con materia orgánica no biodegradable; los procesos biológicos se usan cuando los contaminantes son biodegradables. En éstos, la materia orgánica es usada como alimento de las bacterias que la degradan. La desinfección es usada en el tratamiento del agua residual y en la potabilización. En la industria la desinfección se utiliza para disminuir el problema de incrustaciones en las tuberías y la proliferación de bacterias en el procesamiento de alimentos. La precipitación se usa en aguas residuales industriales o domésticas para ablandarlas y remover los iones solubles como PO_4^{3-} .

Actualmente se utilizan procesos combinados para el tratamiento de las aguas residuales, como la coagulación-floculación que involucra procesos químicos y físicos. Una de las ventajas es que mediante este tipo combinado de procesos se logran remociones de 80 al 90% del total de la materia suspendida, del 40 al 70% de DBO_5 , 30 al 60% de DQO, y del 80 a 90% de bacterias, con respecto a la cantidad de sólidos coloidales presentes en el agua residual.

Sin embargo el tratamiento más importante, desde el punto de vista de la salud pública es el terciario que permite la destrucción de patógenos, a través de la desinfección. En muchos países, el cloro es el desinfectante mas común, tanto para agua residual como para agua blanca. La cantidad de cloro a agregar se determina empíricamente, con base a la calidad del efluente

(concentración de coliformes fecales) y al cloro residual deseado. Sin embargo, la destrucción de virus por cloro es altamente variable; de hecho, los virus son más resistentes al cloro que las bacterias, y más resistentes aún son los parásitos mayores (Pettygrove y Asano, 1985).

La desinfección se utiliza para eliminar microorganismos dañinos y normalmente se encuentra al final de las etapas de tratamiento de las aguas residuales, es un proceso delicado que requiere atención para evitar la formación de compuestos no deseados. En la desinfección se utilizan métodos físicos como la temperatura, luz ultravioleta; o bien químicos en los que se usan sustancias como cloro, el ozono y iones metálicos.

Entre las condiciones que debe cumplir un buen desinfectante están la capacidad para destruir patógenos, no ser tóxico al ser humano o al medio ambiente, de seguro y fácil manejo y aplicación, y no reaccionar con los compuestos presentes en el agua para producir sustancias tóxicas.

El cloro es inofensivo al ser humano cuando se ingiere en pequeñas cantidades, hasta de 50 ppm en períodos cortos de tiempo. Cuando el contenido de cloro en el agua es superior a 0.1 ppm, se tendrá un sabor característico. La cantidad de cloro libre a utilizarse en la desinfección del agua residual se establece mediante el método de índice o demanda de cloro, y el punto de quiebre o ruptura. La demanda de cloro es la cantidad mínima de éste elemento para tratar el agua, considerando la existencia de cloro libre al cabo de un tiempo determinado, normalmente 2 horas. La diferencia entre la demanda y la dosis de cloro libre se llama cloro eficaz. El punto de ruptura es la dosis de cloro a partir de la cual se destruyen los compuestos formados por éste y la materia orgánica.

El dióxido de cloro está considerado como una buena opción para la desinfección de las aguas residuales. Entre las ventajas de utilizar este desinfectante es que es más efectivo en la destrucción de virus, y no genera trihalometanos (THM) ni cloraminas que pueden afectar la salud o el medio ambiente. Según (Venosa-Russell, 1986) es ideal para riego agrícola, sin embargo debido a su alta reactividad y poder de explosividad no es posible almacenarlo, por lo que requiere de prepararlo *in situ*. Otra desventaja es su alto precio, lo que incrementa los costos de producción.

El ozono, como desinfectante, se ha utilizado mucho antes que el cloro. Sus principales ventajas son su alta efectividad en la remoción de virus y quistes, que no produce olores o sabor extraños, y su producto de descomposición es el oxígeno disuelto. Sin embargo, sus desventajas son su alto consumo de electricidad en su producción, se debe producir y emplear al momento, ya que no es posible almacenarlo, y es difícil adaptarlo a las variaciones de carga y calidad del influente. Bajo condiciones controladas el 99% de los polivirus pueden ser eliminados con 0.1 mg/L de ozono residual en 10 segundos, y si se utilizara cloro en la misma concentración, se requerirían 10 minutos.

La radiación ultravioleta es una onda electromagnética que abarca de los 180 a los 400 nm de longitud de onda, y se utiliza comúnmente como desinfectante, donde el haz luminoso descompone las proteínas contenidas en los ácidos ribonucleicos (RNA) y desoxirribonucleico (ADN) de la célula, y de ésta forma evita que la información genética se replique, y por lo tanto los microorganismos no se pueden reproducir. Esta técnica es relativamente nueva y entre sus ventajas están que constituye una buena opción, tanto por su efectividad, como por su costo razonable. No produce residuos tóxicos, disminuye el contenido de materia orgánica y destruye la cloraminas. La desventaja es que requiere de agua de buena calidad, con bajos contenidos de sólidos suspendidos y materia disuelta.

Cuadro 25. Tipo de contaminantes y su remoción de acuerdo al proceso o sistema de tratamiento.

TIPO DE CONTAMINANTES	Proceso o sistema de tratamiento	Clasificación de los métodos de tratamiento
Sólidos suspendidos	Cribado y desmenuzado Sedimentación Flotación Filtración Coagulación y sedimentación	Físicos Químicos y físicos
Orgánicos biodegradables	Lodos activados Filtro percolador Biodiscos Lagunas aeradas Lagunas de oxidación Filtración en arena	Biológicos Físicos y biológicos Biológicos, químicos y físicos
Patógenos	Cloración Ozonación	Químicos Químicos
Nitrógeno	Nitrificación y desnitrificación con biomasa suspendida Nitrificación y desnitrificación con biomasa fija Arrastre con amoníaco Intercambio iónico	Biológicos Biológicos Químicos y físicos Químico
Fósforo	Coagulación y sedimentación con sales metálicas Coagulación y sedimentación con cal Remoción bioquímica	Químicos y físicos Químicos y físicos Biológicos y químicos
Orgánicos refractarios	Adsorción con carbón activado Ozonación	Físicos Químicos
Metales Pesados	Precipitación química Intercambio iónico	Químicos
Sólidos Inorgánicos Disueltos	Intercambio iónico Ósmosis inversa Electrodialisis	Químicos Físicos Químicos

Fuente: Noyola, *et al.* (2000).

4.1 Tratamientos convencionales

Los tipos de tratamiento que deben usarse para purificar el agua residual y sus eficiencias de operación dependen, en última instancia, de los constituyentes del agua residual cruda y de las concentraciones admitidas para los usos designados del efluente final. Para poder llegar a éstas decisiones, deben poderse definir las metas en cuanto a calidad del agua en términos cuantitativos precisos (McJunkin, 1988).

Los tratamientos convencionales se clasifican en dos tipos dependiendo del tipo de energía utilizada:

- a) Convencionales o mecanizados: dependen de la energía eléctrica para llevar a cabo sus procesos principales, y su infraestructura necesaria ocupa poco espacio.
- b) Naturales: aprovechan la energía generada por el sol y el viento, así como las características químicas de los suelos y el agua, sólo que requieren de amplios espacios de terreno para su infraestructura.

Dentro de los sistemas de tratamiento convencionales se destacan los lodos activados, los filtros rociadores o percoladores; y los discos biológicos rotativos. Dentro de los sistemas de tratamiento

naturales se encuentran las lagunas de estabilización, los sistemas con plantas acuáticas flotantes y los humedales.

El objetivo del tratamiento preliminar es la remoción de sólidos y otros materiales grandes que a menudo se encuentran en el agua residual cruda. La remoción de dichos materiales es necesaria para mejorar la operación y el mantenimiento del tren de tratamiento. En este preliminar existe un cribado que separa las partículas de gravilla y otros materiales grandes.

4.1.1 Tratamiento primario

El tratamiento primario, el cual simplemente es un proceso de sedimentación, tiene solamente un efecto limitado sobre la remoción de la mayoría de las especies biológicas presentes en las aguas residuales. En este proceso, se sedimentarán algunos de los organismos mas grandes y pesados, como los huevos de helmintos y quistes de protozoarios. Los microorganismos asociados a las partículas grandes serán eliminados junto con el material sedimentable. Entre el 50 y el 90% de los huevos y quistes son eliminados por sedimentación primaria, mientras que, en ocasiones, apenas el 25% de las bacterias alcanzan a ser eliminadas. En conclusión, el tratamiento primario de aguas residuales no reduce significativamente los niveles de bacterias y virus (Fair *et al.*, 1968, en Pettygrove y Asano, 1985).

Por medio de este tratamiento se separan o eliminan aproximadamente entre el 40 a 60% de los sólidos suspendidos, mediante el fenómeno físico de asentamiento, utilizando para ello los tanques de sedimentación; en este primer segmento del tren de tratamiento se pueden agregar algunos productos químicos comerciales que permiten eliminar hasta el 80% de los sólidos suspendidos.

Los tanques de sedimentación utilizados en este sistema de tratamiento, por su diseño y operación se clasifican en:

1. Tanques sépticos, se usan para disminuir la velocidad de flujo bajo condiciones anaerobias, con un período de retención de 12 a 24 horas.
2. Tanques de doble acción como el Imhoff, su propósito es evitar que los sólidos que han sido separados se mezclen nuevamente y proporcionar un efluente adecuado para un tratamiento ulterior.
3. Tanques de sedimentación simple con eliminación mecánica de lodos, éstos cumplen la función de separar los sólidos sedimentables hasta en un 95% y retirarlos a intervalos frecuentes para evitar descomposición y formación de gases.
4. Clarificadores de flujo ascendente, con eliminación mecánica de lodos

Para el tratamiento primario se utilizan tanques de sedimentación o clarificadores, de forma redonda o rectangular, normalmente tienen de 3 a 5 m de profundidad, y se utiliza un tiempo de retención hidráulica entre 2 y 3 horas.

Entre las ventajas del tratamiento primario está que aproximadamente 25 a 50 % de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), 50 al 70% de los sólidos suspendidos totales (SST) y el 65% de los aceites y grasas son removidos. Algunos constituyentes orgánicos como el nitrógeno y fósforo, y algunos metales pesados asociados a los sólidos, son también removidos, pero su desventaja es que las partículas coloidales y disueltas no son afectadas.

En muchos países industrializados, el tratamiento primario es el mínimo requerido para el riego con agua residual, considerando que el agua sea usada para regar cultivos que no sean de consumo humano, o para regar huertos de árboles de porte alto, viñedos y algunos alimentos que requieren procesarse antes de consumirse. Sin embargo para evitarse posibles problemas posteriores, normalmente añaden alguna forma de tratamiento secundario.

Pettygrove y Asano (1985) mencionan que los procesos convencionales de tratamiento biológico (filtros lentos, lodos activados, y lagunas de oxidación) reducen las cantidades de organismos

biológicos en aguas residuales crudas o sedimentadas, pero no los eliminan por completo. Los mecanismos de remoción son adsorción o predación. En general, los procesos de lodos activados son más efectivos para eliminar bacterias (90%) y virus (80-90%), que los filtros lentos (50-90% para ambos casos). Aunque por otro lado, los filtros lentos eliminan alrededor del 30% de huevecillos de solitaria y 99% de quistes de *Entamoeba histolytica*, mientras que el proceso de lodos activados han mostrado ser incapaces de eliminar dichos huevecillos y quistes. Sin embargo, todos los tipos de tratamiento secundario pueden remover más del 90% de los organismos coliformes patógenos.

En la mayoría de los casos de plantas de tratamiento grandes (con capacidad de tratamiento de más de 7600 m³/día) los lodos primarios son tratados por procesos biológicos con digestión anaerobia y bacterias facultativas, los lodos generados son reducidos antes de su disposición final. Los digestores anaerobios usados en este proceso normalmente tienen un tamaño de 7 a 14 m de profundidad. Los tiempos de residencia varían, pero todos tienen un mínimo de 10 y hasta 60 días; en esta etapa se produce gas metano que puede recuperarse y utilizarse como combustible.

4.1.2 Tratamiento secundario

Este tratamiento se utiliza para mejorar la calidad de las aguas, al eliminar los restos de sólidos en suspensión o solución. Aquí los microorganismos aeróbicos se encargan de degradar la materia orgánica hasta transformarla en inorgánica o en sólidos orgánicos estables. Los dispositivos utilizados para el tratamiento secundario se dividen en:

- 1) Filtros goteadores con tanques de sedimentación secundaria, son dispositivos que ponen en contacto a las aguas residuales con cultivos biológicos, por lo que también se les conoce como lechos de oxidación biológica.
- 2) Tanques de aeración con la modalidad de lodos activados con tanques de sedimentación simple o con la modalidad de aeración por contacto.
- 3) Filtros de arena intermitentes.
- 4) Estanques o lagunas de estabilización.

El objetivo principal del tratamiento secundario es remover materia orgánica coloidal y sólidos disueltos, usando procesos biológico-aeróbicos, con bacterias que metabolizan la materia orgánica del agua residual de modo que se producen más microorganismos y productos inorgánicos como bióxido de carbono (CO₂), amoníaco (NH₃) y agua (H₂O). Estos procesos se caracterizan por tener algunas ventajas, como requerir de pequeños reactores, y algunas desventajas es que requiere de una alta concentración de microorganismos aeróbicos.

El proceso de lodos activados se emplea después de la sedimentación simple. Las aguas residuales en este paso todavía contienen sólidos suspendidos y coloidales, de manera que cuando se agitan en presencia de aire, los sólidos forman núcleos sobre los cuales se desarrolla la vida biológica, pasando a formar partículas sólidas más grandes, que son los lodos. Entre las ventajas del tratamiento con lodos activados se puede esperar una eficiencia de 80 a 95 % medida por el abatimiento de la DBO y los sólidos suspendidos.

Los lodos activados son flóculos parduscos formados por materia orgánica y bacterias aeróbicas. En este proceso es necesario mantener en suspensión a los lodos con las aguas residuales, por lo cual el proceso de lodos activados consta de las siguientes etapas:

- 1) Mezclado
- 2) Aeración y agitación
- 3) Separación de lodos
- 4) Recirculación de las cantidades adecuadas de los lodos
- 5) Disposición del exceso de lodos activados

Aereación por contacto

En este proceso de tratamiento secundario de las aguas residuales, también actúan bacterias aeróbicas para degradar la materia orgánica. Las unidades de aereación son tanques que contienen cierto número de placas delgadas, hechas de diversos materiales como el aluminio y el asbesto. Las láminas se colocan verticalmente, y con una pequeña separación entre ellas, así el agua residual pasa a través de ellas, mezcladas por un sistema difusor de aire, lo que crea las condiciones para el trabajo que realizan las bacterias.

Filtros de arena intermitente

Consisten en lechos de arena, en los cuales pueden aplicarse de manera intermitente efluentes de tratamiento primario o de los tanques de sedimentación secundaria. Estos filtros retienen las partículas más finas de sólidos suspendidos, además de actuar como unidades de oxidación. En este proceso de oxidación también intervienen bacterias aeróbicas.

El efluente una vez pasado por el filtro de arena, saldrá estable, transparente y cristalino casi completamente oxidado y nitrificado. Entre sus ventajas destacan la eliminación global del 95% o más de la DBO, así como de los sólidos suspendidos.

Lodos activados

El principio básico de este proceso consiste en poner las aguas residuales en contacto con una población microbiana mixta, en forma de suspensión floculenta en un sistema aereado y agitado. La materia en suspensión y la coloidal del agua son eliminadas por adsorción y aglomeración a los flóculos microbianos. Estos últimos forman los lodos, que al final son separados del agua por sedimentación, etapa a la cual se le conoce como clarificación.

En los procesos de lodos activados, el reactor es un tanque de aereación, donde las aguas residuales y los microorganismos son mezclados vigorosamente por un dispositivo de aireación, normalmente se utilizan difusores sumergidos. Entre sus ventajas destaca que el tiempo de retención hidráulica normalmente va de 3 a 8 horas, pero puede ser aumentado en aguas residuales con alta demanda de oxígeno. Variaciones al proceso de lodos activados son: aereación extendida y zanjas de oxidación.

Aereación extendida

Se utiliza para tratar aguas residuales que contienen altas cantidades de materia orgánica soluble, donde las bacterias requieren de tiempos de retención más prolongados para desdoblar las sustancias complejas que contienen estas aguas. Una de las ventajas de este proceso es que se producen menos lodos de desecho y es un sistema simple de operar.

Zanjas de oxidación

También son una variante de la aeración extendida; se utilizan dispositivos como los cepillos rotatorios para transferir el oxígeno necesario al reactor. Se utilizan para el tratamiento de aguas residuales con una carga de aproximadamente 0.2 kg de DBO/m³/día, y tiempo de retención de hasta 4 días. La ventaja de este proceso es que produce pocos lodos, se requiere poca inversión para su construcción, y su desventaja es que requiere de una buena superficie de terreno para su establecimiento.

Discos biológicos rotativos

Este proceso utiliza discos plásticos o placas de plástico corrugado, los cuales al girar entran en contacto con el agua de desecho, los microorganismos presentes forman una película biológica en la superficie de los discos. La degradación de la materia orgánica se efectúa de forma aerobia. En

forma general el sistema de biodiscos esta formado por un sedimentador primario, los biodiscos y un sedimentador secundario.

Entre las principales ventajas del proceso de biodiscos están su bajo consumo de energía y la simplicidad de operación y mantenimiento. Con este sistema se eliminan los problemas de aerosoles y de ruido que se presentan en un sistema de lodos activados. Entre las desventajas de este sistema es que si no está bien construido se pueden presentar rompimiento y desanclaje de la flecha que soporta los discos.

Estanques de estabilización (Lagunas de Oxidación)

Estos son los sistemas de tratamiento de las aguas residuales más utilizados en todo el mundo ya que operan adecuadamente tanto en climas calurosos como en climas fríos, lo único que varía es la velocidad a la que operan con la temperatura, energía luminosa y otras condiciones locales. Este sistema se utiliza como tratamiento secundario de efluentes primarios. Sus ventajas son que es un sistema económico y fácil de operar, lográndose una buena calidad de las aguas tratadas. El único inconveniente de éste sistema es que requiere de buena superficie de terrenos impermeables y alejados de las zonas habitacionales.

La descomposición de la materia orgánica se realiza en dos fases:

- 1) La materia carbonosa es desintegrada por los microorganismos aeróbios con formación de bióxido de carbono, el cual es utilizado por las algas en el proceso de la fotosíntesis.
- 2) El oxígeno del bióxido de carbono es liberado y se disuelve en el líquido en el que se desarrollan las algas. El oxígeno liberado permite que continúe la descomposición aerobia.

Las lagunas o estanques de estabilización son medios simples y flexibles de tratamiento de aguas residuales. Estos sistemas se clasifican en función de su contenido de oxígeno, y en función del propósito a que sirvan.

Por su contenido de oxígeno las lagunas se clasifican como:

- a) Lagunas Anaerobias: Donde el proceso se efectúa con microorganismos anaerobios y facultativos.
- b) Lagunas Facultativas: El proceso se lleva a cabo con microorganismos aeróbios, facultativos y anaerobios, debido a que existe presencia de oxígeno en la superficie, pero en el fondo de la laguna prácticamente no existe.
- c) Lagunas Aeróbias: El proceso se efectúa mediante microorganismos aeróbios y facultativos.

El tratamiento del agua por medio de lagunas es por lo general un sistema combinado compuesto por los distintos tipos de lagunas con lo que se obtiene un efluente de buena calidad.

Las lagunas anaerobias soportan alta carga orgánica, poseen una profundidad de 2.5 a 5 m, el proceso de tratamiento es anaerobio en su totalidad. El efluente producido posee alto contenido de nitrógeno amoniacal y sólidos suspendidos, por lo que requieren pasar a una laguna facultativa o aerobia para mejorar la calidad del efluente.

Las lagunas facultativas se caracterizan por presentar oxígeno en la capa superficial de la masa líquida (condición aerobia), mismo que va disminuyendo hasta desaparecer en el fondo de la laguna (condición anaerobia). El proceso se efectúa mediante una combinación en la cual participan microorganismos aeróbios, anaerobios y facultativos.

Las lagunas aeróbias son tanques poco profundos donde las aguas residuales son degradadas por bacterias aeróbias y facultativas. De acuerdo a su uso, se distinguen tres tipos, de tasa alta, de tasa baja y de maduración.

- a) Lagunas aeróbicas de tasa alta, que tienen como objetivo la remoción de nutrientes y la remoción de desechos orgánicos solubles.
- b) Lagunas aeróbicas de baja tasa, cuya función es degradar los productos orgánicos solubles, y normalmente se usan para el tratamiento de efluentes secundarios.
- c) Laguna aeróbicas de maduración, en las cuales se mejora la calidad de los efluentes secundarios. Son utilizadas para la remoción de patógenos.

Las lagunas aeradas son utilizadas para el tratamiento biológico de aguas residuales. Existen dos tipos, la laguna aerobia-aerada, y la laguna facultativa-aerada. En ellas se utilizan difusores o algún otro equipo para suministrar la mayor transferencia de oxígeno, y lograr un buen mezclado. Comúnmente se asocia a esta laguna otra de sedimentación, que es útil en la remoción de sólidos suspendidos del efluente. Sin embargo para la remoción de los patógenos se requiere una laguna de maduración o bien agregar algún desinfectante.

Las ventajas del sistema de lagunas aeróbicas aeradas es que proporcionan un alto nivel de tratamiento en un corto tiempo, son resistentes a picos de carga orgánica, pero la desventaja de este sistema es el requerimiento de grandes espacios para su construcción.

Las lagunas son sistemas que por lo general se pueden diseñar con distintos propósitos, entre los que destacan la recarga de acuíferos por percolación en suelos adecuados, y como fuentes de agua para riego agrícola. Deben establecerse lejos de zonas habitacionales, comerciales o recreativas. Es recomendable establecer las lagunas a no menos de 500 metros del área residencial más cercana y si se utilizan lagunas anaerobias, ésta distancia debe incrementarse hasta 1 km. Las áreas ubicadas en los lechos de antiguos ríos o áreas con características topográficas y geológicas similares no deben ser utilizadas con sistemas lagunares a menos que:

- a) El efluente no vaya a ser reutilizado, y que la contaminación del agua subterránea no alcance una fuente directa de abastecimiento.
- b) El costo del revestimiento del sistema pueda ser cubierto.

No deberán considerarse a sitios con manto freático somero para la construcción de lagunas. Para mejorar la aireación del sistema, es recomendable construir las lagunas con su lado más largo paralelo a la dirección predominante del viento (Arthur, 1983).

Las lagunas poseen una serie de ventajas que las hacen ser el sistema de tratamiento predominante en la mayoría de los países, por ser sistemas sencillos, que no requieren de una especialización en el personal para operación y mantenimiento, requieren poca inversión para construcción, operación y mantenimiento, y su consumo de energía eléctrica es bajo. Se producen efluentes de calidad superior o similar a otros procesos convencionales. Su impacto ambiental es positivo al servir como refugio de fauna silvestre. Sus desventajas son que se pueden producir olores desagradables, requiere grandes extensiones de terreno, puede elevar los mantos freáticos de la zona, el efluente posee gran cantidad de sólidos que pueden dificultar su uso en riego presurizado.

En resumen, el factor más importante para la ubicación de una laguna es la disponibilidad de superficie y bajo costo de la misma. También debe estar cerca de los lugares de reuso o disposición. Su elevación debe ser menor a aquella del área poblacional, de modo que la descarga del agua residual a la laguna sea por gravedad. Idealmente, el sitio debe presentar pendientes ligeras y un suelo impermeable (Cuadro 26). Una baja infiltración de agua residual puede ser tolerada siempre y cuando el acuífero no sea utilizado como fuente directa de abastecimiento, es decir, la laguna puede ser construida sobre material más permeable. De hecho, las lagunas tienden a ser impermeables con el tiempo (Arthur, 1983).

Cuadro 26. Guía para interpretar suelos para lagunas de oxidación de aguas negras.

CARACTERÍSTICA DEL SUELO	LIMITACIÓN		
	Ligera	Moderada	Severa
Permeabilidad (cm/hr)	< 1.5	1.5 - 5.0	> 5.0
Profundidad al lecho rocoso (cm)	> 150	100-150	< 100
Profundidad a un horizonte endurecido (cm)	> 150	100-150	< 100
Inundación	No	—	Frecuente ¹
Pendiente (%)	< 2	2 - 7	> 7
Profundidad al nivel freático (cm)	> 150	100-150	< 100
Encharcamiento	—	—	Si
Fracción > 7.5 cm (% en peso) ²	< 20	20-35	> 35
Movimiento en masa	—	—	Si

¹ Si el agua de inundación no entra o daña a la laguna (por baja velocidad y poca profundidad), entonces no se toma en cuenta la inundación.

² Si el suelo tiene una capa de mas de 50 cm de espesor con una permeabilidad menor a 0.5 cm/hr, entonces no se considera la profundidad al nivel freático.

³ Promedio ponderado hasta los 50 cm

(Fuente: Natonal Soil Handbook, USDA-SCS, 1983; citado en CNA-IMTA, 1989).

4.1.3 Tratamientos avanzados:

El propósito de los procesos más avanzados de tratamiento es eliminar los componentes orgánicos e inorgánicos del agua residual. Entonces, la remoción de los contaminantes biológicos por estos procesos es sólo coincidental, y generalmente no es alta. Los tratamientos terciarios (coagulación, sedimentación y filtración + desinfección) son procesos que eliminan a la mayoría de los virus, y virtualmente a todos los microorganismos. La filtración resulta también efectiva para matar muchos parásitos mayores que son resistentes a los niveles de remoción alcanzados con los procesos de tratamiento convencionales (Sanitation Districts of Los Angeles County, 1977, en Pettygrove y Asano, 1985).

Los tratamientos avanzados incluyen principalmente la remoción de nutrientes, además del tratamiento de los lodos producidos en los tratamientos anteriores. Altas concentraciones de nitrógeno y fósforo en el efluente son consideradas como contaminantes, por lo que es necesario removerlos hasta concentraciones permisibles. Los fosfatos obstruyen los procesos de coagulación que son básicos en el tratamiento de las aguas residuales. Los fosfatos y nitritos favorecen la eutroficación de las fuentes de agua, y los nitritos y nitratos representan problemas varios de salud cuando afectan los acuíferos que son fuente de abastecimiento para consumo humano. El amoniaco posee una alta demanda de oxígeno interfiriendo en la cloración y llegando a ser tóxico para la fauna acuática.

a) Remoción de nitrógeno:

El nitrógeno en el agua residual se presenta en forma de nitritos, nitratos y amoniaco. La forma en que pueden ser removidos dichos compuestos puede ser por medio de tratamientos físicos, químicos y biológicos. Este último es actualmente el más económico. La remoción de estos

compuestos se realiza en dos fases, la nitrificación por medio de la cual el amoníaco oxida a nitritos y nitratos, y la desnitrificación donde los nitritos y nitratos son removidos.

b) Remoción de fósforo:

El fósforo en las aguas residuales se puede encontrar en forma de ortofosfatos, polifosfatos y compuestos de fósforo orgánico. Como fuentes de fósforo en las aguas residuales domésticas están los residuos de detergentes y los residuos humanos en descomposición. Como fuente de fósforo en las aguas residuales industriales están los residuos de fertilizantes fosforados y los acabados de metales. Además como un insumo en algunas industrias para el enfriamiento de calderas y circuitos, generan residuos contaminantes. Además el fósforo en el tratamiento de aguas residuales se encuentra formando parte del sobrenadante del proceso de digestión de los lodos.

La remoción del fósforo se puede realizar por procesos fisicoquímicos, que incluyen la adición de coagulantes como la cal o compuestos de aluminio y hierro. Los coagulantes se pueden añadir a varias etapas de los sistemas de tratamiento biológico, antes del asentamiento primario, en la etapa de aereación, o bien antes o después de la clarificación.

c) Tratamiento de los lodos

Los lodos se constituyen de los sólidos que se eliminan en las unidades de tratamiento primario y secundario, junto con el agua que se separa de ellos. Antes de su disposición final estos lodos requieren ser tratados. Los objetivos de tratar los lodos son, eliminar los excedentes de agua, y disminuir el volumen de ellos. Para lograr los objetivos antes mencionados se necesitan seleccionar y combinar, al menos dos de las siguientes opciones:

- 1) Espesamiento
- 2) Digestión, con o sin calor
- 3) Secado en lechos de arena, cubiertos o descubiertos
- 4) Acondicionamiento con productos químicos
- 5) Elutriación
- 6) Filtración al vacío
- 7) Secado mediante calor
- 8) Incineración
- 9) Oxidación húmeda
- 10) Flotación con productos químicos y aire
- 11) Centrifugación

En resumen para determinar el tipo de tratamiento a establecer se deben conocer (i) las características del agua residual con base en parámetros fisicoquímicos y biológicos; (ii) las necesidades de los usuarios, es decir, el uso que se vaya a destinar al agua tratada; (iii) las regulaciones establecidas por los organismos responsables, de acuerdo con la normatividad vigente y las condiciones particulares de descarga; (iv) la inversión requerida, (v) la superficie de terreno destinada para la construcción del sistema de tratamiento, y (vi) las necesidades y los costos de operación y mantenimiento requeridas para el adecuado funcionamiento del sistema.

4.2 Sistemas de tratamiento biológico

4.2.1 Tratamiento con macrófitas

La contaminación de los cuerpos de agua, debido al manejo inadecuado de las aguas residuales de origen industrial y urbano, ha promovido el desarrollo de tecnologías que coadyuven a mejorar la calidad de los efluentes sin causar alteraciones al ambiente.

Las macrófitas acuáticas han sido consideradas por varios autores como una plaga debido a su rápido crecimiento, ya que en ocasiones llegan a invadir lagunas enteras, generando varios problemas. Sin embargo, si las plantas acuáticas se manejan adecuadamente, su poder de proliferación, su capacidad de absorción de nutrientes y bioacumulación de otros compuestos, las convierten en una herramienta útil en el tratamiento de aguas residuales.

El tratamiento de aguas residuales utilizando plantas acuáticas, se basa en principios ecológicos, en donde los efluentes son tratados eficientemente mediante relaciones mutuas y coordinadas de flujo de energía y nutrientes, entre las plantas acuáticas y los microorganismos degradadores.

Actualmente, el tratamiento biológico ha adquirido mucha importancia, y se ha considerado como una de las alternativas económico-sociales y ambientales más adecuadas para las ciudades medianas y pequeñas que dispongan de tierras marginales.

Características de las plantas acuáticas y su potencial de absorción de contaminantes

Las plantas acuáticas se encuentran ampliamente distribuidas en el mundo, crecen asociadas a cuerpos de agua ricos en nutrientes o en suelos que están cubiertos con agua durante la mayor parte de la temporada de crecimiento.

Las plantas acuáticas han sido utilizadas para el tratamiento de aguas residuales en pantanos naturales o artificiales, donde proliferan considerablemente. El principio de este tipo de tratamiento consiste en que los compuestos presentes en el agua son absorbidos e incorporados dentro de la estructura de las plantas acuáticas, disminuyendo o eliminando la contaminación del agua y mejorando su calidad.

Las macrófitas acuáticas usadas actualmente para el tratamiento de las aguas residuales deben poseer las siguientes características:

1. Alta productividad.
2. Alta eficiencia de remoción de nutrientes y contaminantes.
3. Alta predominancia bajo condiciones naturales adversas.
4. Fácil cosecha

En México existen tres tipos de plantas acuáticas que son las más utilizadas:

1.- Lirio acuático (*Eichhornia crassipes*). Esta es una planta que flota sobre la superficie de arroyos y lagos de agua dulce; se considera libre ya que sus raíces no están fijadas a ningún sustrato. Posee una raíz de tipo plumosa, fibrosa y con muchas ramificaciones. El tallo es delgado, del cual parten los peciolo que son esponjosos e inflados, y que se encuentran rodeándolo. Las hojas son lobuladas de un color verde característico muy brillante; muchas veces el peciolo, y las hojas pueden estar sumergidas o no, y las inflorescencias parten de una espiga central.

Se ha demostrado que la productividad del lirio acuático está en función de la temperatura del aire, la disponibilidad de nutrientes (principalmente nitrógeno) y la densidad de la planta. Las bacterias asociadas a la raíz del lirio le permiten absorber más nutrientes, además la estructura de las plantas proveen sombra que impide el crecimiento de algas, permitiendo que actúe como filtro biológico clarificando y purificando el agua.

Diversos estudios sobre la eficiencia de remoción de nutrientes del lirio reportan distintos valores dependiendo de las condiciones de cultivo, variando desde 1980 kg de N/ha/año y de 322 kg de P/ha/año (Boyd, 1970) hasta 7887 kg de N/ha/año y 1978 kg de P/ha/año (Reddy y Tucker, 1983).

No sólo existen estudios sobre el lirio acuático para el tratamiento de efluentes municipales sino también para la remoción de metales pesados. Varios autores señalan que existe una relación directa entre la eficiencia de remoción de metales pesados del lirio y la concentración de dichos metales en el agua. Se ha determinado que en el sistema radicular se concentran los metales absorbidos y que las cargas eléctricas que dependen del pH en esta zona tienen gran influencia en la absorción de metales.

2.- La familia de las lemnáceas, que se integra de 35 especies y 4 géneros, *Spirodela*, *Lemna*, *Wolffiella* y *Wolffia*. De estos géneros, el segundo es el más utilizado en el tratamiento de efluentes. Las plantas del género *Lemna* son conocidas comúnmente como lentejilla de agua, sus hojas son pequeñas y raramente exceden los 5 mm de longitud. Algunas veces las hojas se agregan como resultado de la reproducción vegetativa de la planta, pero en general la planta puede permanecer agregada o solitaria.

En el caso de la especie *Lemna minor*, la biomasa obtenida después de cultivarla en efluentes municipales, puede utilizarse para la alimentación animal, aportando un contenido de proteína del 40%. Se sabe que ésta planta ha sido cultivada con efluentes de digestión anaerobia de excretas de cerdo, para ser reciclada como fuente de proteína en la alimentación animal. Otras lemnáceas y *Azolla pinnata* han sido usadas para la remoción de nutrientes de las aguas contaminadas y para remover plomo y zinc.

- Salvinias.

Las salvinias se integran de 12 especies ampliamente distribuidas en regiones cálidas alrededor del mundo. Crecen flotando en aguas estancadas con aporte de materia orgánica, en asociación con otras plantas. Se caracterizan como vegetación flotante, poseen hojas dimorfas solitarias o en grupos, miden de 10 a 16 mm de largo. Las hojas flotantes son fotosintéticas provistas de pelos secos en la superficie axial y pelos húmedos en la base. Su crecimiento es rápido y la fragmentación ocurre fácilmente favoreciendo su amplia extensión. Las Salvinias han sido poco utilizadas para el tratamiento de aguas residuales, por lo que existen pocos trabajos al respecto.

La forma de purificación en las lagunas con plantas acuáticas se efectúa de la siguiente manera. Primero, la oxidación de la materia orgánica, la cual es favorecida por el transporte de oxígeno de las hojas a la raíz, y auxiliada por las bacterias asociadas a la raíz de la planta. Luego la remoción de nitrógeno se realiza por absorción de la planta y por una combinación de procesos microbianos de nitrificación-denitrificación. Finalmente, la remoción de fosfatos y otros iones se lleva a cabo, en gran parte, por la absorción de la planta, y en menor proporción, por los microorganismos y mecanismos de precipitación.

Las lagunas con macrófitas, deben ser construidas con un declive para que el influente fluya por gravedad. Para fines de diseño es importante considerar la altura de éstas, ya que se ha demostrado que en las lagunas de menor profundidad la remoción de contaminantes ocurre en menor tiempo que en aquellas más profundas.

En la actualidad, en los sistemas de tratamiento a mediana y gran escala la profundidad de las lagunas oscila entre 0.2 y 0.9 m. La dimensión de las lagunas está en función del volumen de influente y de la carga contaminante del mismo. El flujo y la dimensión de la laguna determinan el tiempo de residencia hidráulico.

La cosecha oportuna de las plantas es necesaria, ya que la remoción de nutrientes es mayor cuando la planta está en crecimiento que cuando está madura, evitando además que la biomasa muerta penetre en el agua y demande oxígeno para su degradación. Las plantas pueden ser cosechadas por el método manual o mecánico, dependiendo del tamaño de las lagunas. En Asia, la compañía *Lemna Corporation* diseñó rejillas de plástico que flotan en las lagunas con *Lemna sp.*, para facilitar la recolección de la planta por medio de maquinaria. En el caso de efluentes industriales que contengan compuestos tóxicos, la biomasa obtenida podría utilizarse para producir metano, a través de la digestión anaerobia.

La principal ventaja de los sistemas de tratamiento basándose en plantas acuáticas, es su bajo costo de construcción y mantenimiento, así como su simplicidad de operación. Otra de las ventajas de estos tipos de tratamiento es que puede aplicarse tanto a efluentes municipales como a efluentes industriales para la remoción de sustancias tóxicas persistentes, que aún no se controlan adecuadamente, y que causan un impacto negativo en el ambiente. Una desventaja de éste sistema es que requiere de una superficie de terreno considerable para la construcción de las lagunas. Sin embargo, las tierras marginales pueden ser aprovechadas. Además, se requiere instalar plantas piloto para evaluar parámetros de diseños específicos para cada región, cada planta y cada tipo de efluente.

4.2.2 Humedales o *Wetlands*

Los lechos de plantas acuáticas (LPA) se conocen también como humedales, pantanos artificiales, lechos de hidrófitas, sistemas de tratamiento de aguas negras con plantas acuáticas, biofiltros, o "wetlands", que es el término en inglés (Rivas, 1997).

Los LPA son sistemas de tratamiento de aguas residuales, que emplean plantas vivas en toda la superficie del lecho, a través de la cual se hace pasar el agua residual para filtrarla y depurarla de los contaminantes que contiene. Durante el proceso de depuración intervienen procesos de oxidación, reducción, volatilización, adsorción, absorción, sedimentación y precipitación (Rivas y Ramírez, 1999).

Los LPA consisten en áreas o lechos, naturales o artificiales, inundados o saturados, que contienen plantas acuáticas. Son poco profundos, de flujo lento, y las plantas acuáticas pueden ser especies locales, tal como el lirio (*Eichornia crassipes*), el junco (*Juncus sp*) o el tule (*Typha sp*), o bien algunas especies forrajeras como el chilicastle (*Lemna sp*). Estos lechos deben estar precedidos de un pretratamiento, preferentemente de un proceso anaerobio para reducir la carga orgánica y la concentración de sólidos (Rivas, 1997).

Las plantas acuáticas toman los nutrientes del agua, simultáneamente producen oxígeno, el cual es enviado a las raíces, y transferido a los microorganismos existentes en el sustrato del lecho (roca, suelo, materia orgánica). Estos microorganismos realizan una gran parte de la remoción de contaminantes (demanda bioquímica de oxígeno o DBO, nitrógeno amoniacal, fosfatos, principalmente). Esta remoción se favorece con el tiempo de retención y la temperatura (Rivas y Ramírez, 1999).

Con respecto a la eliminación de patógenos, Kadlec (1996) afirma que mientras con otros sistemas de tratamiento se requieren tiempos de retención mayores a 25 días, con los LPA este tiempo va de 7 a 10 días, donde la eficiencia de remoción reportada fue ligeramente menor a 99%

Los LPA poseen varias ventajas entre las cuales destacan: representan una alternativa con un amplio potencial para el tratamiento de aguas residuales en las zonas rurales, se diseñan básicamente para el tratamiento de caudales pequeños, de 3 a 6 lps (comunidades menores a 5,000 habitantes). Los costos de tratamiento mediante este sistema son significativamente menores a los de cualquier tecnología convencional, pero además requieren menor trabajo de operación y mantenimiento, y no requieren de personal con capacitación especial.

Los LPA pueden diseñarse para obtener concentraciones de DBO y SST (Sólidos Sedimentables Totales) de hasta 20 mg/l, con tiempos de retención de 2-3 días. Para obtener una buena remoción de nitrógeno y fósforo, es necesario incrementar el tiempo de retención de 5-15 días. Rivas y Ramírez, 1999). Rivas (1997) reporta las eficiencias globales que se obtienen con los LPA (Cuadro 27).

Cuadro 27. Eficiencias globales de remoción obtenidas con los LPA.

PARÁMETRO	Eficiencia (%)
DBO	70-80
DQO	80
SST	70-80
Coliformes fecales	99.9
Nitrógeno amoniacal	45-65
Nitratos	95
Nitrógeno total	65-70
Fósforo total	55-70
Color	90
Turbiedad	95
Hierro	96
Manganeso	83

Fuente: (Rivas y Ramírez, 1999).

En México existen muy pocos trabajos sobre lechos de plantas acuáticas (LPA), sólo Rivas y Ramírez (1999) han realizado una evaluación seria al respecto. Dichos autores trabajaron en dos plantas, ubicadas en Ixtaczoquitlan, Ver. (Planta de cementos Apasco, ubicada en Orizaba), y en San José Quilehtla, Tlaxcala.

En Veracruz, el sistema consistió en cuatro procesos, una fosa séptica, una celda purificadora, una laguna y una segunda celda purificadora. Este proceso se integra en un Módulo, y se trabajó un total de dos Módulos (Lámina14).

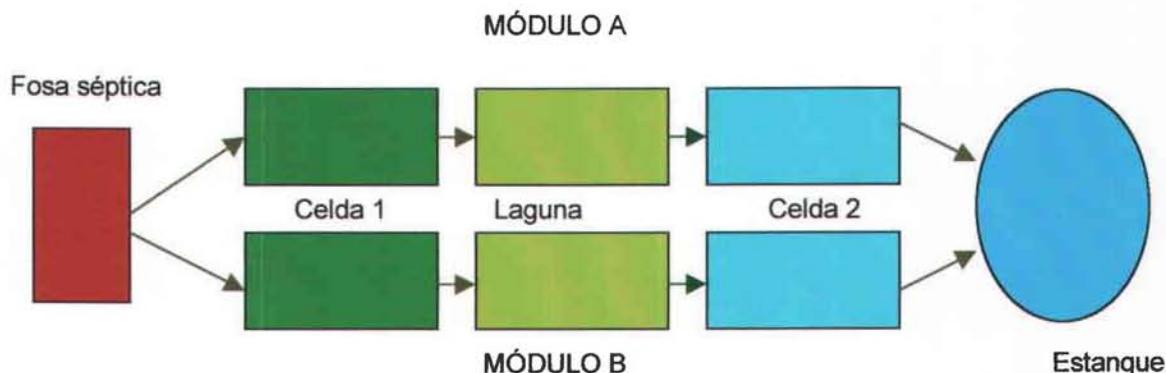


Lámina 14. Croquis del tren de tratamiento de la planta Orizaba.

En la planta de Tlaxcala (Lámina 15), el agua es pretratada con rejillas y un desarenador, para luego pasar a un cárcamo de bombeo. El agua es bombeada hacia un biodigestor, del cual se generan dos líneas de tratamiento. En la primera línea, el agua es distribuida en tres celdas en paralelo, las cuales tienen tule (*Typha sp*) como especie dominante. Luego, los efluentes de las tres celdas se colectan en un estanque con lirio acuático para complementar el tratamiento, y finalmente son descargados a un arroyo. En la segunda línea, el efluente lleva gran cantidad de lodos. Los lodos pasan por dos celdas en paralelo, la cual tiene a la especie *Arundo donax* (especie parecida al carrizo). Por último, el efluente de buena calidad es descargado al arroyo.

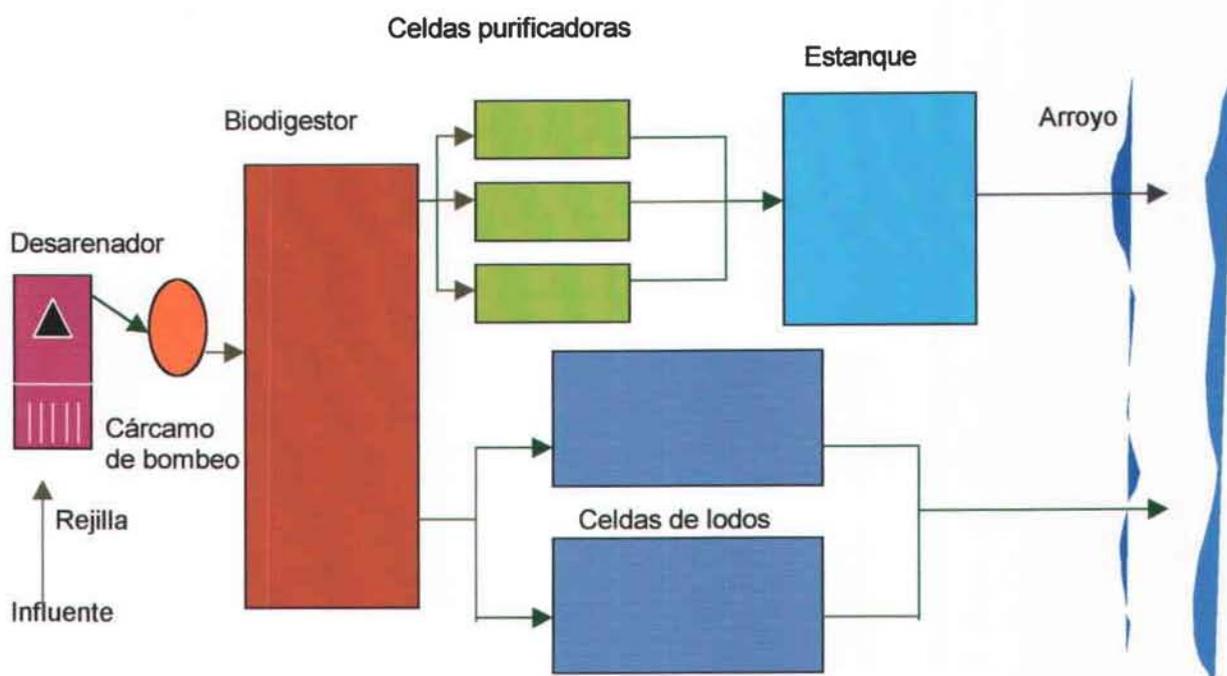


Lámina 15. Croquis del tren de tratamiento de la planta en Quilehtla, Tlaxcala.

En esta planta de Tlaxcala, las celdas purificadoras tienen una dimensión de 36m × 75m, con 0.6 m de profundidad; y las celdas de lodos miden 26m × 14.5m, con 0.6 m de profundidad. Esta planta se diseñó para un gasto máximo de 5.8 lps para atender a una población de 5,000 habitantes.

Los resultados obtenidos en las dos plantas se muestran en el cuadro 28. En ambos casos, se observa que las eficiencias de remoción de los parámetros evaluados superaron las expectativas teóricas, a excepción de los sólidos suspendidos totales (SST) en la planta de Veracruz, pero esto fue debido a la presencia de algas producidas durante el proceso de tratamiento, no a la materia orgánica del influente original.

Cuadro 28. Eficiencias de remoción por sistema de tratamiento de lechos de plantas acuáticas.

PARÁMETROS	QUILEHTLA		ORIZABA		Valor esperado
	Celdas purificadoras	Celda de lodos	Módulo A	Módulo B	
SST, mg/L	87.19	84.75	14.92*	11.94*	70-80
DBO, mg/L	96.48	94.21	88.69	88.89	70-80
N-NH ₄ , mg/L	29.35	85.71	89.33	90.47	45-65
N total, mg/L	46.43	79.25	85.00	86.09	65-70
Grasas y aceites, mg/L	64.91	54.83	76.38	67.23	S/R
Huevos de helmintos	100	91.22	100	100	S/R
Col. Fecales, NMP/100ml	99.991	98.848	99.999	99.9999	99.9

Fuente: Rivas y Ramírez, 1999. * Valores bajos por la presencia de algas. S/R - Sin referencia

Aunque los resultados obtenidos por Rivas y Ramírez (1999) son válidos sólo para las condiciones específicas de operación de cada planta, esta tecnología demostró ser una alternativa muy viable para el tratamiento de aguas residuales municipales en zonas rurales. Cabe mencionar que en México se presentan condiciones climáticas más favorables para el funcionamiento y mantenimiento de estos sistemas.

La mayoría de las plantas convencionales de tratamiento secundario son capaces de remover entre 90 y 99% de los patógenos, esto sugiere una alta eficiencia, pero en realidad resulta muy pobre cuando se trata de proteger la salud pública. Es decir, una remoción de 99% implica una supervivencia de 1%, y es la población de patógenos que permanece en el agua la que determina el grado de riesgo. Por ejemplo en un influente con 10^5 bacterias por litro, una remoción de 99% dejaría 10^3 bacterias por litro de efluente, siendo una concentración inadecuada para que pudiera utilizarse como agua potable, pero bastante buena para riego agrícola.

4.3 Comparativo entre tipos de tratamiento

Para facilitar la toma de decisiones sobre el tipo de tratamiento que se puede utilizar, se deben considerar diversos factores como el origen y las características del agua residual, el volumen generado de aguas residuales, la tecnología existente y los usos a que se desea destinar el agua tratada, según cada caso específico. Sin embargo de manera general los diferentes sistemas de tratamiento de las aguas residuales ofrecen ventajas y desventajas, así como costos estimados que también deben considerarse antes de seleccionar el tratamiento a establecer (Cuadro 29).

Cuadro 29. Principales ventajas y desventajas de los tipos de tratamiento para aguas residuales

Tratamiento	Ventajas	Desventajas	Costo promedio* por m ³ de agua tratada.
Primario	Remueve entre el 40 a 60% de sólidos suspendidos, entre el 50 a 90% de huevos y quistes, entre el 25 a 50% de DBO, y el 65% de los aceites y grasas. La inversión requerida es baja.	Apenas logra remover el 25% de las bacterias patógenas. No logra remover partículas coloidales y disueltas.	1.70
Secundario	Remueve entre el 80 a 95% de la DBO y sólidos suspendidos.	La remoción de patógenos no es satisfactoria. La inversión requerida se incrementa.	2.20
Terciario	Remueve hasta el 99% de la DBO y sólidos suspendidos y virus y 100% de las bacterias patógenas.	El costo de inversión es alto. Se requiere de tecnología y personal especializado para la operación y mantenimiento.	4.00
Tratamientos avanzados	Eliminan por completo microorganismos patógenos y remueven satisfactoriamente nitrógeno y fósforo.	El costo de inversión es alto, se requiere tecnología sofisticada, personal especializado para operación y mantenimiento.	5.50
Macrófitas y humedales	Remoción satisfactoria de tóxicos y patógenos. Muy útil en el tratamiento de pequeños caudales, 3-6 lps. Bajos costos de construcción y mantenimiento, y personal sin capacitación.	Se requiere de superficie de terreno amplia para la construcción de los estanques.	1.50

* Los costos son promedios estimados (en pesos) de experiencias mexicanas, a precios de mayo del 2000.

ANEXO 5

5. RIEGO CON AGUAS RESIDUALES

Cuando se va a regar un suelo agrícola con aguas residuales crudas o tratadas, un parámetro principal a tomar en cuenta es la concentración de sales presentes en el agua, pero también hacer pruebas para conocer la concentración de sales en la solución del suelo, es decir, conocer la concentración de sales en la zona de raíces. La solubilidad de algunas sales como boratos, cloruros, sulfato de sodio y magnesio, puede superar el límite de tolerancia de algunas plantas, convirtiéndose en tóxicas.

Las sales pueden afectar a las plantas al impedir una absorción adecuada del agua, lo que afecta el desarrollo y rendimiento del cultivo. Las sales también afectan el suelo, ya que concentraciones de ciertas sales como el sodio, provocan pérdida en la estructura, disminución de la permeabilidad y escasa aereación del mismo.

Con objeto de conocer la capacidad de asimilación de sales en el suelo, es importante evaluar la calidad del agua que va a ser utilizada en el riego, con base en el parámetro de la conductividad eléctrica (CE), que es el más utilizado para medir la presencia de sales. Con base en la clasificación que ya existe de las aguas de acuerdo a su CE (Cuadro 30).

Cuadro 30. Clasificación del agua de acuerdo con su conductividad eléctrica.

Clasificación	CE (dS/m)	Clase
Agua de baja salinidad	0.10 – 0.25	C1
Agua de salinidad media	0.25 – 0.75	C2
Agua altamente salina	0.75 – 2.25	C3
Agua muy altamente salina	> 2.25	C4

Fuente: SARH- CNA-IMTA. 1994. Anexo técnico. Monitoreo de la calidad del agua de riego.

Capacidad asimilativa: Cuando agua de baja calidad (alta concentración salina) es aplicada a un suelo se produce una respuesta primaria. Para los ácidos y bases (orgánicos o inorgánicos), tiene una reacción de neutralización en cierto grado de acuerdo con la capacidad amortiguadora del suelo, y con la cantidad y disociación del ácido o base aplicada. La afectación del suelo por las sales estará en función de la capacidad de intercambio catiónico del suelo (CIC) y de la proporción de sodio en el agua de riego.

Como respuesta secundaria en el sistema suelo-planta que ha sido regado con agua con sales; los ácidos y las bases orgánicas que no fueron neutralizadas en la respuesta primaria, sufrirán una degradación microbiana convirtiéndose en materia orgánica y en CO₂. Mientras tanto los ácidos y bases inorgánicas se mantienen en forma conservativa y ocasionalmente emigraran moviéndose con el agua de riego o de lluvia de manera muy similar a como lo hacen los cationes y aniones.

Cuando se tiene agua con algún grado de salinidad, es muy importante, caracterizar el tipo y concentración de las sales, mediante un monitoreo de la fuente de abastecimiento, Lo que nos permitirá saber el contenido total de sales, la relación entre el sodio y el resto de los cationes, expresado por RAS o PSI.

Cuando existe sodio en el agua de riego es muy importante el manejo que se tenga del agua de riego y del suelo, para evitar en lo posible que éste elemento provoque alteraciones físicas en el suelo y cause problemas en el desarrollo y productividad de la planta.

Por ejemplo si el monitoreo de la fuente de abastecimiento de agua, indica un RAS ≥ 12 entonces será necesario establecer un tratamiento previo del agua para ajustar el RAS a menos de 12, lo que se puede lograr adicionando calcio y magnesio. Una vez obtenido un RAS < 12 el agua podrá utilizarse en el riego.

Las fuentes de abastecimiento de agua pueden contener sales en diferente grado, por lo que para evitar un exceso de sales en la zona radicular se debe calcular la lámina de riego, utilizando la siguiente fórmula (Iturbe, 1986) :

$$LR = \frac{D_d}{D_i} = \frac{EC_i}{EC_d} \quad (1)$$

Donde:

LR= Lámina de riego necesaria para evitar exceso de sales en la zona radicular

D_d = volumen de agua por unidad de área que puede drenarse

D_i = volumen de agua por unidad de área que se agrega en la irrigación

EC_i = concentración permisible de sales, expresado como conductividad eléctrica

EC_d = concentración de sales en el agua de riego

El efecto del agua de lluvia también debe incluirse en la ecuación 1.

Donde:

$$D_i^T = D_i + D_r \quad (2)$$

$$EC_i^T = \frac{(D_i EC_i + D_r EC_r)}{D_i^T} \quad (2^a)$$

Donde

T= Entrada total de líquidos

r = al agua de lluvia

Entonces la cantidad total del líquido que se aplica es:

$$D_i^T = \left(\frac{EC_d}{EC_i^T} \right) D_d \quad (3)$$

Donde EC_d se establece de acuerdo con la tolerancia del cultivo a la salinidad.

Para el caso de utilización de aguas residuales entonces la ecuación 3 se transforma:

$$D_r + Q/A = (C_d/C_i^T) D_d$$

Donde:

D_r = entrada de agua de lluvia

Q = volumen de agua residual aplicada

A = área de suelo requerida para la aplicación del agua residual

C_d = concentración permisible en el agua (limpia), para la especie considerada

C_i^T = concentración de sal en el agua aplicada y en el agua de lluvia

D_d = volumen de agua aplicada por unidad de área que se mueve lateral o verticalmente fuera de la zona de las raíces.

5.1 Consideraciones de salud pública

La contaminación ambiental por constituyentes biológicos y químicos en áreas agrícolas regadas con agua residual, es en la actualidad una preocupación en el ámbito mundial, debido principalmente a los riesgos que conlleva para la salud humana y para los sistemas de producción agrícola (Cortinas, 1988; Díaz, 1991).

Desde la década de los 50, investigadores del Sector Salud encontraron que una sola bacteria entérica administrada por vía oral no es capaz de producir una enfermedad, esto significa que se requiere cierta concentración de bacterias, conocida como dosis mínima infecciosa, para que se manifieste la enfermedad en los individuos. Estas dosis mínimas se clasifican en dosis mínima baja (1-20 microorganismos), dosis mínima media (20-1000 microorganismos), y dosis mínima alta (más de 1000 microorganismos) (Rico *et al.*, 1988; Shuval *et al.* 1986).

Las dosis infecciosas de microorganismos patógenos entéricos varían en función del grupo a que pertenecen (Cuadro 31). Los helmintos son los que presentan un mayor riesgo para la Salud Pública, ya que provocan enfermedades con dosis infectivas bajas y presentan largos periodos de latencia y desarrollo en el suelo.

Cuadro 31. Características epidemiológicas de patógenos entéricos.

Grupos de patógenos entéricos	Persistencia en el ambiente	Dosis mínima infectiva	Inmunidad	Rutas de infección	Latencia y desarrollo en el suelo
Virus	Media	Baja	Alta	Contacto en casa, alimentos y agua	no
Bacterias	Baja-media	Media-alta	Baja-media	Contacto en casa, alimentos y agua	no
Protozoarios	Baja	Baja-media	Ning-Baja	Contacto en casa, alimentos y agua	no
Helmintos	Alta	Baja	Ning-Baja	Contacto fuera de casa, suelo y alimentos	sí

Fuente: Shuval *et al.*, 1986

Los patógenos entéricos que presentan un alto riesgo con dosis mínima baja son: *Ascaris lumbricoides*, *Ancylostoma duodenale* y *Trichurus trichurus*. Los de riesgo medios con dosis mínima media son: *Enterovirus*, *Agente Norwalk* y *Hepatitis A*, *Entamoeba*, *Escherichia coli*, *Giardia Lamblia*, *Shigella dysenterios*; *Hepatitis A.*, *Vibrio cholerae*, *Salmonella typhi*, *Salmonella newport*. Para el caso de mínimo riesgo de infección, con dosis mínimas altas son *Escherichia coli*; *Salmonella derby*, *Clostridium perfringens*, y *Salmonella pullorum* (Shuval, *et al.*, 1987). La importancia de la persistencia de microorganismos entéricos radica en las infecciones y enfermedades que pueden producir (Cuadro 32).

Cuadro 32. Enfermedades causadas por microorganismos entéricos presentes en agua residual.

Constituyentes biológicos	Infecciones y enfermedades
<i>Aerobacter aerogenes</i>	Bacteria que provoca enteritis.
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Protozoario que produce la parasitosis
Cándida sp.	Hongo que causa úlceras orales y vaginales, infecciones en la piel, especialmente interdigitales e infecciones oculares, puede invadir el sistema nervioso central, el aparato circulatorio, respiratorio digestivo y vías urinarias
<i>Entamoeba hystolítica</i>	Protozoario que produce Amibiasis
<i>Escherichia coli</i>	Bacteria que provoca enteritis
<i>Giardia lamblia</i>	Protozoario que produce enteritis, disentería y giardiasis
Hepatitis A	Virus que produce la hepatitis.
<i>Klebsiella</i>	Bacteria que produce enteritis en niños, neumonía, infecciones en el tracto urinario e inflamación en las vías respiratorias.
<i>Listeria monocytógenes</i>	Bacteria que provoca meningitis, encefalitis, endocarditis, septicemia, abscesos, provoca abortos
<i>Naegleria sp.</i>	Protozoario que produce meningo-encefalitis
Polivirus	Virus que produce la poliomielitis.
<i>Proteus sp</i>	Bacteria que produce infecciones en las vías urinarias
<i>Salmonella paratyphi</i>	Bacteria que produce la fiebre paratifoidea.
<i>Salmonella schoftmuelleri</i>	Bacteria que produce la fiebre paratifoidea.
<i>Salmonella typhi</i>	Bacteria que produce la fiebre tifoidea.
<i>Schistosoma mansoni</i>	Protozoario que produce la esquistosomiasis.
<i>Vibrio cholerae</i>	Virus que produce el cólera.

Fuente: SRH, s/f. a; SRH, s/f. b; SRH, s/f. c; Kowal *et al.*, 1980; Shuval *et al.*, 1986; Cortéz, 1990; Strauss, 1991; Pescod, 1992.

Los riesgos de infecciones y enfermedades por el uso de aguas residuales, principalmente en países en vías de desarrollo, han inducido a Organismos Mundiales a financiar estudios sanitarios sobre la prevención de riesgos actuales y potenciales originados por microorganismos entéricos. Con los resultados obtenidos, la Organización Mundial de la Salud (OMS), ha elaborado guías de calidad de agua residual para propósitos agrícolas mismos que incluyen calidad del agua, prácticas de control para individuos en contacto con el agua residual, control de la calidad de efluentes para la protección a la salud y para la producción agrícola, entre otros (Pescod, 1992).

Se han hecho esfuerzos para establecer límites sobre la concentración de microorganismos patógenos, tal es el caso de los resultados obtenidos en la reunión de expertos técnicos en Engelberg, Suiza, donde concluyen que para aplicar riego agrícola, las aguas no deben presentar coliformes fecales en cantidades mayores de 1,000 NMP/100 ml, ni más de un huevo de helminto viable por litro de agua.). No obstante, los coliformes fecales no son buenos indicadores de contaminación en suelos y alimentos y una baja concentración de coliformes fecales no implica ausencia de bacterias patógenas (Cortéz *et al.*, 1990). Además, los microorganismos sobreviven por períodos prolongados, lo que representa riesgos potenciales a la salud pública. Estos riesgos se incrementan tanto en los agricultores que tiene contacto directo con las aguas residuales crudas, como en los consumidores de dichos cultivos, y que se consumen en crudo, como es el caso de la lechuga.

En México, los trabajos realizados sobre riesgos de contaminación biológica por el uso de aguas residuales en la agricultura han demostrado que el método de riego y el tiempo de supervivencia

de los microorganismos entéricos patógenos son los factores de mayor incidencia en la salud pública. No obstante, los riesgos bacteriológicos se aminoran debido a que gran parte de los organismos patógenos se hacen inactivos o se extinguen después de varias semanas de exposición al ambiente. Por ésta razón se recomienda espaciar el último riego antes de la cosecha. Esta recomendación incluye evitar el contacto de las aguas con las partes comestibles. Por tal motivo, para evaluar los riesgos por patógenos entéricos, se consideran su concentración, su latencia, su capacidad de multiplicación en el ambiente, su persistencia o sobrevivencia en el ambiente, su dosis infectiva y la ruta de transmisión. No obstante, la persistencia en el ambiente (agua residual, suelos y cultivos), las prácticas de no inmunidad y las infecciones intestinales de helmintos representan el riesgo más alto para la población expuesta a las aguas residuales crudas y tratadas con insuficiencia (Ramírez, 1978; Möller, 1986; Cortéz et al., 1990; Siebe y Cifuentes, 1995).

5.2 Consideraciones Agronómicas

Factores que influyen como riesgos de contaminación en el aspecto agronómico son los problemas de salinidad y sodicidad en los suelos y problemas de toxicidad en los cultivos por elementos como boro, cloro, ciertos metales pesados y surfactantes; problemas de eutroficación en las obras de embalse y problemas de salud pública por el consumo y contacto de productos hortícolas que son regados con aguas residuales (Arias, 1989).

5.2.1 Tipo de suelos

En los sistemas de producción agrícola, el suelo es el subsistema conocido como cuerpo receptor, que se afecta negativamente cuando es regado con aguas residuales, ya que contaminantes como las grasas, las sales solubles, los metales pesados y las bacterias entéricas, entre otros más, alteran y modifican sus propiedades de manera tal que la calidad de los productos de interés económico, sembrados en ellos, disminuyen su valor mercantil. No obstante, el suelo es un subsistema que de acuerdo con su origen, puede presentar una capacidad asimilativa de desechos que reduzca los parámetros o variables que afectan la calidad agronómica de los cultivos (Iturbide, 1984; Díaz, 1991; SEMARNAP, 1997).

En 1997, la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, determinó los límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros en suelos con uso agrícola (Cuadro 33).

Cuadro 33. Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros en suelos agrícolas.

Parámetro medidos de manera total, mg /L	Suelo con uso agrícola	
	Promedio mensual	Promedio diario
Arsénico	0.2	0.4
Cadmio	0.05	0.1
Cianuro	2.0	3.0
Cobre	4.0	6.0
Cromo	0.5	1.0
Mercurio	0.005	0.01
Níquel	2.0	4.0
Plomo	5.0	10.0
Zinc	10.0	20.0

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, 1997

Adiciones no controladas de metales pesados en el suelo son indeseables porque una vez que entran en el suelo, resulta prácticamente imposible eliminarlos, y subsecuentemente pueden conducir a toxicidad para las plantas que crecen en esos suelos, su absorción por las plantas

cultivadas, con un probable daño para las personas o los animales que los consumen, y su transporte del suelo al subsuelo o a las aguas superficiales (Pettygrove y Asano, 1985).

La presencia de metales pesados en el agua residual se relaciona con las actividades industriales. Datos experimentales han demostrado que la mayoría de los metales pesados en las aguas residuales (excepto el boro) son adsorbidos sobre los sólidos orgánicos e inorgánicos, o forman precipitados inorgánicos débilmente solubles. Aunque un sistema convencional de tratamiento de aguas no está diseñado para eliminar metales pesados, éstos son removidos al ser eliminados los sólidos en suspensión, dado que se encuentran adsorbidos sobre dicha materia. Bajo condiciones normales de operación, el tratamiento secundario reduce las concentraciones de los metales pesados en efluentes primarios de 70 a 90% (Chen *et al.*, 1974, en Pettygrove y Asano, 1985).

Se ha considerado que los elementos que representan el mayor daño potencial, cuando son aplicados sin control a suelos agrícolas, son B, Cd, Cu, Mo, Ni y Zn. Por otro lado, aplicaciones de Mn, Fe, Cr, As, Al, Se, Sb, Pb y Hg a través de aguas residuales no son consideradas peligrosas dado que las concentraciones reportadas en la literatura no causan problemas graves sobre el crecimiento de los cultivos, o sobre su acumulación en los tejidos vegetales.

Para evitar el daño a cultivos cuando se apliquen al suelo lodos residuales que contengan elementos fitotóxicos, la EPA recomienda que la carga acumulada total de ciertos elementos (Cd, Cu, Ni, Zn y Pb) se limite de acuerdo a la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los suelos. El tiempo requerido para que un suelo alcance su límite de carga de metales pesados provenientes de aguas residuales puede ser estimado a partir de las concentraciones de dichos elementos en el agua, y de la lámina anual aplicada (Cuadro 34). Si se aplica una lámina anual de 1.2 m, el tiempo requerido para que un elemento alcance su límite de carga varía de 82 años (para Cd en un suelo con una CIC < 5 meq/100 gr) hasta más de 3,000 años (para Pb en un suelo con una CIC > 15 meq/100gr). Estos límites son establecidos para suelos de pH > 6.5 (EPA, 1978; EPA, 1979).

Cuadro 34. Tiempo estimado para que suelos regados con aguas residuales alcancen su límite de carga de metales (con una lámina de aplicación anual de 1.2 m).

Elemento	Concent. Típica, (mg/L)	Adiciones acumulativas de metales (kg/ha), según la CIC*			Tiempo (años) para que un suelo alcance su límite de carga, por CIC*		
		CIC < 5	CIC= 5-15	CIC > 15	CIC < 5	CIC= 5-15	CIC > 15
Cd	0.005	5	10	20	82	167	333
Ni	0.10	125	250	500	104	208	416
Zn	0.15	250	500	1,000	139	278	556
Cu	0.02	125	250	500	521	1042	2083
Pb	0.05	500	1,000	2,000	833	1667	3333

*CIC – Capacidad de intercambio catiónico, en meq/100 gr de suelo.

Fuente: (EPA, 1978; EPA, 1979).

El paso de las aguas residuales a través del suelo provoca un número de reacciones físicas y químicas que influyen sobre la capacidad del suelo para purificar dichas aguas. El mecanismo de remoción depende de las características de los metales pesados en el agua residual. Por ejemplo, los elementos que se encuentran en formas suspendidas se pueden eliminar por filtración; pero la filtración no tendrá ningún efecto sobre aquellos elementos que se encuentran en solución. En estos casos, serán más útiles las reacciones de intercambio iónico, precipitación, adsorción superficial y formación de complejos orgánicos (Ives, 1971, en Pettygrove y Asano, 1985).

Los factores que influyen sobre la retención de los metales pesados por los suelos son la textura, pH, contenido de materia orgánica, y contenido de óxidos amorfos de Fe Al y Mn. Las cantidades de metales pesados absorbidos por cultivos son pequeñas comparadas con las cantidades aplicadas al suelo por el riego con aguas residuales estándares (Korte *et al.*, 1976, en Pettygrove y Asano, 1985).

El pH del suelo es el parámetro que más se ha identificado en la literatura como el que controla la disponibilidad de los metales pesados. A excepción del Mo y Se, todos los microelementos son más solubles a bajo pH (y por lo tanto más disponibles), debido a la solubilidad de especies hidroxílicas, y a la solubilidad de otros minerales tales como carbonatos y fosfatos. Bajos pH's también restringen la adsorción de metales a sitios pH-dependientes de adsorción específica en las superficies minerales y disminuyen la CIC de la MO, quedando así los iones metálicos libres en la solución del suelo y listos para ser absorbidos por las plantas (Ellis y Knezek, 1972).

El equilibrio de la fase sólida de los metales pesados en el suelo puede proporcionarnos evidencia del efecto del pH sobre la solubilidad de los metales. También las actividades de los complejos organometálicos no son tan afectadas por el pH como las actividades de los iones libres.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) involucra a todos los cationes, a excepción del As, Se, Mo y B. Esos cationes son atraídos por las fuerzas electrostáticas de las cargas negativas totales de los minerales del suelo y la materia orgánica. La mayoría de los autores reconocen a la CIC como una de las propiedades del suelo que están relacionadas con la retención de metales (Logan y Chaney, 1983).

Se reconoce también que los efectos de la CIC son debidos a las características de adsorción específica de la MO del suelo y de los óxidos de Fe, Mn y Al. La MO enlaza a los metales por quelatación, así como por atracción catiónica. Los óxidos de Fe, Mn y Al pueden adsorber específicamente a los metales, pero no poseen suficientes cargas netas negativas para enlazar a los iones metálicos por intercambio catiónico. Elevando el pH, se elevará la CIC de la MO y otros minerales con carga pH-dependiente, pero un incremento en la retención de metales puede también ser debido a una disminución en la solubilidad de los metales adsorbidos por los minerales.

El informe del CAST (1980) afirma que la CIC se consideró, más bien, como un indicador general, aunque imperfecto, de los componentes del suelo que limitan la solubilidad del Cd y Zn (ésto es, MO, arcillas y óxidos hidratados de Fe, Al y Mn) en vez de un indicador especial de la disponibilidad de los metales pesados.

La materia orgánica del suelo enlaza a los metales por medio del intercambio catiónico y de la formación de complejos organometálicos (Mortensen, 1963; Hodgson, 1963; Schnitzer, 1969). Por otro lado, los complejos organometálicos solubles pueden reducir la adsorción de metales y aumentar su disponibilidad (Stevenson y Ardakani, 1972). Los complejos y quelatos solubles permiten una difusión más rápida de la fase sólida del suelo hacia las raíces de las plantas (Lindsay, 1964). Stevenson y Ardakani (1972) analizaron las estabildades relativas de los complejos organometálicos de los elementos traza, y encontraron que, a pH 5, son: Cu > Pb > Fe > Ni > Mn > Co > Zn.

Aunque es claro que la materia orgánica del suelo influye en la retención de metales en el suelo y, por lo tanto, en lo relativo a su absorción por las plantas, este tema está aún poco estudiado (Logan y Chaney, 1983).

Con respecto a la contaminación biológica, los principales factores que influyen sobre los problemas de salud son los períodos de supervivencia y la latencia de los microorganismos en el suelo y en las plantas (Cuadro 35). Los helmintos y los virus presentan mayor tiempo de supervivencia y pueden ser desplazados por el agua de retorno agrícola hacia otras áreas de cultivo aguas abajo y contaminar de esta manera la parte comestible de cultivos rastreros o de porte bajo. (Sánchez, 1982; Cortéz, 1990; Feachem *et al.*, citado por Mara y Cairncross, 1990).

Los elementos abióticos transportados a través del agua (lluvia, escurrimientos o riego) hacia un determinado suelo tenderán a infiltrarse por el mismo, debido al movimiento del agua que se dirige a las capas profundas. En principio dichos elementos se fraccionarán de acuerdo a su solubilidad

en el agua, los elementos insolubles o partículas suspendidas quedarán atrapadas entre los poros del suelo y de éstos las partículas gruesas permanecerán en las capas superficiales y las finas serán transportadas a mayor profundidad. Los coloides y el material soluble serán llevados por el agua hacia profundidades mayores del suelo y durante este recorrido descendente se diluirán y fraccionarán de acuerdo a sus características químicas.

Cuadro 35. Tiempos de supervivencia de patógenos, en el suelo como en las plantas a 20-30 °C.

ORGANISMO	TIEMPO DE SUPERVIVENCIA (DÍAS)		
	En el agua	En el suelo	En las plantas
Virus	23 – 161	100 – 20	15 – 60
Terovirus (incluye poli-virus y virus Coxsackie)			
Bacterias			
Coliformes fecales	30 – 90	70 – 80	30 – 60
Salmonella paratyphi	---	260	---
Salmonella typhi	9 – 13	10 – 120	15 – 30
Vibrio Cholerae	---	10 – 20	2 – 5
Protozoos			
Quistes de E. histolytica	37 – 150	6 – 20	2 – 10
Helmintos			
Huevos de A. lumbricoides	84 – 210	365	30 – 60
Larvas de anquilostoma	60 – 120	30 – 90	10 – 30
Huevos de Taenia saginata	meses	meses	30 – 60
Huevos de Trichuris trichura	meses	meses	30 – 60

Fuente: Ramírez, 1978; Kowal *et. al.*, 1981; Feachem *et. al.*, citado por Mara y Cairncross; 1990; Frías, 1990.

El suelo actúa como un filtro de microorganismos, tanto patógenos como no patógenos, protegiendo a los acuíferos subterráneos de la contaminación. La migración de los patógenos provenientes del agua residual, a través del perfil del suelo, está relacionada con textura, estructura, cantidad de materia orgánica y la microflora propia del suelo (Gerba, 1975). Diversos estudios han mostrado que de 90 a 95% de los microorganismos fecales se concentran en la superficie del suelo inmediatamente después del riego con aguas residuales (Cuadro 36), mientras que sólo del 5 al 10% penetra a capas más profundas (Hagedorn, 1981).

Los suelos por tanto, deben de tener una serie de características compatibles con la admisión de elevados volúmenes de agua residual en la que están presentes un conjunto de compuestos que pueden modificar el estado anterior del suelo y alterar el equilibrio ecológico del medio en que se localiza el área de aplicación. Suelos pesados (textura fina) no son aptos para estos propósitos debido a su mal drenaje, lo cual causa que se retenga por mucho tiempo el agua aplicada, y se presenten problemas de encharcamiento. Por el contrario, la elevada capacidad de drenaje de los suelos francos los convierte en aceptables para la aplicación de riego con aguas residuales urbanas, ya que los fluidos son retenidos por poco tiempo. Se considera que un suelo esta bien drenado cuando la infiltración es ± 5 cm/día, aunque esta norma varía de acuerdo a condiciones específicas (Seoanez Calvo, 1978).

La misma fuente señala que numerosos estudios han demostrado que el suelo es un medio eficaz para el tratamiento de residuos. Experimentos concluyentes han sugerido que se puede obtener agua bacteriológicamente segura si ésta es tratada por percolación a través de 2.12 metros de suelo. En otras experiencias con percolación a través de 90 cm de suelo, se han hallado recuentos de coliformes de 2.3 NMP/100 ml en suelos franco arenosos finos, y de 2,400 NMP/100 ml en

suelos arenosos. En Alemania, zonas en las que se han aplicado aguas residuales durante 15 años no han experimentado ningún aumento en su contenido de bacterias patógenas o huevos de parásitos.

Cuadro 36. Movimiento de bacterias patógenas a través del suelo, después del riego con aguas residuales.

Tipo de agua	Tipo de organismos	Medio poroso	Profundidad de penetración	
			Distancia (m)	Tiempo
Residuales tratamiento terciario	Coliformes	Arena fina y media	6.1	
Residuales efluente secundario en camas de percolación	Coliformes fecales	Arena francosa fina y grava	9.1	
Residuales primarias en camas de infiltración	Coliformes fecales y Streptococos	Arena Limosa y grava	18.3	
Inoculadas y residuales diluidas inyectadas en el subsuelo	Bacilos termófilos	Material grueso cristalino	28.7	24-30 horas
Filtraciones de letrinas mezcladas con agua subterránea	Bacilos coliformes	Arcilla arenosa	10.7	8 semanas
Cuencas de infiltración	Escherichia coli	Dunas de arena	3.1	

Fuente: Adaptado de Gerba *et. al.* (1975) y Hagedorn *et. al.* (1981)

Por todo lo antes mencionado el riego con aguas residuales se recomienda en suelos de textura media a fina, de modo que el agua aplicada no se percole rápidamente, que sean suelos con buen contenido de materia orgánica que le permitan retener los elementos nutritivos, y con pH alcalino, para "inmovilizar" a los metales pesados, con lo cual se disminuye el riesgo de contaminación a los acuíferos.

5.2.2 Profundidad de los mantos acuíferos

Es muy importante considerar los contenidos de microorganismos patógenos y metales pesados en las aguas residuales, antes de verterlas sobre suelos ligeros o someros, debido a que tanto los patógenos como los metales, penetran por lixiviación a diferentes profundidades, llegando a convertirse en fuentes de contaminación en acuíferos subterráneos. Se recomienda entonces, como medida de protección, que las aguas residuales sean utilizadas para el riego sobre suelos de vocación agrícola con las características mencionadas con anterioridad, y cuyos mantos freáticos se encuentren a una profundidad mayor a 2 m, y los acuíferos subterráneos se encuentren a más de 30 m de profundidad (Tejeda, 1985), ya que a pesar de que se han identificado los procesos físicos, químicos y biológicos que disminuyen la concentración de contaminantes, éstos tienen límites finitos, o son operativos sólo dentro de un rango limitado de condiciones físico-químicas, como por ejemplo, la biodegradación, la cual solo actúa sobre contaminantes degradables por ciertos organismos. Los contaminantes más persistentes, por tanto, se acumularán en las aguas freáticas hasta que se alcance un balance dinámico entre la relación de entrada de contaminantes al sistema de flujo de éstas, y la relación de descarga de contaminantes del sistema.

5.2.3 Manejo del riego

El riego con aguas residuales al igual que el riego con agua limpia, debe ser manejado de forma cuidadosa, a fin de mantener la calidad de los suelos y no comprometer la calidad de los acuíferos subterráneos, empleando sólo la cantidad de agua requerida por el cultivo en cuestión, calculando las láminas de agua considerando la profundidad de las raíces (P_R), el contenido de humedad

inicial y el contenido de humedad que se debe tener en el suelo después del riego, es decir, la capacidad de campo. La lámina de riego (L_r), se puede calcular con la siguiente fórmula (Fuentes, 1994).

$$L_r = P_R (\theta_{CC} - \theta_0)$$

Sustituyendo la fórmula la lámina de riego se presenta de la siguiente manera:

$$L_r = k_c P_R (\theta_{CC} - \theta_{pmp})$$

Donde $k_c = 1 - k$; para muchos cultivos $k_c = 0.7$

Otro factor importante a considerar en el manejo del riego con aguas residuales será la forma de aplicación, para lo cual se deberá considerar, tanto la calidad del agua, como la infraestructura disponible para efectuar los riegos. De los sistemas más económicos para regar suelos con agua de baja calidad se encuentra el riego por desbordamiento, donde el flujo del agua se limita en el sentido de la pendiente, obteniéndose un rectángulo que recibe el agua por uno de sus lados mayores, este tipo de riego exige un caudal entre 20 y 40 lps. El riego bajo este sistema se recomienda en cultivos que no sean de consumo humano directo.

En el riego por surcos, el agua se reparte sin desbordarse, infiltrándose de manera lateral. Requiere de menor caudal por surco (2 l/s), y pendientes no mayores a 2.5 %, sin embargo este sistema de riego no es recomendable para aguas de baja calidad fisicoquímica, ni para suelos con problemas de salinidad. Tampoco deben ser regados cultivos de consumo humano directo.

En aguas residuales tratadas cuya calidad fisicoquímica sea mejorada considerablemente, y se pueda invertir en sistemas de riego más sofisticados, se pueden establecer sistemas de riego aéreos (como la aspersión), donde el agua se aplica sobre la superficie del terreno impulsada por un sistema a presión, este sistema se puede utilizar en el riego de cultivos forrajeros y granos para procesamiento industrial.

El riego localizado (con microaspersión o goteo) se aplica el agua a través de emisores situados en tuberías, requiere bajos caudales, mantiene húmeda sólo el área radical, el agua es llevada desde el embalse por un sistema a presión, requiere que el agua sea de buena calidad bacteriológica y fisicoquímica, sobre todo no tener sólidos suspendidos que podrían taponar los emisores, y puede usarse con agua con bajas concentraciones salinas. Se pueden regar mediante este sistema hortalizas y frutales. Otras prácticas complementarias a considerar serán el mejoramiento del drenaje superficial, y la dilución de aguas.

5.2.4 Selección de cultivos

Los cultivos a regar con aguas residuales deben ser seleccionados en función de la calidad del agua, y los límites de contaminantes establecidos por la normatividad en materia de calidad del agua para uso en agricultura. Parámetros fisicoquímicos importantes a considerar en el agua son la concentración y tipos de sales, debido a que existen diferentes rangos de tolerancia a la salinidad entre los cultivos, lo cual se relaciona directamente con su rendimiento (Cuadro 37).

Todo el potencial productivo de los cultivos debe manifestarse cuando se rieguen con aguas cuya CE sea menor o igual a 0.7 dS/m. Sin embargo, a medida que la concentración de sales en el agua y en el suelo se incrementa (> de 3 dS/m), el potencial productivo de los cultivos se reduce. Es entonces cuando debe considerarse la fracción de lavado para mantener las sales en concentraciones que no perjudiquen ni a los suelos, ni a los cultivos.

Las aguas residuales tratadas pueden alcanzar una concentración de sales de 0.7 a 3.0 dS/m, dependiendo del origen de éstas y del sistema de tratamiento aplicado, considerándose así como agua de riego de buena calidad para la mayoría de los cultivos.

Cuadro 37. Clasificación de cultivos de acuerdo con su tolerancia a las sales.

TIPO DE CULTIVO	GRADO DE TOLERANCIA A LAS SALES
Cultivos productores de fibra y semilla Ejemplo: Algodón, Jojoba, caña de azúcar	Tolerantes (6.0 – 10.0 dS/m)
Pastos y cultivos forrajeros Ejemplo: Pasto bermuda, Zacate Alkali	Tolerantes (6.0 – 10.0 dS/m)
Cultivos productores de fibra y semilla Ejemplo: Avena, soya y trigo.	Moderadamente tolerantes (3.0 - 6.0 dS/m)
Pastos y cultivos forrajeros Ejemplo: Pasto Ryegrass italiano, pasto Sudán	Moderadamente tolerantes (3.0 - 6.0 dS/m)
Cultivos productores de fibra, semilla y azúcares Ejemplo: maíz, arroz palay, caña de azúcar	Moderadamente sensibles (1.3 - 3.0 dS/m)
Cultivos productores de fibra, semilla y otros Ejemplo. Frijol, cebolla, zanahoria, limón, mango, durazno.	Sensibles (< 1.3 dS/m)

Fuente: Pescot, 1992.

Los cultivos a regarse con aguas residuales serán seleccionados también en función de la calidad del agua, cuyas concentraciones de parámetros bacteriológicos se encuentren en correlación con lo establecido con la Norma Oficial Mexicana ECOL-001-96. Pudiéndose regar sin restricciones todos los cultivos, con agua cuya concentración de coliformes fecales sea $< 10^3$ NMP/100 ml de agua y menos de 1 huevo de helminto/L. A partir de una mayor concentración de patógenos, es decir, una concentración de coliformes fecales de 10^3 a 10^5 NMP/100 ml, y de 1 a 5 huevos de helminto/L, el riego se restringe a la producción de cultivos no de consumo humano directo en crudo. En agua con una calidad bacteriológica menor ($>10^5$ CF/NMP/100 ml, y más de 5 huevos de helminto/L) el riego se restringe solo a cultivos forrajeros, gramíneos e industriales.

También de gran importancia es la concentración de metales pesados, sobre todo si el origen de las aguas residuales proviene de desarrollos industriales o mineros, donde las concentraciones no deberán rebasar los límites máximos permisibles (LMP) establecidos por la normatividad en materia de calidad del agua para uso en riego agrícola (Cuadro 38).

Cuadro 38. Límites máximos permisibles de metales pesados en agua para riego.

PARÁMETROS, en mg/L	Uso en riego agrícola	
	Promedio mensual	Promedio diario
Arsénico	0.2	0.4
Cadmio	0.2	0.4
Cianuro	2.0	3.0
Cobre	4.0	6.0
Cromo	1.0	1.5
Mercurio	0.01	0.02

Fuente: NOM-ECOL-001.

ANEXO 6

6. MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO

El monitoreo de las distintas fuentes de abastecimiento de agua, se realiza con el objetivo de conocer su calidad tanto fisicoquímica como bacteriológica, y planear su aprovechamiento óptimo en las distintas actividades económicas de una región determinada. Las determinaciones solicitadas al laboratorio de cada muestra de agua proveerán información sobre el tipo y la cantidad de constituyentes presentes en la fuente de agua.

6.1 Tipos de muestreo

Existen tres tipos de muestreos, generales, detallados y semidetallados, cada uno corresponde a las necesidades de fineza o grado de exactitud que requiera el estudio o diagnóstico de la calidad del agua que se realice y del tipo de fuente de abastecimiento de que se trate, de la cantidad de recursos económicos con que cuente el proyecto de estudio, del tiempo que se disponga para realizar el estudio, de la capacidad instalada de personal para realizar el trabajo, entre otras cosas.

Dentro de cada tipo de muestreo se pueden tomar distintos tipos de muestras:

- a) muestra aleatoria simple, que consiste en tomar una muestra en un punto de la fuente de abastecimiento. Este tipo de muestreo puede ser útil en estudios muy generales que requieren poca información respecto a las variaciones en la calidad del agua de una determinada fuente de abastecimiento.
- b) Muestra promedio, que consiste en tomar varias muestras simples a intervalos de tiempo establecidos en un punto de la fuente de abastecimiento de interés; los resultados obtenidos reflejarán la variación de la calidad del agua del punto marcado.
- c) Muestra compuesta según volumen, que se obtiene mezclando varias muestras simples de igual volumen de agua, obtenidas en puntos diferentes en una fuente de abastecimiento, en lapsos de tiempo fijos.
- d) Muestra promedio según masa contaminante, que requiere de estudios de calidad del agua cuyo origen sean fuentes de desecho industriales, mineros o municipales. El principio para la obtención de la muestra es el mismo que en el inciso anterior, y el resultado debe correlacionarse con la masa de los contaminantes según el origen de la descarga.

6.2 Selección de sitios de muestreo

El establecimiento de los sitios de muestreo dependerá principalmente del objetivo del estudio, de la calidad del agua, y del tipo de fuente de abastecimiento de que se trate. Entre los elementos a considerar están el número de afluentes que tenga dicha fuente, el tipo de actividades económicas de la zona y el número de descargas que se realicen en la fuente de abastecimiento de interés.

Los tipos de fuentes de abastecimiento de agua a muestrear pueden ser:

- Cuencas
- Subcuencas
- Microcuencas
- Ríos
- Lagos
- Presas
- Canales de riego principales o secundarios
- Obras de toma
- Drenes agrícolas
- Descargas de granjas, industrias, etc.
- Plantas de tratamiento

Además de lo anteriormente mencionado, el muestreador debe considerar que los sitios de muestreo sean de fácil acceso, que existan estructuras o construcciones cercanas al sitio elegido, para poder ubicarlos sin problema sobre un mapa de la zona.

6.3 Consideraciones en la toma de muestras

Al tomar muestras de agua para determinar su calidad, es importante considerar los criterios establecidos en los distintos manuales de procedimiento que existen para monitorear calidad del agua, entre los que se encuentran las formas de obtención de la muestra, tipo de recipiente a utilizarse, uso opcional de conservador, cantidad requerida, forma de preservación y transporte, lapsos de tiempo entre la toma de la muestra y su análisis, hojas de registro e identificación de la muestra.

También es importante considerar la opinión de los responsables de laboratorios certificados, quienes, con su conocimiento y manejo de técnicas, pueden hacer sugerencias acertadas en cuanto a los puntos mencionados anteriormente para la obtención de la muestra.

Entre los puntos que considera la forma de obtención de la muestra, se menciona que toda muestra deberá ser tomada de manera aséptica, evitando la contaminación de la misma, por lo que se recomienda usar guantes, y enjuagar con agua destilada entre la toma de una muestra y otra.

El tipo de recipiente para depositar la muestra tomada dependerá de las determinaciones solicitadas al laboratorio, así como la cantidad requerida. Por ejemplo, para análisis fisicoquímicos se requiere de un mínimo de un litro de muestra, recolectado en recipiente de plástico o vidrio esterilizado, color ámbar. Para análisis bacteriológico se requiere de un mínimo de 200 ml de muestra, depositada en un recipiente de vidrio transparente, esterilizado y con tapón esmerilado.

Todas las muestras tomadas deberán tener una etiqueta de identificación que especifique un número consecutivo, lugar de origen, fecha, hora y nombre del muestreador. Estos mismos datos se plasmarán en hojas de campo de registro, que servirán para solicitar las distintas determinaciones al laboratorio. Observaciones y comentarios relevantes del muestreador pudieran facilitar la posterior interpretación de los resultados.

Todas las muestras deberán ser conservadas y transportadas en recipientes seguros, adecuados y a temperatura por debajo de los 10°C. Se recomienda que la muestra sea colectada y remitida al laboratorio para su análisis en el menor tiempo posible, considerando que cuando se muestrea agua residual, este tiempo deberá ser menor a 12 horas. (Cuadro 39)

Cuadro 39. Lapsos de tiempo a considerar en la toma de muestras de agua.

Tipo de muestra	Tiempo máximo entre la toma de muestra y su análisis en el laboratorio
Aguas no contaminadas	72 horas
Aguas ligeramente contaminadas	48 horas
Aguas contaminadas	12 horas

Fuente: IMTA, 1994.

ANEXO 7

7. REPORTES DE EXPERIENCIAS EN EL APROVECHAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

La utilización de las aguas residuales no es algo nuevo, teniendo registros de un sistema de regadío con aguas residuales que estuvo en funcionamiento por 300 años, desde 1559 en Bunzlau, Alemania (Hartman, 1975). Sin embargo su mayor uso se remonta al siglo XIX, teniendo su auge en países europeos principalmente (Cuadro 40).

A nivel mundial la demanda de agua se incrementa día con día, debido al crecimiento de la población, los requerimientos de la industria y sobretodo de la agricultura. Esta demanda se vuelve crítica en países áridos y semiáridos, dada la limitación natural del recurso.

Si bien en países del norte de Africa y en países árabes del Medio Oriente existe una gran falta de agua, recientemente se ha reconocido que también existe este problema en la región europea del Mediterráneo y en la Europa del Este (Cuadro 41).

Cuadro 40. Antecedentes del uso de aguas residuales en algunos países extranjeros.

Localidad	Fecha de inicio del uso	Tipo de sistema	Sup (ha).	Caudal usado m ³ /s.
Berlín Alemania	1874	Utilización directa	2,720	N. d.
Braunschweig, Alemania.	1896	Utilización directa	4,400	0.7
Croydon-Beddington, Inglaterra.	1860	Utilización directa	252	0.2
Leamington, Inglaterra.	1870	Utilización directa	160	0.04
Melbourne, Australia.	1893	Riego	4,160	2.19
Valle del Mezquital, México.	1900	Riego	44,800	24.97
Paris, Francia.	1869	Riego	640	3.46
Wroclaw, Polonia.	1882	Utilización directa	800	1.23
Calumet city, MI, EUA	1888	Infiltración rápida	4.8	0.05
Ely, Nevada, EUA	1908	Riego	160	0.07
Fresno, CA, EUA.	1891	Riego	1,600	1.14
San Antonio, TX, EUA.	1895	Riego	1,600	0.88
Vineland, NJ, EUA	1901	Infiltración rápida	5.6	0.04
Woodland, CA, EUA.	1889	Riego	96	0.18

Fuente: Metcalf, 1994.

El incremento de la población y de las demandas de agua limpia en los años noventa, generó una nueva preocupación por el reuso de las aguas residuales, a fin de liberar importantes volúmenes de agua limpia para el uso de abastecimiento humano. A continuación se presenta un resumen de experiencias recientes de diferentes países en el aprovechamiento de dichas aguas.

Cuadro 41. Reuso de las aguas residuales en países del norte de Africa, Medio Oriente, zona europea mediterranea, zona europea del este y otros

País	Volumen Disponible	Volumen tratado	Tipo tratamiento	Inicio reuso	Inicio Legislación	Area irrigada (ha)	Observaciones	Referencias
Francia			LA, LO	1940	1991	50-600	Enfriamiento, lavado y riego agrícola. Riego subterráneo sin desinfección. Uso de bioreactores de membrana	Faby <i>et. al.</i> , 99 Angelakis <i>et. al.</i> , 99
Italia	7.2×10^4 m ³ /día	60%	P, S, T LA	1900	1976		8,000 plantas de tratamiento: ozonización, filtración por contacto, absorción biológica en carbono, UV, clorinación.	Liberti y Notarnicola, 99 Bonomo <i>et. al.</i> , 99 Nurizzo y Mezzanotte, 94
Grecia	1.3×10^6 m ³ /día	100%		3000 a.c.			Humedales para tratamiento	Angelakis <i>et. al.</i> , 99
Chipre	25×10^6 m ³ /año	(100%)	P, S, T					Angelakis <i>et. al.</i> , 99
Malta	2.5×10^4 m ³ /día		LA, Des	1884		600		Angelakis <i>et. al.</i> , 99
Portugal	6.5×10^8 m ³ /año	90%	S		1992	70,000 aprox.		Angelakis <i>et. al.</i> , 99
España		70×10^6 m ³ /año			1995		Irrigación de cítricos	Angelakis <i>et. al.</i> , 99 Lapena <i>et. al.</i> , 95
Suecia							Riego en plantaciones de sauces	Hasselgreen, 98
Alemania								
Marruecos	5.0×10^6 m ³ /año	10%	LO			7,235	Cultivos exitosos con riego por goteo y aspersión	El Hamoury <i>et. al.</i> , 96 Angelakis <i>et. al.</i> , 99
Túnez	1.6×10^6 m ³ /año	95%	LA, LO	1965	1975	3,200 a 18,000	Los granjeros pagan por el agua tratada	Bahri, 98 Angelakis <i>et. al.</i> , 99
Egipto			S		1984		Construyeron humedales hidropónicos para tratamiento	Stott <i>et. al.</i> , 97
Libano					1930			Angelakis <i>et. al.</i> , 99
Algeria	6.6×10^6 m ³ /año	6%						Angelakis <i>et. al.</i> , 99
Libia			P, S	1971				Angelakis <i>et. al.</i> , 99
Arabia Saudita	1.3×10^6 m ³ /día							Al-Jaloud <i>et. al.</i> , 95

Kuwait	5.5 x 10 ⁴ m ³ /día	100%	P, S, T					Al-Muzini 98
Jordania					1982		Se obtiene doble producción de berenjena, regadas con aguas residuales	Al-Nakshabandi <i>et. al.</i> , 97
Israel	6.0 x 10 ⁶ m ³ /año	100%	P, S, T Aerobio y anaerobio			20,000	Reservorios de agua residual como unidades extensivas de tratamiento. El suelo lo consideran un biofiltro.	Haruvy, 97 Friedler, 99, Angelakis <i>et. al.</i> , 99 Oron <i>et. al.</i> , 99 Oron, 96
Australia			D Lagunas de elevada producción algal				Cultivo experimental de alcachofa	Parameswara <i>et. al.</i> , 99 Falowfield <i>et. al.</i> , 96
Nueva Zelanda							Riego de suelos de bosques evita lixiviación de N hacia aguas subterráneas	Barton <i>et al.</i> , 98
India			P				Agua residual industria petroquímica incrementa producción de granos (trigo, garbanzo, lentejas)	Azis <i>et. al.</i> , 96 Azis <i>et. al.</i> , 95

LA = lodos activados; LO = laguna de oxidación; P = tratamiento primario; S = tratamiento secundario; T = tratamiento terciario; D = dilución con agua de río; Des = desinfección

7.1 Reuso de aguas residuales en Nicaragua (Sucher & Holzer, Proyecto Biomasa. Austria-Nicaragua, 1996).

En 1996 se estableció, un sistema de humedales, denominado Biofiltro Masaya, a fin de reusar el agua residual de tipo doméstico de Villa Bosco Monge de la Ciudad de Masaya, Nicaragua, la cual recibe el desecho de 1,150 personas, con un caudal de 150 m³/día. El biofiltro es un filtro de grava o arena sembrado con plantas de pantano, y atravesado de forma horizontal o vertical con aguas residuales pretratadas. El suministro de oxígeno se realiza a través de las raíces de las plantas o cascadas de aireación. El agua del biofiltro se utilizó para regar 16 cultivos, entre hortalizas, granos básicos y caña de azúcar, en una superficie de 1,100 m². Los valores fisicoquímicos de los efluentes del biofiltro indican que poseen suficientes macronutrientes disponibles para el buen desarrollo de los cultivos. Los valores de concentración de coliformes fecales mostraron valores de 1×10^3 , es decir, dentro del margen que marca la normatividad oficial internacional en materia de calidad de agua para riego.

7.2 Reuso de aguas residuales en Argentina (Fasciolo *et al.* 1998)

En la Argentina el reuso de las aguas residuales para el riego agrícola y forestal observa un incremento en cuanto a las superficies regadas. El valor económico de esta agua radica en su contenido de materia orgánica que sustituye a los fertilizantes en los cultivos. El proceso mayoritariamente usado para mejorar la calidad del agua residual, se basa en las lagunas de estabilización, dada su alta eficiencia para remover agentes patógenos de importancia en la salud pública.

El control de la calidad de las aguas para reuso en agricultura toma como lineamientos a las directrices de Engelberg y las recomendaciones de la Organización Panamericana de la Salud (OPS). Para garantizar su cumplimiento se han realizado actividades de capacitación sobre la aplicación del reuso, las tecnologías de tratamiento y los lineamientos sanitarios entre otros.

Las experiencias en el reuso se tienen en la Provincia de Mendoza, donde se riegan 15,000 ha agrícolas (Campo Espejo, Palmira, Rivadavia y San Martín), en las localidades de Puerto Madryn, Rada Tilly y Comodoro Rivadavia, en la Provincia de Chubut con fines forestales y en Villa Nueva, en la Provincia de Córdoba donde se destina al riego de hortalizas, flores y forestales.

Experiencia en la Provincia de Mendoza

En la Provincia de Mendoza se depura un volumen de 265,000 m³ de efluentes domésticos, de los cuales el 10% recibe tratamiento primario convencional y el resto distintos niveles de tratamiento biológico. En el Campo Espejo, se trata un volumen de 140,000 m³/día, a través de un sistema de 12 series de lagunas facultativas, cada una consta de una primaria, secundaria y terciaria, para un total de 36 lagunas. La calidad obtenida permite su reuso directo a través de convenios entre la empresa operadora, el Departamento General de Irrigación y los regantes de la zona. Se riegan 2,000 ha, beneficiando a 100 explotaciones, donde cultivan vid, hortalizas y forestales.

En la planta de Paramillo, se trata un volumen de 91,000 m³/día, donde el 70% son reutilizadas en reuso directo tras ser volcadas al río Mendoza para su posterior distribución por los canales de riego, usándose en 18,000 ha. El resto del agua (21,000 m³) se reusan de manera directa, beneficiando a 3 explotaciones donde cultivan vid, hortalizas, forraje y forestales. En Junín se realiza reuso en un área propiedad de la empresa operadora, otorgada mediante convenio para fines de investigación, regándose alfalfa y frutales.

7.3 Reuso de aguas residuales en Calcuta, India. (Database India, 1996).

Las aguas residuales domésticas de Calcuta, se estiman en 680 millones de litros diarios, los cuales fluyen a través de un sistema de canales principales que desembocan en las marismas de Calcuta. Aquí las aguas residuales se purifican mediante un proceso natural de oxidación,

radiación y descomposición biológica. La temperatura tropical, la descomposición biológica y la radiación solar de 250 a 600 langley/día (unidad de medida de la radiación) y la poca profundidad del agua (-1 metro), con este proceso natural para mejorar la calidad de las aguas, ha sido posible aprovechar las aguas en piscicultura y agricultura.

Aprovechamiento de las aguas residuales en piscicultura

A partir de 1850, se recuperaron las marismas de Calcuta para la acuicultura de agua salobre. El origen del agua era el río Bidyadhari, afectado por las mareas. En la piscifactoría Nona Bheries se producían peces de agua salobre, con rendimientos de 148 kg/ha. Debido a la colmatación del río Bidyadhari y su muerte, declarada en 1928 por el Departamento de Riego de Bengala, la zona se convirtió en un gran pantano abandonado, posteriormente al descargar las aguas residuales de la ciudad de Calcuta, las marismas que originalmente tenían una salinidad entre 800 y 1200 partes por millón (ppm), disminuyeron por dilución hasta 500 o 600 ppm creándose las condiciones para la piscicultura. En 1945 se tenían 4.685 hectáreas destinadas a la piscicultura con aguas residuales, superficie que disminuyó en 1985 a 3.240 hectáreas, y es la que actualmente se mantiene.

7.4 Reuso de aguas residuales en Australia (EIP, 1993).

Dentro del plan piloto de reciclaje de aguas residuales en Southwell Park, la planta de tratamiento de aguas residuales recoge los desechos de una zona residencial, que genera 300,000 litros/día. Las aguas tratadas sirven para regar 9 hectáreas de parques públicos. El tratamiento de las aguas residuales consta de un proceso de filtración inicial, separación de sólidos, tratamiento biológico, microfiltración y desinfección hipoclorítica.

El Environment Improvement Plan (EIP) (Plan de mejora ambiental) en 1993, puso especial atención en la eliminación de nitrógeno y fósforo, y el agua tratada obtenida se destina al riego de los campos de juego de Southwell, aunque se estudia la posibilidad de aumentar el agua regada a los campos de golf, al hipódromo de Camberra y a los recintos feriales. La calidad del agua tratada logra cumplir con los requisitos más estrictos de calidad en la reutilización urbana y residencial.

7.5 Reuso de aguas residuales en España (Universidad de Murcia, España, 1990).

En el pasado, era común el uso de aguas negras sin tratamiento para riego e incluso en la actualidad se continúa con esta práctica en algunas regiones de España. No fue sino hasta 1995 en que se sometió un decreto para reutilización de aguas residuales, que a la fecha aún no se aplica. Actualmente existe gran interés en reusar aguas residuales de comunidades costeras para regar campos de golf y jardines de zonas hoteleras, así como evitar la contaminación de playas, bahías y lagunas costeras (Angelakis *et al.*, 1999).

Depuración por lagunaje en Murcia.

En el Campus Universitario de Espinardo, Universidad de Murcia, se tiene una experiencia con lagunaje profundo (6.5m) y largo tiempo de retención, superior a 100 días. El seguimiento del sistema ha demostrado que es muy eficaz eliminando las bacterias indicadoras de contaminación fecal, materia orgánica y los nutrientes (Berná, 1990). La laguna ha dado tan buenos resultados que, aún teniendo asociada una laguna de maduración, ésta no se usa, ya que el agua cumple a satisfacción con los requerimientos de calidad sanitaria para el riego de áreas verdes, donde son utilizadas dentro del propio campus.

La depuración de aguas residuales por macrófitas en la provincia de León, para núcleos de población pequeños (estudio de caso en la Diputación y Universidad de León), incluye una planta piloto, que consta de decantador/digestor convencional, o de un sistema de lagunaje que va asociado a una serie de balsas por las que circula el agua, donde se establecen diferentes especies acuáticas de plantas, seleccionando especies autóctonas de la zona; dichas plantas

realizan un tratamiento terciario de las aguas (Ansola y Luis, 1994; Brix y Schierup, 1989), con bajos costos de funcionamiento y mantenimiento. Algunas plantas utilizadas absorben elementos tóxicos como pesticidas o metales pesados (Shutes *et al.*, 1993; Bavor y Michell, 1994). El agua tratada con este sistema logra cumplir con los lineamientos para su reuso en agricultura.

El tratamiento terciario por infiltración-percolación en la depuradora de Sant Luis (Menorca) sirve para pequeños núcleos de población, y consiste en la pulverización del agua procedente de una depuradora convencional (tratamiento secundario) para dispersarla sobre un lecho de arena filtrante de 0.1 ha de superficie y 1.5 m de espesor, lo que sirve para eliminar los sólidos en suspensión, completar la oxidación de la materia orgánica y del nitrógeno amoniacal y la eliminación de microorganismos patógenos. Su funcionamiento es intermitente, de modo que la arena pasa por periodos alternantes de sequedad y humedad, lo que asegura las condiciones aeróbias del proceso. El agua tratada en este caso es utilizada para el riego de agricultura sin restricciones, dada su calidad fisicoquímica y sanitaria obtenida.

7.6 Reuso de las aguas residuales en riego en Portugal

En Portugal antes de 1974 no existía ningún tratamiento para aguas residuales, dada su incorporación a la Comunidad Económica Europea se tiene que para el año 2005 se tendrá que tratar mas del 40% de las aguas residuales del país. En la actualidad se trata un volumen aproximado de aguas residuales que puede cubrir el 10% de la demanda de agua para riego durante un año de sequía. Se considera que el uso de agua residual para riego puede incidir fuertemente en el desarrollo agrícola de varias zonas portuguesas en donde la precipitación es escasa, abarcando una extensión de entre 35,000 y 100,000 hectáreas. Si bien en la actualidad el uso del agua residual es para riego agrícola, se tiene interés en utilizarla para riego de campos de golf (Angelakis *et al.*, 1999).

Se han realizado trabajos experimentales en el Instituto Nacional de Ingeniería Civil (LNIC), utilizando los efluentes de dos plantas de tratamiento de aguas residuales (Evora y Santo André-Sines) de Alentejón, al sur de Portugal. Los efluentes de tres procesos de tratamiento, sedimentación primaria, sedimentación secundaria y lagunas facultativas, se utilizan en riego por gravedad y por goteo en tres cultivos (sorgo, maíz y girasol). También se estableció un lote testigo donde se regaron los tres cultivos con agua potable, y a éstos se les suministró fertilizantes comerciales.

Los rendimientos obtenidos en todos los tratamientos con agua residual, indicaron una adecuada cantidad de nitrógeno presente, de fácil asimilación por las plantas, con un valor de fertilización igual a los fertilizantes comerciales utilizados en los tratamientos con agua potable.

Los resultados, en cuanto a calidad sanitaria, muestran que el nivel de contaminación de los cultivos regados por gravedad con aguas tratadas (tratamiento primario y secundario) es similar a aquellos obtenidos en los tratamientos con agua potable, sin embargo todos cumplían a satisfacción con los estándares de calidad sanitaria para el mercado. Con ésta experiencia el LNIC, en colaboración con otras instituciones prepara un programa para el aprovechamiento de las aguas residuales tratadas en zonas agrícolas comerciales (Joao Bau, 1991).

7.7 Reuso de las aguas residuales en riego en Francia

A nivel nación, no existe una escasez de agua, ésta se da en condiciones locales excepcionales, por lo que el reuso del agua residual no está muy difundido. Sin embargo, el reuso del agua residual es considerado como una forma de tratamiento de las aguas, y las autoridades lo recomiendan particularmente en pequeñas comunidades de la zona costera, con lo que se evita la contaminación de zonas de recreación, de maricultivos, y en general de los ecosistemas costeros.

En general toda el agua residual del país tiene un tratamiento secundario (lodos activados o lagunas de oxidación), y dependiendo del uso posterior del agua requerirá o no un tratamiento terciario.

El reuso de aguas residuales en Francia es reciente, en enero de 1992 se promulgo una ley que solicitaba a cada municipio el definir las zonas para tratamiento, almacenamiento y reuso de aguas residuales. El reuso de aguas residuales no se consideró como una fuente extra de agua, sino como una solución alterna para la descarga de aguas residuales.

La regulación sobre el reuso es estricta y se basa en las categorías de agua residual definida por la Organización Mundial de Salud (WHO, 1994). Se permite el uso de aguas residuales para irrigación agrícola, frutas y vegetales, evitando el contacto directo de las aguas con la cosecha. El riego de parques y jardines con agua residual se puede efectuar con rociadores de poco alcance y en horas no hábiles. Es permitido el riego con agua residual cruda a través de sistemas de conducción enterrados y en áreas donde no se permite el acceso del público.

En algunas zonas turísticas el agua residual de complejos turísticos se infiltra en dunas arenosas a lo largo de la costa. En particular en las islas francesas, en donde hay escasez de agua, se utiliza el agua residual para riego agrícola y campos de golf, y se evita así la contaminación de playas, zonas de actividades acuáticas y de cultivo y pesca de especies marinas. Vale mencionar que en época turística no se vierte agua residual al mar, ésta se almacena en lagunas de oxidación, que funcionan como reservorios y en donde prosigue el proceso de depuración natural. El uso posterior del agua residual extraída de las lagunas redundo en beneficios ecológicos y económicos. El uso de aguas residuales para riego de campos de golf reduce el gasto en un 78%.

El tratamiento en lagunas de oxidación es el más común, se cuenta con más de 2,000 de ellas, y presenta grandes ventajas, sobretodo para zonas rurales dado que:

- la inversión es moderada,
- el costo de manejo y mantenimiento son bajos,
- es confiable y el proceso es totalmente predecible, y
- las lagunas son reservorios temporales en donde no se desperdicia el agua.

(Faby *et al.*, 1999)

7.8 Reuso de las aguas residuales en riego en Italia

Se estima que el volumen de agua que se consume en Italia es alrededor de 50 billones de metros cúbicos por año, de los cuales el 63% es para la agricultura, 25% para la industria y el 12% para consumo humano. Si bien a nivel país no existe escasez del recurso, la distribución geográfica de las fuentes de agua no es homogénea, por lo que en algunos sitios se presenta escasez y se requiere de fuentes alternas de agua. Es así que en la mayoría de los casos el tratamiento y reuso de agua residual es mas con el fin de revitalizar cuerpos de agua (ríos, lagos) y de evitar problemas de contaminación, que de cubrir una necesidad del recurso.

Existen en el país alrededor de 8,000 plantas de tratamiento de aguas residuales, 228 de las cuales son de gran capacidad y representan el 75% de la capacidad purificadora del sistema de plantas. La mayoría de las plantas efectúan un tratamiento secundario (lodos activados) y en algunos casos un tratamiento terciario con la finalidad de tener un control sobre la descarga de nutrientes (P y N). Generalmente se da un tratamiento terciario a las descargas que tienen drenes con menos de 10 km de recorrido antes de arribar a algún cuerpo de agua. En algunos casos se dan tratamientos especializados posteriores (ozonización, adsorción en carbón activado, desinfección con UV, ácido peracético, etc.) cuando se necesitan ciertas características del agua a reusar.

El reuso del agua residual en el norte y centro de Italia se centra particularmente en actividades industriales (textil, acero, etc.), en éstas el costo del agua es tan elevado que el reuso y la

implantación de técnicas de reciclado dentro de las propias industrias ha tenido gran aceptación. Por el contrario el principal uso del agua residual en el sur e islas de Italia es en el riego agrícola.

El uso de aguas residuales para riego agrícola es considerado, dentro del marco legal, como una extensión del tratamiento del agua, en el que se tienen regulaciones muy estrictas desde del punto de vista de higiene y salud pública. Se pretende otorgar a los gobiernos municipales el control del tratamiento de las aguas residuales basado en estándares distintos a los nacionales, que se ajusten a las condiciones locales de las descargas y condiciones del medio (tipo de suelo, clima, orografía, cultivos, etc.) (Bonomo *et al.*, 1999; Liberti y Notarnicola, 1999).

7.9 Reuso de las aguas residuales en riego en Grecia

El reuso de aguas residuales domésticas en Grecia se remonta a 5,000 años, aproximadamente. Se tienen indicios que los pobladores de Minos sufrieron períodos de sequía en los que reutilizaban las aguas residuales. En la actualidad, en la isla de Creta se han construido humedales, que funcionan como lagunas de oxidación, en donde se tratan las aguas residuales, las que posteriormente se utilizan para regar viñedos. En otras partes de Grecia también se tratan las aguas en sistemas de humedales, en donde se plantan pastos pantanosos para consumir los excesos de nutrientes del agua residual. Esta agua se utilizan para irrigar cultivos de remolacha, jitomate y también flores en invernaderos.

En varias comunidades griegas se utilizan dichos humedales para tratar las aguas residuales y utilizar éstas para riego agrícola (cítricos y olivos) y de jardines, así como también para reforestar colinas y recargar acuíferos subterráneos (Angelakis *et al.*, 1999).

7.10 Reuso de las aguas residuales en riego en Malta

La falta de agua en Malta es crítica, y dado que la agricultura es la principal actividad económica se tiene que desde 1884 se considero el reuso de las aguas residuales para riego y preservar así las fuentes de agua para el consumo doméstico.

El agua residual en Malta presenta una elevada DBO (530 mg/l) y una alta salinidad, por lo que ésta se trata (lodos activados, filtros de arena y desinfección con cloro) antes de reusarla en la agricultura. Si bien la DBO se puede disminuir, las sales no se pueden eliminar, sin embargo parece ser que existe una resistencia a las sales en los cultivos de papa, jitomate, frijoles, coles, coliflores, lechuga y fresas. Esta resistencia está posiblemente asociada a la elevada permeabilidad de los suelos calcáreos en donde se encuentran las zonas agrícolas.

Existen dos grandes industrias en Malta que requieren de grandes volúmenes de agua, una planta termoeléctrica que requiere de 1,150 m³/día de agua desionizada para su generador de vapor; y un dique seco en donde se lijan y lavan los cascos de los barcos antes de pintarlos. En ambos casos se utilizan las aguas residuales tratadas (Angelakis *et al.*, 1999).

7.11 Reuso de las aguas residuales en riego en Tunez

Túnez cuenta con 45 plantas tratadoras de aguas residuales, la mayoría de ellas localizadas en la zona costera con el fin de prevenir la contaminación en los complejos turísticos y el mar. El 82% del volumen de las descargas municipales es de origen doméstico, 12% de las industrias y el 6% del turismo, estas descargas son tratadas por un tratamiento secundario. Las aguas residuales tratadas se utilizan totalmente para riego agrícola, práctica que pretende evitar la extracción de agua dulce de los acuíferos. En algunas regiones costeras la extracción de agua del subsuelo ha ocasionado la entrada de la cuña salina en los acuíferos (Angelakis *et al.*, 1999).

Las aguas residuales son utilizadas para regar pastos, viñedos, cítricos, olivos, perales, duraznos, manzanos, alfalfa, sorgo, algodón, tabaco, remolacha y cereales. Se prohíbe el pastoreo directo en pastos regados con aguas residuales. En algunas zonas se riegan con dicha agua campos de golf

y jardines, si el riego es con aspersores se debe tener una zona de amortiguación que impida el contacto de los aereosoles y el agua residual con las personas (Bahri, 1998).

7.12 Reuso de las aguas residuales en riego en Israel

Dada la gran escasez de agua que existe en el lugar, Israel es el país que va a la vanguardia en el reuso de aguas residuales en riego agrícola. En este país, se trata y reusa el 100 % del volumen de agua residual cruda. En el cuadro 42 se da un ejemplo del funcionamiento de tres plantas de tratamiento que generan efluentes para reuso agrícola en Israel.

Cuadro 42. Eficiencia de tres plantas de tratamiento de aguas residuales en Israel (Friedler, 1999).

Tratamiento	Parámetro	Unidades	Planta 1	Planta 2	Planta 3
Agua cruda	Flujo	M ³ /día	9850	5520	1000
	DQO total	Mg/l	1175	960	910
	DQO disuelto	Mg/l	475	440	300
	DBO 5	Mg/l	625	435	450
	Toxicidad	% inhibición	46	37	32
Lagunas anaeróbicas	Tiempo residencia	Días	3.1	9.6	2.0
	Carga orgánica	g DBO/m ³ /día	200	46	200
	DQO remoción	%	33	45	46
	DQO remoción	g DQO/m ³ /día	136	162	150
	PH		7.0	7.2	7.2
Lagunas aeróbicas	Tiempo residencia	Días	3.7	10.3	8
	DBO remoción	%	37	65	53
	DBO remoción	g DQO/m ³ /día	82	72	47
Lagunas aeróbicas y anaeróbicas	DQO efluente	Mg/l	470	185	230
	DBO efluente	Mg/l	110	25	23
	DQO remoción	%	60	82	65
	DBO remoción	%	82	95	95
	Toxicidad efluente	% inhibición	15	10	15
Reservorios agua residual	DBO efluente	Mg/l	10	8	15
	Coliformes fecales efluente	NMP/100 ml	1.3 x 10 ³	1.4 x 10 ³	1.7 x 10 ³
	Toxicidad efluente	% inhibición	4	7	5
	Conductividad efluente	Mmhos/cm	1.58	1.97	1.91
	Boro efluente	Mg/l	0.42	0.39	0.33
Eficiencia	DBO remoción	%	98	98	99
	Reducción toxicidad	%	91	81	84

Los distintos componentes que se encuentran en las aguas residuales pueden causar diferentes impactos, exceso de nitrógeno debajo de la zona de raíces puede ocasionar contaminación de los mantos freáticos, afectar la salud humana, eutroficar cuerpos de agua generar florecimientos masivos de algas y posteriormente muerte de peces. En más de la mitad de los pozos en Israel, la concentración de nitratos es mayor que el estandar máximo permitido en Europa para agua de beber, 45 mg/l, y el 20% de los pozos tienen mas de la concentración permitida en Israel que es de 90 mg/l (Haruvy, 1997).

Un factor muy importante para evaluar el uso de las aguas residuales en irrigación es la concentración de sales, dado que ésta no disminuye con los tratamientos convencionales y se deberá hacer una desalinización, proceso muy caro, para poder reusar éstas. Es sabido que un incremento en la salinidad disminuye la producción agrícola aún en cultivos tolerantes a ésta.

La irrigación con agua residual, rica en nutrientes (N y P), genera un ahorro importante en fertilizantes, sin embargo en función del uso de la misma se deberán dar tratamientos adecuados para evitar problemas de salud pública o ambientales. Se deberá hacer un análisis sobre el beneficio neto del país al usar dichas aguas, aunque se estima que al reusar el agua residual (con diferentes tratamientos) existe un ahorro entre \$0.18 y \$0.51 dólares americanos por metro cúbico, al comparar con irrigación de agua de ríos o pozos (Oron *et al.*, 1999).

En concordancia con el conocimiento actual la irrigación con agua residual puede mantener el desarrollo agrícola y reducir costos. Dicha irrigación deberá ser monitoreada y aplicada con cautela de acuerdo a las políticas de irrigación-fertilización para evitar la lixiviación de nitrógeno hacia mantos freáticos, conjuntamente con otros métodos para disminuir la salinidad y eliminar otros contaminantes.

7.13 Reuso de las aguas residuales en riego en Arabia Saudita

Arabia Saudita es un país árido, sin embargo se ha tenido un gran desarrollo agrícola que abarca cerca de dos millones de hectáreas. El 80% del agua requerida para irrigación proviene aguas subterráneas, por lo que se desea aprovechar al máximo otras fuentes de agua. Se obtiene agua por desalinización del agua de mar, pero el costo es muy elevado, por lo que se ha considerado es reutilizar las aguas residuales.

En las dos últimas décadas se ha aprovechado el agua residual en diferentes regiones del país, se considera que puede ser aprovechado un volumen de 112 millones de metros cúbicos por año. El grave problema con la utilización de aguas residuales para irrigación es la alta salinidad de éstas (hasta 7,273 mg/l en algunas regiones).

Los criterios para reutilizar las aguas residuales son la salinidad, la capacidad de absorción del sodio, el carbonato de sodio residual y el efecto tóxico de iones específicos (Na, Cl, SO₄ y B) que afectan el crecimiento y rendimiento de las cosechas. La salinización de las tierras agrícolas regadas con aguas residuales es el problema a resolver, e inciden en él la orografía, el clima, el tipo de suelos, el manejo del riego y sobretodo la cantidad de sales contenidas en las aguas residuales. Se considera que en los últimos quince años se ha salinizado el 50% de la superficie arable de una las zonas agrícolas del país (Al-Jaloud *et al.*, 95).

Se han utilizado las aguas residuales para cultivar cortinas de árboles para romper el viento y evitar la erosión, se ha visto que el período de sobrevivencia de dichos árboles disminuye significativamente con el incremento de salinidad en el suelo. De igual forma, se ha observado una disminución hasta del 30% en el rendimiento de arroz y alfalfa irrigadas con aguas residuales. Por otro lado se han visto buenos rendimientos al utilizar aguas residuales provenientes de la acuicultura, se estima un ahorro hasta del 50% en lo que a nitrógeno se refiere, al cultivar trigo con dichos efluentes.

Para evitar los problemas de salinización se ha propuesto el irrigar con mezclas de agua residual y agua de pozo, y obtener beneficios de los nutrientes (N y P) presentes en las aguas residuales. Se ha observado que la concentración de metales pesados en cultivos de sorgo y maíz, regados con agua residual, no sobrepasa los límites de seguridad establecidos para el consumo de dichos granos (Al-Jaloud *et al.*, 95).

BIBLIOGRAFÍA

- Al-Jaloud, AA; Hussain, G; Al-Saati, AJ; Karimulla, S., 1995. Effect of wastewater irrigation on mineral composition of corn and sorghum plants in a pot experiment. *Journal of Plant Nutrition*, 18 (8): 1677-1692.
- Al-Muzaini, S., 1998. Industrial wastewater management in Kuwait. *Desalination*, 115: 57-62.
- Al-Nakshabandi, G.A; Saqqar, M..M; Shatanawi, MR; Fayyad, M. y Al-Horani, H., 1997. Some environmental problems associated with the use of treated wastewater for irrigation in Jordan. *Agricultural Water Management*, 34: 81-94.
- Arthur, J. P. 1983. Notes on the design and operation of waste stabilization ponds in warm climates of developing countries. World Bank Technical paper number 7. Washington D. C., USA.
- Álvarez R., J. 1988. Criterios propuestos para el uso y manejo de las aguas residuales en la agricultura. Vol. 1. Memoria del Sexto Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. SMISSC. Querétaro, Qro.
- Angelakis, A.N., M.H.F. Marecos do Monte, L. Bontoux y T. Asano, 1999. The status of wastewater reuse practice in the mediterranean basin: need for guidelines. *Water Res.*, 33: 2201-2217.
- Arango, J. M. 1990. Panorama general sobre la reutilización del agua en el riego agrícola en México. Taller Internacional del Reuso del Agua en la Agricultura. Experiencia México-Israel. Comisión Nacional del Agua-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Los Berros, Méx.
- Arias, H. M. 1989. Calidad del Agua y su manejo en las cuencas de los ríos Tula y Salado en Hidalgo. Términos de Referencia para estudios de impacto ambiental. Documento Mimeografiado. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillos, Méx.
- Aziz, O.; Manzar, M.; Inam, A., 1995. Suitability of petrochemical industry wastewater for irrigation. *Journal of Environmental Science and Health*, 30 (4):735-751.
- Bahri, A., 1998. Fertilizing value and polluting load of reclaimed water in Tunisia. *Wat. Res.*, 32: 3484-3489.
- Bonomo, I., C. Nurizzo, E. Rolle, 1999. Advanced wastewater treatment and reuse: related problems and perspectives in Italy. *Wat. Sci. Tech*, 40: 21-28.
- Castillo Escalante I. 2000. El Saneamiento y la Calidad del Agua. En Tlaloc. No. 18 AMH. Abril/junio 2000. Págs. 4-9.
- INIFAP-CEVAP. 1997. Informes de la estadística agrícola del área de influencia del campo experimental- Valle del Fuerte.
- Comisión Nacional del Agua. 1990. Manual Técnico para el uso, aprovechamiento y manejo de aguas residuales en riego agrícola. CNA. México, D.F.
- Comisión Nacional del Agua. 1995. Distritos de Riego No. 003 Tula y 100 Alfajayucan. Cronología. Gerencia Estatal en Hidalgo. CNA. Mixquiahuala, Hgo.
- Contreras, R.y J. Vázquez. 1999. El tratamiento de aguas residuales municipales. En Tlaloc, Revista de la AMH. No. 16. Sep-dic del 99. Pág.7.

Cortéz, J. E., y R. M. Bravo. 1980. Microorganismos patógenos en agua. Pág. 157-171. Vol. I. Memoria del Segundo Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. SMISSC. Monterrey, N.L.

Cortéz, J. 1988. Remoción de microorganismos en la infraestructura Hidroagrícola del distrito de desarrollo rural 063. Vol III. Memoria del VI Congreso Nacional de Saneamiento Ambiental. Querétaro, Qro.

Cortéz, J. 1990. Caracterización microbiológica de Aguas residuales crudas con fines agrícolas en Alfajayucan Hidalgo. Informe Final. Subcoordinación de Calidad del Agua. Coordinación de Investigación. IMTA. Jiutepec, Mor

Cortinas de N., C. 1988. Prologo del documento Evaluación Epidemiológica de riesgos causados por agentes químicos ambientales. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. Noriega Editores. De. Limusa. Méx. D.F

Cortinas de N., C. . 1990. Parásitos y enfermedades gastroentéricas en el distrito de desarrollo rural 063. Experiencia México-Israel. Taller Internacional del Reuso del agua en la agricultura. . CNA-IMTA. Los Berros, Edo de Méx.

Cuellar C., R y Martínez P.,P. 1978. Alternativas para el control de la descarga de aguas residuales municipales en México. Pp.157-178. Vol. 1. Memoria del Primer Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Guadalajara, Jal.

Database, India. 1996. Experiencia Seleccionada en el Concurso de Buenas prácticas, patrocinado por Dubai, 1996 y catalogada como Best (Best/practices. India.)

De la Parra, C. A. 1991. El proyecto SIDETRAM: dejando atrás el concepto "aprovechamiento de aguas negras". pág. 21-25. Memoria del Seminario Internacional sobre el Uso Eficiente del Agua. México, D.F.

Díaz M., J, A. 1990. Variabilidad de cuatro características de calidad del agua en el Río Tula (Tramo Presa Requena-Ixmiquilpan). Tesis de Maestría. Centro de Edafología. Colegio de Potsgraduados. Institución de Enseñanza e Investigación. Montecillos, Méx.

Díaz M., J, A. 1990.b. Información referente a las aguas residuales usadas en la cuenca del Río Tula. Jefatura de Salinidad y Drenaje. Subgerencia de Riego y Drenaje. gerencia de Distritos de Riego. Comisión Nacional del Agua. México, D.F.

Díaz, J, A. 1991. Observaciones y conclusiones del documento de la Comisión Nacional del Agua, "Anexo 15: Programa de aprovechamiento de aguas residuales ", fechado en septiembre de 1990. Salinidad y Drenaje. Subgerencia de Riego y Drenaje. gerencia de Distritos de Riego. Comisión Nacional del Agua. México, D.F.

Díaz, J. A. 1996. Experiencias en el manejo de tres hortalizas regadas con aguas residuales. Memoria del XXI Congreso Nacional de Ingeniería, A.C. Pág. 68-74. Cholula, Pue.

EIP. 1993. Environment Improvement Plan. Plan piloto de reciclaje de aguas residuales en Southwell Park Australia.

El Hamouri, B.; Handouf, A.; Mekrane, M.; Touzani, M.; Khana, A.; Khallayoune, K y Benchokroun, T., 1996. Use of wastewater for crop production under arid and saline conditions: Yield and hygienic quality of the crop and soil contaminations. Water Science and Technology, 33 (10-11): 327-334.

- Faby, J.A., F. Brissaud y J. Bontouz, 1999. Wastewater reuse in France: water quality standards and wastewater treatment technologies. *Wat. Sci. Tech.*, 40: 37-42.
- Fallowfield, H.J.; Cromar, N.J. y Evison, L.M., 1996. Coliform die-off rate constants in a high rate algal pond and the effect of operational and environmental variables. *Water Science and Technology*, 34 (11): 141-147.
- Fasciolo Graciela; Meca María Isabel; Vélez Oscar. Uso de efluentes domésticos para riego en zonas áridas. El caso de Mendoza. AIDIS, 1998. Citado por Calgano Alberto, Mendiburo Nora y Gaviño Marcelo (2000) Informe sobre la gestión del agua en la república Argentina. *Word Water Vision*
- Feachem, R. G., D. J. Brandley, H. Garelick, y D. D. Mara. 1978. Health aspects of excreta and wastewater management. Part 1, Review and analysis. The World bank. Washington, USA.
- Frías F., R. 1990. Acondicionamiento de aguas residuales para el reuso en riego agrícola. Pág. C-153 - C-159, Memoria del Séptimo Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. SMISSC. Oaxaca, Oax.
- Friedler, E., 1999. The Jeezrael valley project for wastewater reclamation and reuse, Israel. *Wat. Sci. Tech.*, 40: 347-354.
- Fuentes, C. 1994. Caracterización mínima del suelo con fines de riego. Apuntes del Taller de Tecnificación del Riego por Gravedad. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Pp. 1-14.
- García, M. A. 1982. Control de aprovechamiento de las aguas residuales en centros urbanos y rurales de México. Pág. 1-6, Vol. II1. Memoria del Tercer Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. SMISSC. Acapulco, Gro.
- Gerba, C. P., Wallis and Melnick, J.L. 1975. Fate of Wastewater Bacteria and viruses in soil. *ASCE Irrig. Drainage Div. J. IR3*: 157-174.
- Hartman, W. J., Jr. 1975. An Evaluation of Land Treatment of Municipal Wastewater and Physical Siting of Facility Installations, U.S. Department of the Army, mayo 1975.
- Haruvy, N., 1997. Agricultural reuse of wastewater: nation-wide cost-benefit analysis. *Agric. Ecosys. Environ.*, 66: 113-119.
- Hagerdorn, C. E., L. McCoy, and T. M. Rahe. 1981. The Potential for Groundwater Contamination from Septic Effluents. *J. Environ. Qual.* 10: 1-8.
- Hasselgren, K., 1998. Use of municipal waste products in energy forestry: Highlights from 15 years of experience. *Biomass and Bioenergy*, 15 (1): 71-74.
- Hernández I., R. L.. 1988. Análisis jurídico de las atribuciones de los gobiernos federal, Estatal y Municipal en materia de prevención y control de la contaminación de aguas. Vol. II1. Memoria del Sexto Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. SMISSC. Querétaro, Gro..
- IMTA, 1994. Monitoreo de la calidad del agua de riego. Anexo Técnico. 78 pp.
- Iturbe A.,R.1984. El suelo como un sistema de disposición de aguas residuales. Pp.1-7. Vol. 1. Memoria del IV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Morelia, Mich.
- Iturbe Rosario, (1986) Salinidad y disposición de aguas residuales en suelos. Series del Instituto de Ingeniería. No. 500. Instituto de Ingeniería-UNAM.

Joao Bau. 1991. Investigación sobre la conservación del agua en Portugal. Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil. En: Memorias del Seminario Internacional sobre Uso Eficiente del Agua en México. 21-25 de octubre, 1991.

Kadlec, R.H & Knight, R.L.. 1996. Treatment Wetlands. Lewis Publishers. Boca Ratón. 896 pp.

Kowal, N.E., Pahren, H.R. and Akin, E.W. 1980. Microbiological Health Effects Associated with the Use of Municipal Wastewater for Irrigation. Municipal Wastewater in Agriculture. Edited by Frank M Ditri, Jorge Aguirre Martínez and Mauricio Athie Lámbarri. Academic Press. A Subsidiary of Harcourt Brace. Jovanovich, Publisher. New York

Lapena, L.; Cerezo, M. y Garcia-Augustin, P., 1995. Possible reuse of treated municipal wastewater for Citrus spp. plant irrigation. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 55 (5): 697-703.

Leal H.,P. Y Vázquez B.,M. 1988. Correlación de parámetros fisicoquímicos con microorganismos patógenos en aguas residuales utilizadas en el Distrito de Desarrollo Rural de Matamoros, Tamps. Vol.III. Memoria del VI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Querétaro, Qro.

Liberti, L. y M. Notarnicola, 1999. Advanced treatment and disinfection for municipal wastewater reuse in agriculture. *Wat. Sci. Tech*, 40: 235-245.

Luna C., R. y Bojórquez O., R. 1991. Evaluación de diferentes fraccionamientos de una lámina de lavado de suelos ensalitrados utilizando agua residual agrícola. Pág. 43-54. Vol. 1, No. 2. ITSON-DIEP. CD. Obregón, Son.

Mara, D. y Cairncross. 1990. Directrices para el uso sin riesgos de aguas residuales y excretas en agricultura y Acuicultura. Publicada por la OMS en colaboración con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. OMS. Ginebra, Suiza

Maturano, R. C. 1988. Características de la calidad de las descargas de aguas residuales de acuerdo a su origen. Vol. III. Memoria del Sexto Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. SMISSC. Querétaro, Qro.

Metcalf-eddy. 1994. Ingeniería sanitaria, tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales. Edit. Labor, S.A. 3ra edición. Pág.834.

Moeller, G. E. 1986. Aspectos microbiológicos y de salud en el uso de aguas residuales para el riego agrícola. Pág. 80-87, Vol. 1. Memoria del Quinto Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. SMISSC. Puebla, Pue.

McJunkin, F. E. 1988. Agua y Salud Humana. Edit. Limusa. 2ª reimpression. Organización Panamericana de la Salud y Organización Mundial de la Salud. México.

Noyola, A., E. Vega, J. Ramos y C. Calderón. 2000. Alternativas de tratamiento de aguas residuales. Manuales IMTA. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México. 3ra ed. Mod. 1. Pág 58.

Nurizzo, C. y Mezzanotte, V., 1994. Legislative, economical and technical aspects of irrigation with reclaimed wastewater in Italy. *Resources, Conservation and Recycling*, 10 (4): 301-316.

Organización Mundial de la Salud. 1989. Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura. Informe del Grupo Científico de la Organización Mundial de la salud. Ginebra, Suiza.

Oron, G.; Campos, C. y; Gillerman, L., 1999. Wastewater treatment, renovation and reuse for agriculture. *Agricultural Water Management*, 38 (3): 223-234.

Orta, M. T. 1984. Criterios para el aprovechamiento de aguas residuales en riego agrícola en México. Pág. 268-272, Vol. 1. Memoria del Cuarto Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. SMISSC. Morelia, Mich.

Overseas Development Administration. 1995. Impact of wastewater reuse on groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo State: Phase I report feb 1995. CNA-British Geological Survey.

Parameswaran, M., 1999. Urban wastewater use in plant biomass production. *Conservation and Recycling*, 27 (1-2): 39-56.

Peña, P. E., M. Montiel, B. de León, M. R. Angulo, y S. V. Fuentes. 1999. Metodología para aumentar la eficiencia global en Distritos de Riego. En Memorias del IX Congreso Nacional de Irrigación. Simposium 5. pp 91-98.

Pescod, M. B. 1992. Wastewater treatment and use in agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 47. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.

Pettygrove, G. S. y T. Asano. 1985. Irrigation with reclaimed municipal wastewater. A guidance manual. Lewis Publishers Inc. USA.

Pulido, M. L., B. Robles, J. López de Santana, O. Lemus, S. Jaimes, J. González, y O. X. Cisneros. 1998. Identificación con imágenes de satélite y el sistema de información geográfica, de la salinidad del suelo y de los problemas de drenaje del distrito de Riego 075 Río Fuerte. S de R.L. de I.P. y C.V. Red del Valle del Fuerte- CNA-IMTA.

Ramírez, A., A. 1978. Microorganismos patógenos presentes en el agua residual doméstica y en suelos irrigados con ella. Pág. 284-298. Vol. 1. Memoria del Primer Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. SMISSC. Guadalajara, Jal.

Ramírez, G. A. 1988. Criterios técnico-sanitarios para el aprovechamiento de aguas residuales en riego agrícola. Vol. II1. Memoria del Sexto Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. SMISSC. Querétaro, Qro.

Reddy, K. R. and Tucker A. Debusk (1983) State of the Art Utilization of Aquatic Plants in Water Pollution Control. *Wat. Sci. Tech.* Vol.19. No. 10. Pp 61-79.

Rivas, H. A. (1997). Lechos de Plantas acuáticas (LPA) para el tratamiento de aguas residuales. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XII No. 3, II Época. Septiembre-diciembre.

Rico, M. M., C. Sánchez, y G. G. Idiaquez. 1988. Variación microbiológica de verduras regadas con agua de reuso y un ensayo para su normalización. Vol. II1. Memoria del Sexto Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. SMISSC. Querétaro, Qro.

Romero, A. H. 1988. Utilidad y Riesgo del Uso de las Aguas residuales. *Panorama*. pág. 19-23 Año 1. No. 4. *Ingeniería Ambiental*. Sección Mexicana de la AIDIS. Revista de la Sociedad mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental A.C. México, D.F.

Romero, A. H. 1993. México, caso de estudio. El uso de las aguas residuales del área metropolitana de la ciudad de México en el riego agrícola del Valle del Mezquital. Taller Regional para América sobre aspectos de salud, agricultura y ambiente vinculados al uso de aguas residuales IMTA-CNA. Jiutepec, Mor.

Sánchez, H. V. 1982. Presencia de bacterias en el interior de tejidos de plantas que fueron cultivadas con agua residual. Pág. 577-594. Vol. 1. Memoria del Tercer Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. SMISSC. Acapulco, Gro.

SARH-CNA-IMTA. 1994. Anexo técnico. Monitoreo de la calidad del agua de riego. 78 pp.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. s/f. Programa de Rehabilitación Ecológica en el Valle del Mezquital, Cuenca del Pánuco, región Huichapan, Hgo. SARH.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1981. Investigación del comportamiento de la calidad del agua en función de descargas de contaminantes y su efecto en la flora y la fauna acuática. Subdirección de Investigación y Entrenamiento. Dirección de Protección y Ordenación Ecológica. Subsecretaría de Planeación. SARH. México, D.F.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1981.b. Clasificación del Río Moctezuma (Cuenca del Pánuco) hasta la estación hidrométrica Las Adjuntas. Departamento de Clasificación de Cuerpos Receptores. Subdirección de Normas y Vigilancia. Dirección General del Uso del Agua y Prevención de la Contaminación. Subsecretaría de Planeación. SARH. México, D.F.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1984. Estudio agrológico detallado tercera unidad del Distrito de Riego 075, Valle del Fuerte, municipios de Ahome y el Fuerte, Estado de Sinaloa. Subdirección de Agrología, Residencia de Agrología en Culiacán, Sinaloa.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1985. Estudio agrológico detallado segunda unidad del Distrito de Riego 075, Valle del Fuerte, municipios de Guasave, Sinaloa de Leyva y Ahome. Estado de Sinaloa. Subdirección de Agrología, Residencia de Agrología en Culiacán, Sinaloa.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1992. Reportes de análisis de los muestreos de aguas en el Valle del Mezquital. Departamento de Laboratorio. Subdirección de Investigación y Entrenamiento. Dirección de Protección y Ordenación Ecológica. Subsecretaría de Planeación. SARH. México, D. F.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1997. Estudio agrológico de reconocimiento de las zonas bajas del Estado de Sinaloa. Dirección de Agrología, México.

Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. 1986. Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación de Aguas. Serie: Normatividad Ecológica. No. 4. Colección Los Básicos. Subsecretaría de Ecología. SEDUE., México, D. F.

Secretaría de Desarrollo Social. 1993. Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Protección Ambiental. Diario Oficial de la federación México, D. F.

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca 1997. Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la federación México, D. F.

Secretaría de Recursos Hidráulicos. S/f. a. Técnicas de análisis fisicoquímicos para aguas. Subdirección de Investigación y Entrenamiento. Dirección General de Usos de Agua y Prevención de la Contaminación. SRH.

Secretaría de Recursos Hidráulicos. S/f. b. Manual del curso Análisis de Aguas y Aguas de Deshecho. Curso B. Vol. II. Dirección General de Usos de Agua y Prevención de la Contaminación. Subsecretaría de Planeación. SRH.

Secretaría de Recursos Hidráulicos. S/f. c. Manual del curso Análisis de Aguas y Aguas de Deshecho. Curso B. Vol. III. Dirección General de Usos de Agua y Prevención de la Contaminación. Subsecretaría de Planeación. SRH.

Siebe C. and Cifuentes E. 1995. Environmental Impact of wastewater irrigation in central Mexico: an overview. pag. 161-173, Vol. 5. International Journal Of Environmental Health Research.

Shuval, H.I., Yekutieli, P. and Fattal B. 1986. An Epidemiological Model of the potential health Risk associated with various pathogens in wastewater irrigation. pag. 191-198. Vol. 18. No.10. Water Science Technology. Great Britain.

Solis A., R and Longoria R., I. 1981. Operation of pilot municipal wastewater treatment plant for agricultural reuse. Municipal Wastewater in Agriculture. Edited by Frank M Ditri, Jorge Aguirre Martínez and Mauricio Athie Lámbarri. Academic Press. A Subsidiary of Harcourt Brace. Jovanovich, Publisher. New York

Stott, R., T. Jenkins, M. Shabana y E. May, 1997. A survey of the microbial quality of wastewaters in Ismailia, Egypt and the implications for wastewater reuse. Wat. Sci. Tech., 35: 211-217.

Strauss, M. 1991. Human waste use: health protection practices and scheme monitoring. pag. 67-79, Vol. 24. No. 9. Water Science Technology. Great Britain.

Sucher & Holzer, Proyecto Biomasa. Austria-Nicaragua. (1996). Estudio Microbiológico de los cultivos irrigados con aguas tratadas del biofiltro Masaya-Nicaragua. 60 pp. Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) Managua, Nicaragua.

Tejeda G. C. 1985. Uso de las aguas residuales en riego agrícola en zonas con escasa disponibilidad de agua. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería de la UAEM. 123 pp.

Tejeda G., C., Orta L., M.T. y Sotomayor M., J.L. 1985. Evaluación del control de la contaminación por el reuso agrícola del agua residual. Comisión Nacional del Plan Hidráulico. SARH.

Universidad de Murcia, España, 1990. Depuración por lagunaje en Murcia, Esp.

UNESCO. 1980. Aquifer contamination and protection. Editor General R. E. Jackson. Project 8.3 of the International Hydrological Programme. Paris, Francia.

WHO, 1994. *Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture*. Technical Report Series 778, Geneva, Switzerland.

AGRADECIMIENTOS

El presente informe es el resultado de la colaboración de diversas personas que promovieron y desarrollaron las ideas y conceptos que aquí se presentan. En especial se agradece el apoyo de la Gerencia de Estudios para el Desarrollo Hidráulico Integral de la Comisión Nacional del Agua, a través del Ing. Mario Villarreal, subgerente de Integración de Proyectos Hidroagrícolas, y a los ingenieros Ruben Armendariz, y José Luis Lucio Medina, Especialistas en Hidráulica de dicha subgerencia.



43978

CENCA (Ej.1)