



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

67  
ZET

FACULTAD DE INGENIERIA

**" TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES  
EN SUELOS "**

**TESIS PROFESIONAL  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO CIVIL  
P R E S E N T A:  
CARLOS JESUS GARCIA FERNANDEZ GALICIA**

**FALLA DE ORIGEN**



DIRECTOR DE TESIS:  
ING. ENRIQUE CESAR VALDEZ

**CD, UNIVERSITARIA, MEXICO**

**1995**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-1-163/93

Señor  
**CARLOS JESUS GARCIA FERNANDEZ GALICIA**  
Presente.

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **ING. ENRIQUE CESAR VALDEZ**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

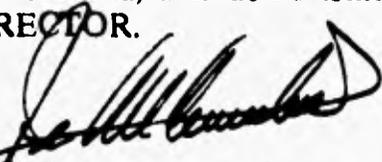
**"TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN SUELOS"**

- I . INTRODUCCION
- II . MECANISMOS DE REMOCION DE CONTAMINANTES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL SUELO
- III . SISTEMAS DE IRRIGACION
- IV . SISTEMAS DE INFILTRACION
- V . SISTEMAS DE ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL
- VI . SISTEMAS DE APLICACION DE LODOS
- VII . IMPACTO AMBIENTAL DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL SUELO
- VIII . LEGISLACION NACIONAL RELATIVA A LA PREVENCION Y CONTROL DE LA CONTAMINACION ORIGINADA POR LA INFILTRACION DE AGUAS RESIDUALES EN LOS SUELOS
- IX . SITUACION Y EXPECTATIVAS EN MEXICO DEL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL EN SUELOS.

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria, a 15 de noviembre de 1993.  
EL DIRECTOR.

  
ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS  
JMCS/RCR\*nl

---

## **AGRADECIMIENTOS**

---

**AGRADECIMIENTOS**

---

**A mi madre, cuyo recuerdo y enseñanzas me han guiado por el camino de  
la vida**

---

**AGRADECIMIENTOS**

---

**A Maritza con mucho cariño, amor y agradecimiento le dedico este trabajo**

---

**A mi familia, a mi padre Carlos Miguel, a mis hermanas Maria Esther, Maria Elena y Rosa y muy especialmente a mi tia Esperanza, por todo lo que me han proporcionado**

**A la familia Arganis Juárez por el interés, motivación, ánimo y ayuda que me han brindado para realizar este trabajo y por ser excelentes personas**

**Mi reconocimiento y gratitud al Ingeniero Enrique César Valdez, por ser mi profesor en diversas asignaturas, mi director de tesis y principalmente por su amistad**

**A los profesores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, por la dedicación que tienen para transmitir sus experiencias y conocimientos a los alumnos**

**Al Ingeniero Ricardo Padilla Velázquez por ser un muy buen profesor y amigo.**

**Al Ingeniero Carlos Manuel Menéndez Martínez por brindarme la primera oportunidad de desempeñarme en la actividad profesional y por permitirme hacer uso de su material bibliográfico**

**A mis compañeros Leo, Homero e Isaac**

---

---

**TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN SUELOS**

---

## TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN SUELOS

**OBJETIVO:** Conocer, describir y explicar los distintos procesos de tratamiento de aguas residuales en los suelos, considerando la importancia que pueden tener estos procedimientos como alternativas de tratamiento de aguas residuales en nuestro país, así como el impacto ambiental de los mismos.

### INDICE

#### 1. INTRODUCCION

|   |    |
|---|----|
| 1.1 El agua un recurso imprescindible   | 1  |
| 1.2 Distribución de los recursos hidráulicos en el mundo                      | 1  |
| 1.3 La contaminación del agua   | 2  |
| 1.4 Antecedentes respecto al tratamiento de aguas residuales en general       | 3  |
| 1.4.1 La importancia del tratamiento de las aguas residuales                  | 3  |
| 1.4.2 Niveles de tratamiento  | 4  |
| 1.4.3 Variables a considerar en la selección de los procesos de tratamiento   | 5  |
| 1.5 Desarrollo de los procesos de tratamiento de aguas residuales en el suelo | 6  |
| 1.5.1 Desarrollo histórico  | 6  |
| 1.5.2 Generalidades sobre el tratamiento de aguas residuales en el suelo      | 8  |
| 1.5.3 Selección de la zona de vertido   | 13 |

#### 2. MECANISMOS DE REMOCION DE CONTAMINANTES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL SUELO

|   |    |
|---|----|
| 2.1 Aspectos básicos  | 17 |
| 2.2 Presencia y descomposición de la materia orgánica en el suelo | 18 |
| 2.3 Eliminación del nitrógeno                                     | 22 |
| 2.4 Degradación del fósforo                                       | 25 |
| 2.5 Metales pesados   | 28 |
| 2.6 Cationes intercambiables y sales                              | 28 |
| 2.7 Remoción por medio de la vegetación                           | 29 |
| 2.8 Remoción de microorganismo patógenos                          | 30 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| <b>3.</b> | <b>SISTEMAS DE IRRIGACION</b>   |    |
| 3.1       | Características principales de los sistemas de riego                                  | 36 |
| 3.1.1     | Riego por infiltración subterránea  | 36 |
| 3.1.2     | Riego superficial   | 36 |
| 3.1.3     | Riego por aspersión   | 37 |
| 3.2       | Diseño de sistemas de riego   | 43 |
| 3.2.1     | Objetivos del proyecto de sistemas de riego   | 43 |
| 3.2.2     | Elección del terreno o emplazamiento por irrigar                                      | 44 |
| 3.2.3     | Grado de tratamiento requerido previo a la aplicación                                 | 45 |
| 3.2.4     | Clima y almacenamiento  | 48 |
| 3.2.5     | Cargas de agua residual por aplicar   | 46 |
| 3.2.6     | Cargas de nitrógeno   | 48 |
| 3.2.7     | Tasas de aplicación de fósforo  | 49 |
| 3.2.8     | Carga orgánica  | 49 |
| 3.2.9     | Superficie del terreno requerida  | 49 |
| 3.2.10    | Elección del cultivo apropiado para irrigar   | 51 |
| 3.2.11    | Sistema de drenaje para el área de riego  | 54 |
| 3.2.12    | Regulación o control del escurrimiento superficial derivado del sistema de irrigación | 55 |
| 3.2.13    | Ejemplo de cálculo de un balance de aguas para un sistema de riego                    | 57 |
| <b>4.</b> | <b>SISTEMAS DE INFILTRACION</b>   |    |
| 4.1       | Generalidades   | 59 |
| 4.2       | Sistemas de infiltración rápida   | 60 |
| 4.2.1     | Descripción del proceso   | 60 |
| 4.2.2     | Aplicaciones y eficiencia del proceso   | 61 |
| 4.2.3     | Criterios de diseño   | 62 |
| 4.2.3.1   | Objetivos del proyecto  | 62 |
| 4.2.3.2   | Selección del emplazamiento   | 64 |
| 4.2.3.3   | Nivel de tratamiento requerido antes de la disposición del agua residual              | 64 |
| 4.2.3.4   | Condiciones climatológicas y almacenamiento   | 64 |
| 4.2.3.5   | Cargas de aplicación  | 64 |
| 4.2.3.6   | Métodos de distribución   | 67 |
| 4.2.3.7   | Períodos de aplicación  | 67 |
| 4.2.3.8   | Regulación del flujo subterráneo y recuperación del agua renovada                     | 67 |
| 4.2.4     | Características del proceso y calidad del efluente                                    | 73 |
| 4.3       | Sistemas de infiltración lenta  | 74 |
| 4.3.1     | Descripción general   | 74 |
| 4.3.2     | Aplicaciones del proceso  | 75 |
| 4.3.3     | Eficiencia del proceso  | 75 |
| 4.3.4     | Criterios de diseño   | 76 |
| 4.3.5     | Características del proceso y calidad del efluente                                    | 76 |

**5. SISTEMAS DE ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>5.1 Generalidades</b>   | <b>77</b> |
| 5.2 Objetivos de diseño  | 78        |
| 5.3 Criterios de aplicación  | 78        |
| 5.4 Elección del emplazamiento   | 79        |
| 5.5 Nivel de tratamiento previo a la aplicación                            | 80        |
| 5.6 Condiciones climatológicas y características de almacenamiento         | 80        |
| 5.7 Eficiencias del proceso de tratamiento                                 | 80        |
| 5.8 Cargas de aplicación   | 81        |
| 5.8.1 Carga hidráulica   | 81        |
| 5.8.2 Carga orgánica   | 82        |
| 5.8.3 Tasas de aplicación de nitrógeno                                     | 82        |
| 5.8.4 Cargas de aplicación de fósforo y metales                            | 82        |
| 5.9 Superficie del terreno requerida                                       | 83        |
| 5.10 Características de las terrazas en las que se aplica el agua residual | 83        |
| 5.11 Selección de la vegetación  | 83        |
| 5.12 Técnicas de distribución  | 85        |
| 5.12.1 Aplicación por aspersión  | 85        |
| 5.12.2 Disposición superficial   | 85        |

**6. SISTEMAS DE APLICACION DE LODOS**

|   |            |
|---|------------|
| <b>6.1 Características de los lodos</b>                                     | <b>87</b>  |
| 6.1.1 Origen de los lodos   | 87         |
| 6.1.2 Propiedades de los lodos  | 89         |
| <b>6.2 Objetivos de los sistemas de aplicación de lodos</b>                 | <b>93</b>  |
| <b>6.3 Selección del sitio de aplicación</b>                                | <b>93</b>  |
| <b>6.4 Transporte y distribución comercial</b>                              | <b>94</b>  |
| <b>6.5 Procedimientos de operación y aplicación</b>                         | <b>95</b>  |
| <b>6.6 Cargas de aplicación</b>   | <b>97</b>  |
| 6.6.1 Carga de nitrógeno  | 99         |
| 6.6.2 Metales pesados   | 102        |
| <b>6.7 Nuevos sistemas de disposición de aguas residuales en el terreno</b> | <b>104</b> |
| 6.7.1 Vertido en terrenos inundados   | 104        |
| 6.7.2 Otros usos de los lodos en la agricultura                             | 106        |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| <b>7.</b> | <b>IMPACTO AMBIENTAL DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL SUELO</b>  |     |
| 7.1       | Definición e importancia del impacto ambiental  | 108 |
| 7.2       | Clasificación de metodologías para el estudio del impacto ambiental   | 112 |
| 7.3       | Listas de verificación de impactos  | 113 |
| 7.4       | Matriz de evaluación de impactos ambientales  | 116 |
| 7.4.1     | Impactos ocasionados por los sistemas de irrigación   |     |
| 7.4.2     | Impactos debidos a la infiltración de las aguas residuales  | 125 |
| 7.4.3     | Impactos producidos por los sistemas de escurrimiento superficial   | 133 |
| 7.4.4     | Impactos provocados por la aplicación de lodos en el terreno  | 134 |
| 7.5       | Medidas de mitigación   | 135 |
| 7.5.1     | Salinidad   | 136 |
| 7.5.2     | Metales pesados   | 136 |
| 7.5.3     | Riego agrícola y efectos en la salud  | 137 |
| 7.5.4     | Detergentes   | 140 |
| 7.5.5     | Materia orgánica  | 141 |
| 7.5.6     | Nitrógeno   | 141 |
| 7.5.7     | Sólidos suspendidos   | 142 |
| 7.5.8     | Grasas y aceites  | 142 |
| 7.5.9     | Potencial de hidrógeno  | 142 |
| 7.5.10    | Otros compuestos  | 142 |
| 7.6       | Consideraciones respecto a los impactos ambientales provocados por la disposición de aguas residuales en el terreno                               | 142 |
|           |   | 143 |
| <b>8.</b> | <b>LEGISLACION NACIONAL RELATIVA A LA PREVENCION Y CONTROL DE LA CONTAMNACION ORIGINADA POR LA INFILTRACION DE AGUAS RESIDUALES EN LOS SUELOS</b> |     |
| 8.1       | Antecedentes  | 145 |
| 8.2       | Ley de Aguas Nacionales   | 147 |
| 8.2.1     | Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales  | 149 |
| 8.3       | Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente  | 151 |
| 8.3.1     | Reglamento de la LGEEPA para Prevención y Control de la Contaminación de Aguas  | 155 |
| 8.3.2     | Reglamento de la LGEEPA en Materia de Impacto Ambiental   | 156 |
| 8.3.3     | Reglamento de la LGEEPA en Materia de Residuos Peligrosos   | 156 |
| 8.4       | Ley General de Salud  | 157 |
| 8.5       | Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Protección al Ambiente   | 158 |

|  |         |
|--|---------|
| <b>9. SITUACION Y EXPECTATIVAS EN MEXICO DEL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL EN SUELOS</b>               |         |
| 9.1 Panorama de la distribución de los recursos hidráulicos y del empleo de aguas residuales en México | 168     |
| 9.1.1 Situación general  | 168     |
| 9.1.2 Diagnóstico de la distribución de los recursos hidráulicos                                       | 169     |
| 9.1.3 Diagnóstico del aprovechamiento de aguas residuales  | 170     |
| 9.1.4 Diagnóstico de la infraestructura de tratamiento   | 172     |
| 9.2 Riego con aguas residuales en México   | 173     |
| 9.2.1 Principales zonas de irrigación con aguas residuales   | 173     |
| 9.2.2 Utilidad y riego del uso de las aguas residuales en la agricultura                               | 175     |
| 9.3 Situación de la infiltración de las aguas residuales en nuestro país                               | 177     |
| 9.4 Expectativas de la aplicación de sistemas de tratamiento en suelos en México                       | 179     |
| 9.5 Objetivos y estrategias del aprovechamiento de las aguas residuales                                | 181     |
| 9.6 Conclusiones   | 185     |
| <br><b>BIBLIOGRAFIA</b>  | <br>188 |

---

## **1. INTRODUCCION**

---

## CAPITULO 1

### INTRODUCCION

#### 1.1 El agua un recurso imprescindible

El agua es indispensable para la vida en nuestro planeta, no es simplemente un líquido incoloro, inodoro e insípido, sino que su importancia es aún mayor. Consta de dos elementos: dos partes de hidrógeno y una de oxígeno; estos dos elementos, en forma de átomos se combinan para dar una molécula de agua ( $H_2O$ ). Entre las muchas funciones que realiza el agua cabe mencionar las reacciones químicas en las que interviene, siendo la más importante de ellas la hidrólisis de los hidratos de carbono, grasas y proteínas, paso esencial en la digestión y asimilación de alimentos; además, una de las propiedades más notables del agua es la de poder disolver gran número de sustancias. El agua como solvente no se ve alterada químicamente por las sustancias que disuelve y puede por lo tanto ser recuperada para su reuso. Cabe mencionar también que el agua es parte importante del proceso de fotosíntesis, llevado a cabo por las plantas verdes.

El agua cubre tres cuartas partes de la superficie de la Tierra y constituye del 50 al 90 % del peso de todas las plantas y animales.

#### 1.2 Distribución de los recursos hidráulicos en el mundo

El agua tiene propiedades poco comunes y existe en nuestro planeta en tres estados físicos: sólido, líquido y gaseoso. Si está sometida a bajas temperaturas se congela formando hielo, fluye sobre y a través de la tierra al encontrarse en estado líquido; en estado gaseoso se acumula en la atmósfera y forma nubes.

Teóricamente el volumen de agua existente en la Tierra es constante desde las primeras épocas del planeta. Se han realizado diversas estimaciones sobre la distribución del líquido en el mundo, como las mostradas en los Cuadros 1.1 y 1.2.

Para el caso de la República Mexicana se estima un total de 365 932 millones de metros cúbicos de agua superficial, que comprende vertientes y ríos principales; además de un total explotable de 255 km<sup>3</sup>/anuales de aguas subterráneas, de las cuales se consideran aprovechables 28 km<sup>3</sup> anuales.

---

Cuadro 1.1

| <b>DISTRIBUCION Y VOLUMEN MUNDIAL DEL AGUA SUPERFICIAL</b> |                                  |                   |
|--|----------------------------------|-------------------|
| <b>Fuente</b>  | <b>Volumen en km<sup>3</sup></b> | <b>Porcentaje</b> |
| Agua de mares y océanos                                    | 1'370,000,000                    | 98.2519           |
| Hielo polar y nieve  | 24'000,000                       | 1.7212            |
| Lagos de agua dulce  | 150,000                          | 0.0108            |
| Lagos de agua salada                                       | 130,000                          | 0.0093            |
| Agua en corrientes   | 1,200                            | 0.0001            |
| Agua constitutiva de los suelos                            | 80,000                           | 0.0057            |
| Vapor atmosférico  | 14,000                           | 0.0010            |
| <b>TOTAL</b>   | <b>1'394,375,200</b>             | <b>98.2519</b>    |

Fuente: Murguía Vaca, Ernesto. Evaluación, Efectos y Solución de la Contaminación del Agua. UNAM, México, D.F.

Cuadro 1.2

| <b>AGUA SUBTERRANEA MUNDIAL</b> |                                  |
|---------------------------------|----------------------------------|
| <b>Concepto</b>                 | <b>Volumen en km<sup>3</sup></b> |
| Total explotable                | 60'000,000                       |
| Zona de activa producción       | 4'000,000                        |

Fuente: Murguía Vaca, Ernesto. Evaluación, Efectos y Solución de la Contaminación del Agua. UNAM, México, D.F.

### 1.3 La contaminación del agua

La abundancia de los recursos hidráulicos en la mayor parte del mundo, provocó que el hombre descuidara un gran número de corrientes, acuíferos y lagos en los que arroja y deposita enormes cantidades de desechos. Esta práctica se intensificó con el crecimiento desmedido de la población y de las zonas urbanas. Las grandes ciudades se convirtieron en enormes "fábricas de desechos" al grado de que la industrialización (símbolo del progreso en los siglos XVIII y XIX) pasó a ser la personificación del deterioro ambiental que el ser humano ha provocado sobre la naturaleza, incluyendo dentro de ésta al agua.

La contaminación de las aguas superficiales se debe tanto a causas naturales como a artificiales. La contaminación natural de las aguas ocurre debido a la presencia de sustancias y materias arrastradas y disueltas en los cuerpos de agua, cuya presencia altera las características de este líquido y puede llegar a hacerlo nocivo. Los medios artificiales de contaminación del agua

tienen lugar cuando el ser humano agrega materia, sustancias o energía al agua, provocando la alteración de sus propiedades y características.

El crecimiento de la población y la industrialización aumentan el consumo del agua, además de que incrementan el volumen de desechos. Si se transportan los desechos hacia el mar se intenta que la capacidad de autodepuración de las corrientes permita la "limpieza" de las mismas, pero se atenta contra la naturaleza, pues dicha capacidad de autodepuración de las corrientes superficiales llega a eliminarse si se agota el oxígeno disuelto en el agua.

Las aguas subterráneas no se encuentran exentas de la contaminación, a pesar de estar resguardadas bajo la superficie terrestre y de constituir un volumen considerable. El agua subterránea puede presentar problemas en cuanto a su calidad y volumen, ya que éste último no es inagotable. Las arenas y otros suelos de granos finos, así como ciertos tipos de rocas pueden provocar contaminación química al ser disueltos. La contaminación de las aguas subterráneas puede originarse también por la infiltración de aguas contaminadas y lixiviados que llegan hasta los acuíferos, que se recargan con aguas contaminadas; esto constituye un peligro muy serio para la salud de las personas y de los animales que pudieran llegar a beber estas aguas.

Algunos de los compuestos que pueden estar presentes en las aguas subterráneas son: metano, ácido sulfhídrico y bióxido de carbono que se originan por la descomposición de las plantas y de diversas sustancias orgánicas en el suelo. Por otra parte, la capacidad de autopurificación de las aguas subterráneas es mucho más limitada que la de los cuerpos de agua superficiales.

La contaminación de las aguas marinas es también un fenómeno preocupante; la descarga desmedida de petróleo y de otros hidrocarburos a los océanos, como principales contaminantes es causante del deterioro ecológico y de la amenaza bajo la cual se encuentra la vida marina.

Al estudiar el problema de la contaminación del agua es posible tomar conciencia sobre la necesidad primordial de conservar este recurso, para preservar la vida en la Tierra. Dicha preservación implica entre otras cosas economizar en el uso de este líquido y en el reuso que pueda dársele a las aguas servidas. La reutilización de las aguas residuales sólo debe realizarse cuando se ha dado un tratamiento a las aguas servidas; el grado de tratamiento requerido para ello, dependerá del uso que desee dársele a las aguas.

#### **1.4 Antecedentes respecto al tratamiento de aguas residuales en general**

##### **1.4.1 La importancia del tratamiento de las aguas residuales**

Un agua residual es el agua potable o de primer uso a la que se le han agregado diferentes sustancias, elementos, compuestos en estado sólido, líquido, gaseoso o energía en cualquiera de sus formas (por ejemplo térmica). La presencia de sustancias ajenas a la composición natural del agua constituye contaminación que altera las características del agua.

Existen diferentes fuentes de aportación de las aguas residuales, como son: domésticas, municipales, industriales. El tratamiento de las aguas residuales consiste en la separación de los elementos sólidos y líquidos que le son agregados al agua potable al ser utilizadas en las distintas

---

actividades humanas. Se efectúa generalmente, con la finalidad de reducir la concentración de los elementos que puedan causar algún tipo de contaminación o que puedan ocasionar daños a la salud del hombre y de los animales.

La herramienta fundamental dentro de las acciones encaminadas al control de la contaminación del agua la constituyen los sistemas de tratamiento de aguas residuales; gracias a ellos es posible mejorar la calidad de las aguas de desecho y hacen posible su reúso, protegiendo además a la calidad de los cuerpos receptores y a la salud pública.

#### **1.4.2 Niveles de tratamiento**

Existen diferentes niveles de tratamiento que pueden dársele a las aguas servidas, de acuerdo con la calidad del efluente que se espera obtener. De esta manera se determinan los niveles de tratamiento siguientes: pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario. El pretratamiento consiste en la separación de los desechos de mayor tamaño que se encuentren presentes en la corriente de aguas residuales, se lleva a cabo por medios físicos, que generalmente consisten en canales de llamada, rejillas y canales desarenadores, en el caso de plantas de tratamiento. Al pasar el fluido por dichas unidades se eliminan los desechos de tamaño tal que puedan ser retenidos por las rejillas y las partículas cuya magnitud es similar a las arenas y que se depositan en el fondo del canal desarenador, por acción de la fuerza de gravedad.

En el tratamiento primario se alcanza solamente una depuración parcial de las aguas; por lo general es utilizado cuando el efluente puede ser depositado en corrientes o cuerpos de agua en los que pueda presentarse una dilución suficiente que asegure mantener concentraciones de contaminantes que se encuentren dentro de los valores permitidos según lo especifican las Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Protección Ambiental y los Criterios Ecológicos correspondientes, para la utilización posterior que desee dársele a esas aguas. Se utilizan principalmente procesos físicos para ello, tales como la sedimentación.

Cuando las aguas de desecho han sido tratadas hasta un grado secundario se considera aceptable su disposición en el suelo o subterránea, previa dilución para disminuir el riesgo de contaminación de acuíferos. El riego de cultivos es el uso que se acepta más ampliamente para las aguas que han sido depuradas hasta el nivel secundario de tratamiento, este grado de tratamiento debe exigirse por parte de las autoridades federales encargadas de la prevención y control de la contaminación ambiental en México. En el nivel secundario predominan los procesos biológicos de tratamiento, en los que tiene lugar la acción bacteriológica; además de procesos físico-químicos, generalmente de menor importancia. Algunos ejemplos de los procesos biológicos se presentan en el Cuadro No. 1.3.

En caso de querer obtener un efluente de mayor calidad, es necesario llevar a cabo un tratamiento de tipo terciario; este alcance de tratamiento es difícil de obtener, debido principalmente a los altos costos que representa implantar sistemas capaces de depurar hasta este nivel a las aguas servidas. En caso de poder aplicar a las aguas un tratamiento de este nivel, el efluente puede utilizarse en la recarga de acuíferos y en las industrias. Procesos aún más avanzados y costosos pueden llegar a convertir un agua residual en agua potable, pero incluso en los países altamente desarrollados, esta práctica es poco frecuente.

---

Cuadro No. 1.3

| PROCESOS BIOLÓGICOS DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS <sup>1</sup>   |  |
|---|--|
| Procesos de flóculos suspendidos  | Procesos de película fija                                  |
| 1. Lodos activados<br>2. Lagunas de oxidación<br>3. Zanjas de oxidación<br>4. Reactor anaerobio<br>5. Flujo a contracorriente | 1. Filtros percoladores<br>2. Discos biológicos rotatorios |

<sup>1</sup> Además de estos procesos debe tomarse en cuenta el tratamiento mediante la aplicación del agua residual al terreno (motivo de estudio del presente trabajo) y la acuicultura, entre otros, cuya clasificación dentro de un nivel de tratamiento dependerá del sistema y las condiciones en que sea utilizado.

Fuente: Metcalf y Eddy. Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales. 2ª ed. Barcelona, España.

#### 1.4.3 Variables a considerar en la selección de los procesos de tratamiento

Ante la diversidad de procedimientos de tratamiento de aguas residuales es necesario considerar varios puntos que permitan seleccionar el sistema de depuración que mejor se adapte a los requerimientos de cada proyecto en particular, entre ellos se pueden mencionar:

**1. Eficiencia.** La eficiencia de un sistema de tratamiento es una variable que permite relacionar las condiciones del influente al sistema de tratamiento con la calidad del agua tratada, efluente del mismo sistema.

**2. Economía.** Es un aspecto que debe tomarse en cuenta para decidir si es factible utilizar un determinado proceso, es decir, para evaluar si se cuenta con los recursos para construir dicho método de depuración.

**3. Grado de dificultad de la operación y del mantenimiento.** Es necesario conocer los problemas que pueden implicar la operación y el mantenimiento del sistema seleccionado.

**4. Área de terreno disponible.** En muchos casos la disponibilidad de terreno resulta una limitante para determinados procesos de tratamiento, lo cual reduce el número de alternativas en estudio y selección.

**5. Personal calificado para operar.** Ciertos sistemas de tratamiento de aguas residuales requieren de una operación cuidadosa y de mantenimiento constante y eficiente; la carencia de personal que pueda realizar esta labor es también una limitante que debe ser tomada en cuenta.

El presente trabajo no pretende entrar más en detalle respecto a los diferentes procesos de tratamiento de aguas de desecho, sino estudiar el caso particular del sistema de tratamiento de aguas residuales en los suelos, como se desarrolla en adelante.

## **1.5 Desarrollo de los procesos de tratamiento de aguas residuales en el suelo**

### **1.5.1 Desarrollo histórico**

Desde que el ser humano apareció sobre la faz de la Tierra, ha depositado y dispuesto las aguas residuales por él producidas en el suelo; al hacerlo observó que la disposición de desechos orgánicos en el terreno, mejoraba las condiciones del mismo, actuando como abono de las tierras agrícolas. Sin embargo, la evidencia de la utilización de un sistema "formal" de disposición de aguas servidas en el suelo data de la antigua Grecia, en la ciudad de Atenas. También debe mencionarse el sistema de irrigación empleando aguas residuales que se utilizó durante más de 300 años en Bunzlau, Alemania, a partir del año de 1559.

Para la segunda mitad del siglo XIX, en Europa la única forma de proporcionar un tratamiento a las aguas de desecho y a los lodos, lo era su disposición y aplicación en el terreno. De tal manera, resultaba una actividad común la de conducir el agua residual al campo y regar las regiones rurales o bien evacuarlas en estas zonas. En 1870, en Inglaterra se aceptó esta práctica como un método de tratamiento; posteriormente la expansión de las ciudades y la innovación de nuevos procesos de tratamiento, provocó el abandono de estas técnicas de tratamiento. También en los Estados Unidos de América fueron utilizados los sistemas de aplicación de las aguas residuales al suelo, pero durante la primera mitad del siglo XX se sustituyeron por plantas de tratamiento en las que se tenían procesos más complicados para la época, empleando las aguas residuales tratadas para regar los cultivos, los parques, los jardines e incluso para recargar acuíferos. Mediante estas actividades se le aportaba una utilidad al agua residual cruda o tratada, que hasta la fecha se le sigue dando. En el Cuadro 1.4 se presentan algunos de los primeros sistemas de tratamiento de aguas residuales, de los que se tiene información.

En la actualidad se ha intentado desarrollar tecnología para la disposición del agua residual al suelo y para contar con métodos que permitan controlar este sistema; de esta manera, los sistemas de disposición de aguas residuales en los suelos pueden considerarse como alternativas de tratamiento que pueden ser tan eficaces como otros procesos más modernos. La Figura 1.1 muestra diferentes procesos de aplicación de aguas residuales en el suelo.

Cuadro No. 1.4

| PRIMEROS SISTEMAS DE APLICACION AL TERRENO |                                 |                                       |                 |                            |
|--|---------------------------------|---------------------------------------|-----------------|----------------------------|
| Localidad                                  | Fecha de iniciación del sistema | Tipo de sistema                       | Superficie (ha) | Caudal (m <sup>3</sup> /s) |
| Croydon-Beddington, Inglaterra             | 1860                            | Utilización directa del agua residual | 252             | 0.2                        |
| Paris, Francia                             | 1869                            | Riego                                 | 640             | 3.46                       |
| Leamington, Inglaterra                     | 1870                            | Utilización directa del agua residual | 160             | 0.04                       |
| Berlin, Alemania                           | 1874                            | Utilización directa del agua residual | 2 720           | -                          |
| Wroclaw, Polonia                           | 1882                            | Utilización directa del agua residual | 800             | 1.23                       |
| Calumet City, Mich., EUA                   | 1888                            | Infiltración rápida                   | 4.8             | 0.05                       |
| Melbourne, Australia                       | 1893                            | Riego                                 | 4 160           | 2.19                       |
| Braunschweig, Alemania                     | 1896                            | Utilización directa del agua residual | 4 400           | 0.7                        |
| Ciudad de México, México                   | 1900                            | Riego                                 | 44 800          | 24.97                      |
| Vineland, Nueva Jersey, EUA                | 1901                            | Infiltración rápida                   | 5.6             | 0.04                       |
| Ely, Nevada, EUA                           | 1908                            | Riego                                 | 160.0           | 0.07                       |

Fuente: Metcalf y Eddy. Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales. 2ª ed. Barcelona, España.

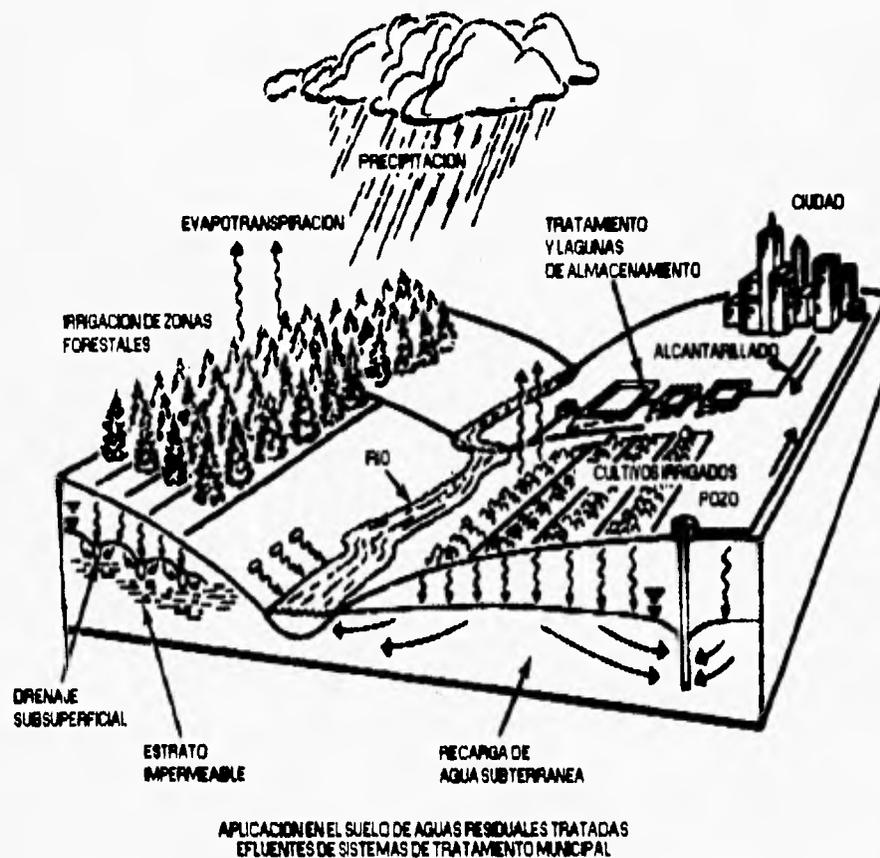


Figura 1.1 Aplicación de aguas residuales en el suelo

### 1.5.2 Generalidades sobre el tratamiento de aguas residuales en suelos

Los tres procesos principales de este tipo de depuración son: irrigación, infiltración rápida y escurrimiento superficial. La Figura 1.2 ilustra los tres procesos principales de aplicación al terreno. Existen otros como son la aplicación de lodos al terreno y la utilización de terrenos húmedos, como son los pantanos. En los Cuadros 1.5 a 1.7 se presentan las características generales de los diversos procesos de aplicación de aguas residuales al terreno y una comparación entre ellos. A continuación se describen de manera breve e introductoria estos sistemas.

#### - Irrigación

El riego es el proceso mediante el cual se aplica agua residual al terreno; esto se hace con la finalidad de proporcionar un tratamiento a las aguas mediante procesos físicos, químicos y biológicos al ocurrir la infiltración de las aguas en el suelo, además de proporcionar a las plantas diversos elementos que favorecen su crecimiento. La aspersion mecánica y la aplicación por técnicas superficiales son procedimientos usuales de irrigación, con los que se pretende disminuir las concentraciones de contaminantes en las aguas residuales, además de aprovechar las aguas

de desecho y los nutrientes que éstas contienen para mejorar los cultivos. También es posible reutilizar las aguas servidas para regar jardines, bosques, etc., con lo que se contribuye a preservar las áreas verdes.

En caso de no contar con grandes caudales de aguas residuales para riego, pueden ser utilizadas tasas de aplicación de 2.5 a 7.5 cm/semana, en función de las necesidades del cultivo y haciendo un estudio en el que se compare el beneficio económico debido a la venta de las cosechas y el incremento en los costos tanto del terreno como del sistema de distribución del agua residual. Si se cuenta con grandes volúmenes de aguas residuales para riego, es posible aumentar las tasas de aplicación hidráulicas, reduciendo simultáneamente el costo del sistema. Estas tasas pueden alcanzar entre 6 y 10 cm/semana de tasas de aplicación, que permiten eliminar concentraciones altas de nutrientes.

#### **- Infiltración rápida**

La aplicación del efluente de aguas residuales en estos sistemas se hace con valores altos, entre 10 y 210 cm/semana. Esto puede realizarse por medio de aspersión o de extensión. La depuración tiene lugar conforme al agua fluye a través de la matriz del suelo. La infiltración rápida puede realizarse teniendo las siguientes finalidades: recarga de acuíferos, tratamiento por medios naturales y su posterior recuperación mediante bombeo o sistemas de drenaje, además del tratamiento y conducción del agua tratada hacia una corriente superficial.

En el caso de que el agua subterránea sufra contaminación por intrusión salina, la recarga con agua residual tratada puede tener como objetivo modificar el gradiente hidráulico y con ello resguardar el agua subterránea de los efectos dañinos de la intrusión salina. En caso de que el tratamiento que se obtiene mediante la infiltración no resulte adecuado para la recarga del acuífero o que no cumpla alguna norma respecto a la disposición de las aguas, es posible bombearlas o drenarlas hacia las corrientes superficiales.

#### **- Sistemas de escurrimiento superficial**

Los sistemas de escurrimiento superficial provocan el tratamiento biológico de las aguas. La depuración biológica en el suelo se efectúa en dos etapas: fijación de la materia orgánica sobre las partículas de tierra, oxidación debido a la acción de microorganismos aerobios y anaerobios. Esta depuración acontece en los suelos en los que puede penetrar el aire, lo cual excluye a las tierras pesadas y arcillosas. La circulación superficial en lámina consiste en descargar el agua residual en terrenos con pendientes relativamente pronunciadas o terrazas dispuestas para ello, el líquido fluye a través de la capa vegetal y es conducido a unas zanjas de recolección, que se encuentran en la parte final de la pendiente. Este método se acepta como un tratamiento a nivel secundario, si el agua aplicada se encuentra nitrificada y tiene concentraciones bajas de DBO; en caso de aplicarse aguas a las que previamente se les ha dado tratamiento por otros procesos, el escurrimiento superficial en lámina se convierte en un proceso de tratamiento avanzado, entonces pueden descargarse tasas desde 15 hasta 40 cm/semana.

- Aplicación de lodo al terreno

Los lodos que se producen con los desechos de las aguas residuales pueden ser utilizados como abonos, fertilizantes para los cultivos, o bien para acondicionar algún terreno. La capacidad que éste último tenga para asimilar los lodos limitará las tasas de aplicación de los mismos, siendo las cargas de nitrógeno una limitante importante al respecto.

- Aplicación en pantanos.

La aplicación en terrenos pantanosos es otra alternativas novedosa para dar un tratamiento a las aguas residuales. Se han realizado estudios en terrenos pantanosos naturales y artificiales; además de probar el uso de plantas (como los jacintos de agua) y peces (acuacultura).

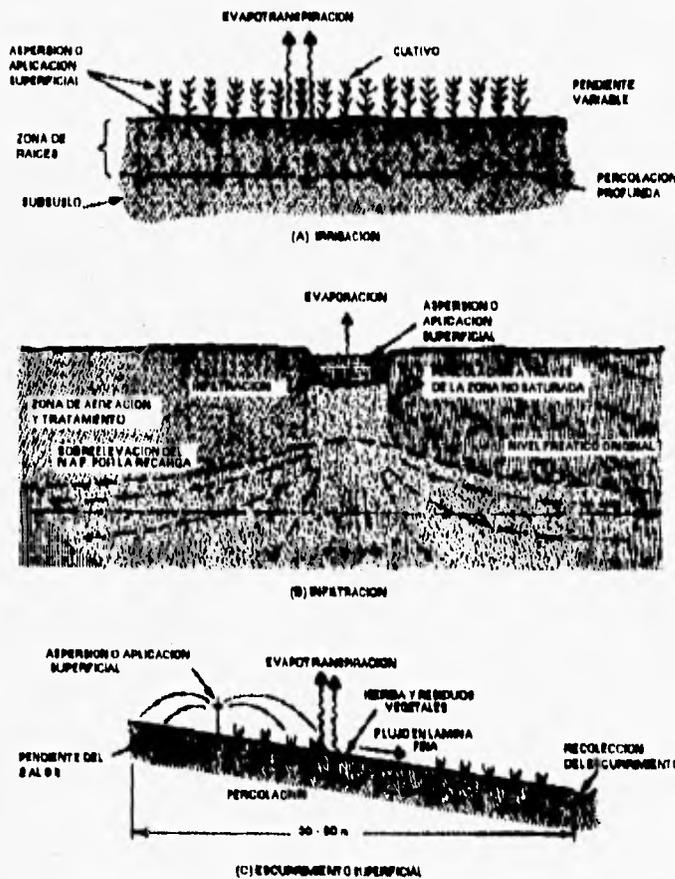


Fig. 1.2 Procesos principales de aplicación al terreno

Cuadro 1.5

| COMPARACION DE CARACTERISTICAS DE PROYECTO PARA DIVERSOS PROCESOS DE APLICACION DE AGUAS RESIDUALES AL TERRENO |                                      |                            |   |   |                                     |
|--|--------------------------------------|----------------------------|---|---|-------------------------------------|
| Característica   | Riego                                | Infiltración rápida        | Circulación superficial en lámina   | Aplicación a tierras pantanosas               | Aplicación subsuperficial           |
| Técnicas de aplicación   | Aspersión o superficial <sup>1</sup> | Generalmente superficial   | Aspersión o superficial   | Aspersión o superficial                       | Conducción subterránea              |
| Tasa anual de aplicación (m)   | 0.6-6.0                              | 6-120                      | 3-20  | 1-30  | 2-25                                |
| Superficie de terreno necesaria (ha) <sup>2</sup>  | 22-226                               | 1-22                       | 10-44   | 4-113   | 5-56                                |
| Tasa de aplicación semanal típica (cm)   | 2.5-10                               | 10-210                     | 6-15 <sup>3</sup><br>15-40 <sup>4</sup>                                   | 2.5-60  | 5-50                                |
| Tratamiento mínimo previo a la aplicación prevista   | Sedimentación primaria <sup>5</sup>  | Sedimentación primaria     | Desbaste y desarenado   | Sedimentación primaria                        | Sedimentación primaria              |
| Eliminación del agua residual aplicada   | Evapotranspiración y percolación     | Principalmente percolación | Escurrimiento superficial y evapotranspiración con un poco de percolación | Evapotranspiración, percolación y escorrenría | Percolación con algo de escorrenría |
| Necesidad de vegetación  | Necesaria                            | Opcional                   | Necesaria   | Necesaria                                     | Opcional                            |

1. Incluye riego por surcos e inundación
2. La superficie de campo no incluye la zona de amortiguación ni los caminos o zanjas para un caudal de 0.44 m<sup>3</sup>/s
3. Intervalo de aplicación del agua residual con únicamente pretratamiento
4. Intervalo de aplicación para afluentes de lagunas y tratamientos secundarios
5. Depende del uso del efluente y del tipo de cultivo

Fuente: Metcalf y Eddy. Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales. 2ªed. Barcelona, España.

Cuadro 1.6

| COMPARACION DE CARACTERISTICAS QUE DEBEN REUNIR LOS SITIOS EN DONDE SE UBICARAN SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN SUELOS |  |  |  |   |
|---|--|--|--|---|
| Características   | Riego  | Infiltración rápida  | Escurrimiento superficial en lóamias   | Aplicación en tierras pantanosas              |
| Limitaciones debidas al clima   | Se requiere de almacenamiento para clima frío y para lluvias               | Ninguna (salvo alguna modificación en la operación del sistema en caso de temperaturas frías)                    | Es necesario el almacenamiento del agua por aplicar al terreno en clima frío | Es necesario el depósito durante épocas frías |
| Profundidad del nivel freático  | 0.6-0.9 m (mínimo)   | 3.0 (En caso de existir drenaje, se aceptan profundidades menores)   | No es un factor determinante   | No es un factor determinante                  |
| Pendiente   | Inferior al 20% para terrenos cultivados y menos del 40% en caso contrario | No es determinante, pero en caso de tener terrenos con pendientes grandes implica mayores movimientos de tierras | 2-8%   | Menor del 5%                                  |
| Permeabilidad del suelo   | De moderadamente baja a moderadamente alta                                 | Alta (arenas y arenas margosas)  | Baja (Arcillas, limos y suelos con barreras impermeables)                    | De baja a moderada                            |

Fuente: Metcalf y Eddy. Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales. 2ªed. Barcelona, España.

Cuadro 1.7

| COMPARACION DE LA CALIDADESPERADA DEL AFLUENTE DE AGUA TRATADA POR SISTEMAS DE DISPOSICION EN SUELOS |                    |               |                                  |               |  |               |
|--|--------------------|---------------|----------------------------------|---------------|--|---------------|
| Parámetro  | Riego <sup>1</sup> |               | Infiltración rápida <sup>2</sup> |               | Escurrimiento superficial <sup>3</sup> |               |
|  | Media (mg/l)       | Máxima (mg/l) | Media (mg/l)                     | Máxima (mg/l) | Media (mg/l)                           | Máxima (mg/l) |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)  | < 2                | < 5           | 2                                | < 5           | 10                                     | < 15          |
| Sólidos suspendidos  | < 1                | < 5           | 2                                | < 5           | 10                                     | < 20          |
| Nitrógeno Amónico como N   | < 0.5              | < 2           | 0.5                              | < 2           | 0.8                                    | < 2           |
| Nitrógeno total como N   | 3                  | < 8           | 10                               | < 20          | 3                                      | < 5           |
| Fósforo total como P   | < 0.1              | < 0.3         | 1                                | < 5           | 4                                      | < 8           |

<sup>1</sup> Percolación del efluente primario o secundario a través de 1.5 m de suelo

<sup>2</sup> Percolación del efluente primario o secundario a través de 4.5 m de suelo

<sup>3</sup> Escurrimiento del agua residual municipal a lo largo de 45 m de pendiente aproximadamente

Fuente: Metcalf y Eddy. Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales. 2ªed. Barcelona, España.

### 1.5.3 Selección de la zona de vertido

La capacidad que tiene un suelo para permitir el transporte del agua de desecho es el aspecto técnico más importante que debe considerarse para determinar si es posible utilizarlo como sistema de disposición y tratamiento de aguas residuales; esta propiedad permite a su vez, determinar qué tipo de sistema de tratamiento en suelos puede emplearse. El transporte del agua a través del suelo se debe a las propiedades de infiltración y de percolación. La percolación es función de las características del suelo, mientras que la infiltración depende de la permeabilidad y de la saturación del suelo. Si el agua residual se trata con anterioridad a su aplicación de manera adecuada, disminuye la posibilidad de saturación y obturación de los poros del suelo.

Cuando las tasas de percolación están comprendidas entre 6 y 25 mm/min se puede practicar el sistema de infiltración rápida; entre 2 y 6 mm/min el sistema adecuado es el riego por aspersión y para valores inferiores a 2 mm/min se sugiere utilizar los sistemas de escurrimiento superficial.

En el Cuadro 1.8 se presenta una relación entre los tipos de suelo de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), la técnica de aplicación y las propiedades de drenaje del terreno; la Figura 1.3 muestra una gráfica en que se relaciona la carga hidráulica de aplicación con el tipo de suelo y el sistema de tratamiento recomendable para cada caso en particular.

El espesor de suelo disponible depende de las condiciones naturales y del control de la profundidad del nivel de aguas freáticas; con la finalidad de almacenar el fósforo y los metales pesados, debe disponerse del máximo espesor de suelo posible. Para los suelos formados por partículas de textura fina, puede ser suficiente un espesor de 1.5 m hasta el nivel de aguas freáticas, aunque se recomienda que éste se encuentre entre 1.5 y 3 m. El estrato de suelo debe mantenerse en condiciones no saturadas por medio de un diseño y operación adecuados del sistema.

En cuanto a la recuperación del agua renovada es necesaria en los sistemas de escurrimiento superficial, pero puede no requerirse en los sistemas de riego por aspersión o infiltración rápida; en ellos se puede tener como objetivo la recarga de acuíferos con las aguas efluentes del sistema de tratamiento en suelos. El control de la profundidad del manto freático puede ser necesario para prevenir la contaminación del agua subterránea; cuando se requiera bajar el nivel de aguas freáticas pueden emplearse sistemas de drenes o pozos de bombeo para la recuperación de las aguas depuradas. Es recomendable efectuar monitoreos para llevar un control y observar la remoción de contaminantes que se logre con el sistema. La Figura 1.4 muestra la posible ubicación de puntos de monitoreo.

Cuadro 1.8

| TIPOS DE SUELOS Y CARACTERISTICAS DE DRENAJE |   |                                   |   |
|--|---|-----------------------------------|---|
| Símbolo SUCS                                 | Tipo de Suelo   | Características de drenaje        | Sistema de tratamiento para el que el tipo de suelo es ópti |
| GW   | Gravas bien graduadas o gravas arenosas, con pocos o sin finos                | Excelentes                        | Infiltración rápida   |
| GP   | Gravas mal graduadas, gravas arenosas, pocos o sin finos                      | Excelentes                        | Infiltración rápida   |
| GM-d   | Gravas con limos, mezclas de gravas, arenas y limos                           | Media a baja                      | Riego por aspersión   |
| GM-u   | Gravas con limos, mezclas de gravas, arenas y limos                           | Media a prácticamente impermeable | Escorrentamiento superficial                                |
| GC   | Gravas a arcillas, mezclas con gravas, arenas y limos                         | Media a prácticamente impermeable | Escorrentamiento superficial                                |
| SW   | Arenas bien graduadas o arenas con gravas, con pocos o sin finos              | Excelentes                        | Infiltración rápida   |
| SP   | Arenas mal graduadas o arenas con gravas, con pocos o sin finos               | Excelentes                        | Infiltración rápida   |
| SM-d   | Arenas, limos, mezclas de arenas y limos                                      | Media a baja                      | Riego por aspersión   |
| SM-u   | Arenas limosas, mezclas de arenas y limos                                     | Baja a prácticamente impermeable  | Escorrentamiento superficial                                |
| SC   | Arenas arcillosas, mezclas de arenas y arcillas                               | Baja a prácticamente impermeable  | Escorrentamiento superficial                                |
| ML   | Limos inorgánicos, arenas muy finas, arenas limosas o arcillosas              | Media a baja                      | Riego por aspersión   |
| CL   | Arcillas inorgánicas, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas | Prácticamente impermeables        | Escorrentamiento superficial                                |
| OL   | Limos orgánicos, arcillas con limos orgánicos de baja plasticidad             | Bajas                             | Riego por aspersión<br>Escorrentamiento superficial         |
| MH   | Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos con micas o diatomeas      | Medias a bajas                    | Riego por aspersión   |
| CH   | Arcillas inorgánicas de alta plasticidad                                      | Prácticamente impermeables        | Escorrentamiento superficial                                |
| OH   | Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta, limos orgánicos               | Prácticamente impermeables        | Escorrentamiento superficial                                |
| PT   | Turbas y otros suelos con alto contenido de materia orgánica                  | Medias a bajas                    | Riego por aspersión   |

Fuente: Steel Ernest y JM, Ghee Terence. Abastecimiento de Agua y Alcantarillado. 5ª ed., Barcelona, 1981.

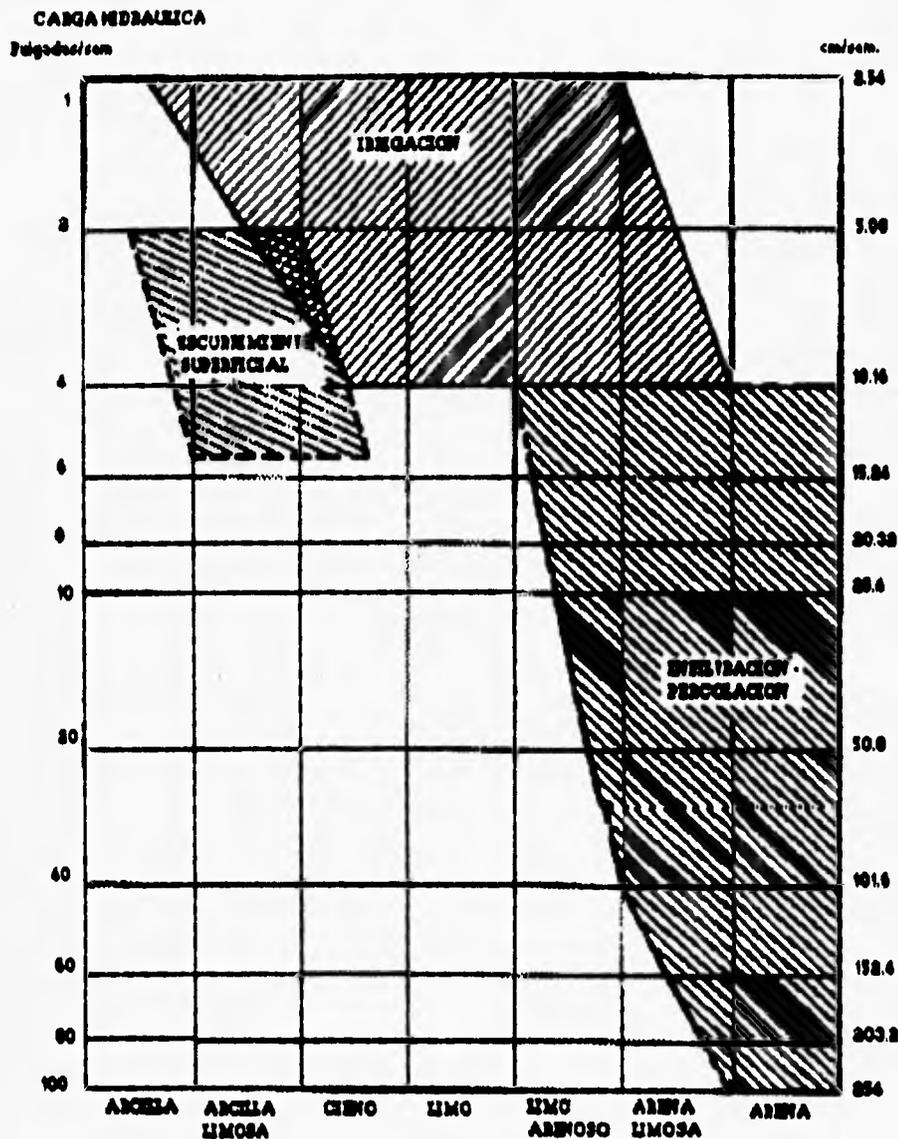
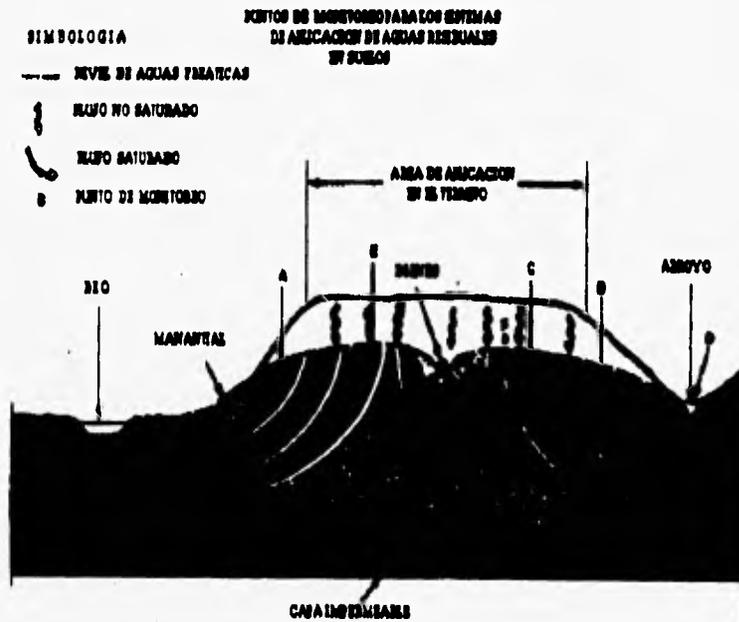


Figura 1.3. Tipos de suelo y carga hidráulica de aplicación en sistemas de tratamiento en suelos

A lo largo del presente trabajo, se estudian los diferentes procesos de aplicación de aguas residuales al suelo, antes mencionados. Se presentan cuadros comparativos entre cada uno de ellos y se analiza el impacto ambiental que ocasiona la disposición de las aguas residuales domésticas e industriales, en los suelos, se describe la situación en materia de legislación nacional al respecto del problema que nos atañe y se hace una reflexión sobre la situación y las perspectivas de este tipo de sistemas en la República Mexicana.



**Fig. 1.4 Puntos posibles de monitoreo en un sistema de tratamiento en suelos**

---

**2. MECANISMOS DE REMOCION  
DE CONTAMINANTES EN EL TRATAMIENTO  
DE AGUAS RESIDUALES EN EL SUELO**

---

## CAPITULO 2

### MECANISMOS DE REMOCION DE CONTAMINANTES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL SUELO

#### 2.1 Aspectos básicos

El término suelo, derivado del latín solum cuyo significado es piso o terreno, de manera general hace referencia a la superficie suelta de la tierra para distinguirlo de la roca. Sin embargo, la definición de la palabra suelo variará de acuerdo a la profesión de la persona que le estudie. De esta manera, para el agrónomo y para el agricultor se refiere al medio en el que crecen sus cultivos mientras que para el Ingeniero Civil el suelo es todo material de la corteza terrestre que se encuentre sobre roca fija, independientemente de que posea o no materia orgánica y cuyas partículas individuales tengan como máximo dos dimensiones menores a 3". Partículas mayores a éstas se consideran como rocas. El Ingeniero Civil generalmente estudia el comportamiento físico de los suelos, en cuanto a esfuerzos y deformaciones, con la finalidad de poder cimentar todo tipo de obras civiles desde carreteras y pistas de aeropuertos hasta enormes edificaciones como lo son las presas. En el área de la Ingeniería Sanitaria se puede utilizar el suelo como un sistema de tratamiento debido a la capacidad de remoción de contaminantes que el terreno posee, lo cual se consigue mediante diferentes procesos físicos, químicos y biológicos. Es decir que los sistemas de aplicación de agua residual al terreno tienen la capacidad de descomponer la materia orgánica, el nitrógeno, fósforo, cationes intercambiables, elementos tales como metales pesados y microorganismos que pueden encontrarse en las aguas residuales.

Las aguas residuales están compuestas, generalmente, por nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio), materia orgánica, metales pesados (cobre, zinc, cadmio, plomo, níquel, cobalto), sales disueltas (cloruros, carbonatos, sulfatos) y por diferentes microorganismos.

En el Cuadro 2.1 se presentan algunos datos respecto a la remoción que puede obtenerse para diferentes parámetros que componen las aguas residuales, al utilizar sistemas de aplicación de este tipo de aguas a los suelos.

Cuadro 2.1

| EFICIENCIAS DE REMOCION DE LOS CONSTITUYENTES DE LAS AGUAS RESIDUALES AL APLICARSE AL SUELO. |                            |
|--|----------------------------|
| CONSTITUYENTE  | EFICIENCIA DE REMOCION (%) |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno. (DBO)   | 98                         |
| Demanda Química de Oxígeno. (DQO)  | 89                         |
| Sólidos Suspendidos  | 98                         |
| Nitrógeno Total (N)  | 85 <sup>(1)</sup>          |
| Fósforo Total (P)  | 80-99                      |
| Metales Pesados  | 95                         |
| Microorganismos  | 98                         |
| Sólidos disueltos  | 30 <sup>(2)</sup>          |

(1) Depende del tipo de cultivo

(2) La remoción puede incrementarse dependiendo de la capacidad de intercambio catiónico del suelo.

FUENTE: G. Morgan Powell. Land Treatment of Municipal Wastewater Effluents. Denver, U.S.A., 1975

## 2.2 Presencia y descomposición de la materia orgánica en el suelo.

Toda materia que contiene compuestos de carbono es conocida como materia orgánica. Los elementos orgánicos que se encuentran de manera natural en el suelo, tienen su origen en las raíces y en los residuos de los organismos vivos o muertos que han sido depositados en el terreno. Los suelos minerales contienen menos del 20% de materia orgánica mientras que los suelos orgánicos (como las turbas) contienen más del 20% de materia orgánica. En regiones en las que la precipitación es alta, el drenaje ineficiente y la temperatura es baja, se presenta una mayor acumulación de compuestos de origen orgánico.

La materia orgánica es la "sangre vital" del suelo dado que su presencia influye en las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo; así por ejemplo: los suelos minerales con suficiente materia orgánica tienen una alta capacidad para el uso agrícola. El bajo grado de cohesión y plasticidad de los compuestos orgánicos afloja a los suelos de textura fina al compensar la alta cohesión y plasticidad de las arcillas; los suelos arenosos que tienen poca cohesión y plasticidad son ligados por la materia orgánica, la que también aumenta la capacidad de retención de agua de los suelos arenosos. Es importante mencionar también que algunos nutrientes que se encuentran en la materia orgánica, llegan a aprovecharse por las plantas al efectuarse la descomposición de los residuos de origen orgánico.

La descomposición de la materia orgánica produce bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que forma el ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) en el suelo, que es un ácido que aumenta la solubilidad de muchos compuestos, lo que permite un mayor aprovechamiento de los nutrientes. La mayoría de los organismos del suelo obtienen energía de los compuestos de carbono de la materia orgánica, además de que de ella resulta nitrógeno que contribuye a la formación de proteínas y otros nutrientes.

A continuación se enlistan algunas de las funciones principales de la materia orgánica en el suelo:

- Los residuos orgánicos que se encuentran en la superficie del suelo disminuyen el impacto de las gotas de lluvia y favorecen la infiltración lenta del agua.
- La descomposición de la materia orgánica produce sustancias microbianas que ayudan a estabilizar la estructura deseable del suelo.
- La materia orgánica fresca constituye una fuente de alimentación para los organismos presentes en el suelo.
- Los residuos orgánicos que se encuentran sobre la superficie de la tierra, disminuyen las pérdidas de las partículas del suelo por erosión eólica, además de que reducen las pérdidas de agua por evaporación. Las cubiertas de este tipo de sustancias disminuyen la temperatura del suelo en verano y conservan el calor durante el invierno.
- La descomposición de la materia orgánica produce diferentes nutrientes para el desarrollo de las plantas. Así por ejemplo, la liberación del nitrógeno de la materia orgánica del suelo depende del porcentaje de dicho tipo de materia presente, de la estructura del suelo y de la temperatura, además de las condiciones de humedad existentes.
- Un suelo con alto contenido de materia orgánica tendrá mayor capacidad de agua aprovechable para el desarrollo de los vegetales.
- La materia orgánica contribuye a atenuar los cambios químicos rápidos que tienen lugar al agregar fertilizantes al suelo.
- Los ácidos orgánicos liberados durante la descomposición de la materia orgánica ayudan a disolver minerales y hacerlos útiles para el desarrollo de las plantas.
- La materia orgánica descompuesta, denominada humus, almacena cationes intercambiables y aprovechables, como son: potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg).
- En los suelos ácidos, la descomposición de la materia orgánica ocasiona la liberación de citratos, oxalatos, tartratos y lactados, los cuales tiene más afinidad con el fierro y el aluminio que con el fósforo, dando por resultado una mayor disponibilidad de fósforo.

De acuerdo con las funciones de la materia orgánica en los suelos antes citadas, es posible darse cuenta de la capacidad que el suelo posee para asimilar y degradar la materia orgánica, lo cual constituye un sistema de depuración biológica para el agua residual dispuesta en el terreno,

cumpliendo con cargas determinadas que el terreno es capaz de soportar.

La materia orgánica se infiltra a través de la hierba, el mantillo y la capa superficial del suelo, además de ser reducida por oxidación biológica. Para ello resulta conveniente aplicar ciclos de carga de agua residual intermitentes, con la finalidad de permitir que el aire penetre en el suelo, abasteciendo de aire a las bacterias que oxidan la materia orgánica. La infiltración es la penetración del agua en el suelo y al movimiento del agua a través del suelo hacia niveles inferiores se le conoce como percolación. La permeabilidad es la capacidad de los horizontes o estratos del suelo para transmitir aire o agua a través de su masa.

De manera sencilla, puede considerarse a la oxidación como el proceso mediante el cual se transforma a un cuerpo por la acción del oxígeno o de un oxidante. La oxidación lenta se caracteriza porque la luz y el calor se disipan, tal es el caso de la descomposición de la materia orgánica, animal y vegetal; la partícula de la sustancia oxidada pierde electrones. La hidrólisis es la descomposición química de una sustancia por reacción con el agua, debido a una ligera ionización de la molécula de agua ( $H_2O$ ) en iones hidrógeno ( $H^+$ ) y oxhidrilos ( $OH^-$ ), con los cuales reacciona la sustancia disuelta.

La descomposición de la materia orgánica como proceso biológico, tiene lugar cuando los organismos presentes en el suelo, aprovechan la energía y los nutrientes que les proporcionan este tipo de compuestos. Al ocurrir la infiltración y percolación del agua residual a través del suelo tiene lugar la acción de los microorganismos sobre los elementos o compuestos de origen orgánico. La clase de organismos que intervienen en estos procesos de depuración, está en función de la naturaleza química de los residuos orgánicos y de las condiciones del suelo. Los microorganismos degradan los detergentes y junto con las plantas superiores inmovilizan los nutrientes conforme el efluente de agua residual percola lentamente a través del perfil del suelo. De tal manera es que el suelo se convierte en un filtro viviente, para la eliminación de la materia orgánica. Además ocurren también procesos químicos tales como la hidrólisis, la oxidación (explicados brevemente en el párrafo anterior), la formación de diferentes soluciones y algunos cambios de tipo físico. En el Cuadro 2.2 se hace referencia a algunos animales y microorganismos que participan en el proceso de descomposición de la materia orgánica en el suelo.

La microflora y los animales más pequeños interactúan para llevar a cabo la descomposición de la materia orgánica. Por ejemplo, al caer una hoja en el piso de un bosque, la microflora y los animales atacan la hoja, los artrópodos (tisanuros y garrapatas) facilitan la entrada de la microflora en la hoja y la consecuente descomposición de la materia, además de la formación del humus. En la formación del humus a partir de los residuos vegetales ocurre la rápida reducción de los constituyentes que son solubles en el agua, de las celulosas y de las hemicelulosas, además de que aumenta el contenido de lignina y el de proteínas.

Las proteínas se descomponen con facilidad en los suelos, aunque se presenta un aumento en su cantidad lo que ocurre durante la formación del humus, se piensa que esto último se puede deber a alguna de las siguientes causas:

- A que las moléculas de proteína pueden ser absorbidas en la superficie de los minerales de arcilla y pueden presentar resistencia a la descomposición.
- Las enzimas que descomponen a las proteínas pueden ser absorbidas por minerales arcillosos de manera que las proteínas sean menos susceptibles a la descomposición.

Cuadro 2.2

| ALGUNOS ANIMALES Y MICROORGANISMOS QUE SE ENCUENTRAN PRESENTES EN EL SUELO, QUE INTERVIENEN EN LA DESCOMPOSICION DE LA MATERIA ORGANICA. |   |
|--|---|
| TIPO   | EJEMPLOS  |
| Protozoarios   | Amibas<br>Ciliados<br>Flagelados  |
| Gusanos  | Nemátodos<br>Lombrices de tierra  |
| Moluscos   | Caracoles   |
| Artrópodos   | Piojos de la madera    Tisanuros<br>Arañas                    Larvas de insectos<br>Garrapatas                Hormigas<br>Cienpiles                    Termitas |
| Vertebrados  | Reptiles<br>Topos<br>Tuzas  |

Fuente: Ortiz Villanueva B. y Ortiz Solorio A. Edafología. Universidad Autónoma de Chapingo. México, 1984.

Los suelos con alto contenido de arcilla tienden a tener un alto contenido de materia orgánica y la descomposición lenta del humus permite que el nitrógeno sea almacenado en el suelo y liberado en forma gradual.

Las condiciones físicas de los suelos y su fertilidad se ven mejoradas por la presencia de la materia orgánica. Por otra parte, la transformación y descomposición de la materia orgánica proporciona cantidades significativas de nutrientes que pueden ser aprovechadas por las plantas, pueden citarse entre ellos a: nitrógeno, fósforo y azufre. A manera de ejemplo: es posible liberar 15 kg/ha al año de nitrógeno por los cultivos en suelos con bajos contenidos de materia orgánica y hasta 110 kg/ha anuales en suelos ricos en materia orgánica; como anteriormente se comentó, en suelos ácidos con la descomposición de la materia orgánica se puede obtener fósforo.

La materia orgánica disuelta y en estado coloidal posee propiedades de intercambio catiónico similares a las de las arcillas y por ello, tiende a permitir el enlace de iones de cobre, níquel, zinc, manganeso, cadmio y cobalto, reduciendo la posibilidad de que estos iones fluyan hacia las aguas subterráneas.

Al disponer las aguas residuales en los suelos se afronta el problema de que los altos contenidos de materia orgánica pueden originar condiciones anaerobias en los estratos inferiores de suelo. En circunstancias anaerobias, la descomposición de la materia orgánica aumenta la acidez del suelo y puede ocurrir una disolución de compuestos y elementos retenidos por él; dichos compuestos y elementos pueden ser lixiviados y contaminar los acuíferos.

2.3 Eliminación del nitrógeno

Los dos mecanismos principales para la separación del nitrógeno son su incorporación en los cultivos y la desnitrificación. En el caso de los sistemas de riego, la incorporación del nitrógeno en el cultivo es el principal proceso de eliminación de este elemento, cuyas cantidades incorporadas varían de acuerdo con el cultivo. Para los sistemas de infiltración rápida, la desnitrificación constituye el principal proceso de eliminación de nitrógeno y puede llevarse a cabo utilizando ciclos de inundación relativamente largos, o bien utilizando agua residual con alto contenido de DBO, para tener condiciones anaerobias en el perfil del suelo.

Cuando se adiciona el nitrógeno orgánico o nitrógeno amoniacal al suelo, es retenido en el mismo por medio de la adsorción e intercambio iónico, hasta perderse por volatilización o mineralizarse en forma de nitrato. Como nitrato, puede ser lixiviado por el movimiento del agua hasta los acuíferos. De esta manera el nitrógeno que se aplica al terreno en las aguas residuales, puede ser utilizado por los microorganismos para formar material celular, puede ser removido por las plantas, volatilizarse como nitrógeno amoniacal o a través del proceso de nitrificación, eliminarse como nitrógeno elemental ( $N_2$ ). La serie de reacciones físicas, químicas y biológicas que ocurren en el proceso de descomposición de nitrógeno en el suelo, se pueden visualizar en las Figuras 2.1 y 2.2

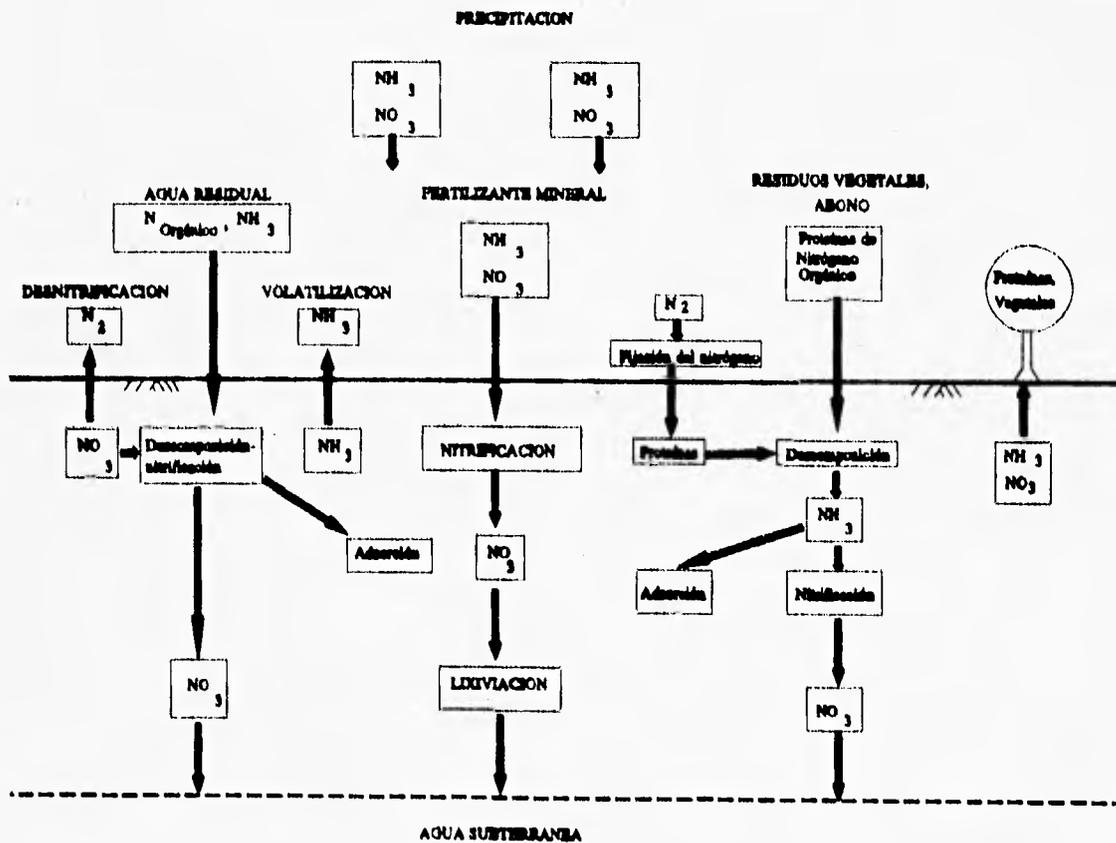


Fig. 2.1 Transformación del nitrógeno en el suelo

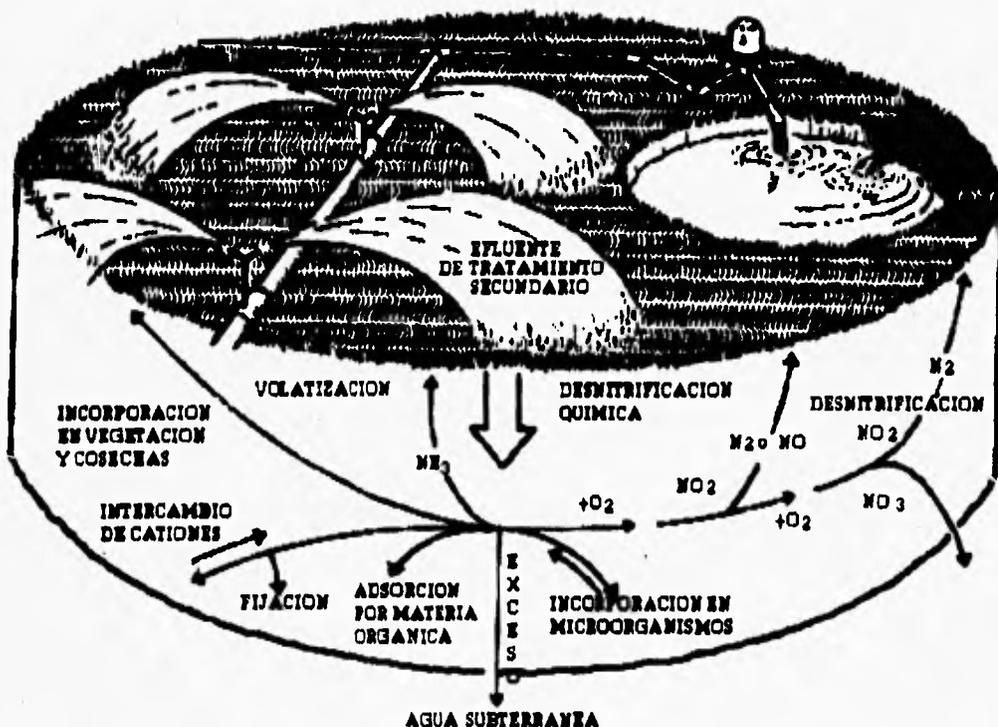


Figura 2.2 Mecanismos de remoción del nitrógeno en el suelo

La relación entre la materia orgánica (DBO) y el nitrógeno en el agua residual, es importante para eliminar ambos componentes y tiene efectos sobre la asimilación del carbono y la disponibilidad del nitrógeno por plantas y suelos, como se indica en el Cuadro 2.3.

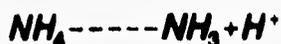
Cuadro 2.3

| VALORES TÍPICOS DE LA RELACION ENTRE LA DBO Y EL NITROGENO PARA DIVERSOS TIPOS DE AGUA RESIDUAL. |                |   |
|--|----------------|---|
| Tipo de agua residual  | Relación DBO/N | Efectos sobre la descomposición biológica   |
| Aguas residuales de industrias alimenticias  | 80 a 100       | Asimilación del carbono relativamente lenta. Nitrógeno del suelo disponible inmovilizado, por lo que es menos accesible para las plantas. |
| Estércol de ganado   | 20             | Asimilación del carbono no limitada, nitrógeno disponible para las plantas  |
| Agua residual municipal no tratada   | 5              | Nitrógeno en exceso sobre las necesidades bacterianas para la asimilación de carbono, liberado y disponible para el suelo y las plantas.  |
| Efluente secundario  | 1 a 2          | Carbono limitado para la desnitrificación, el nitrógeno se encuentra libre y disponible para el suelo y para las plantas.                 |

Fuente: Meical y Eddy. Tratamiento, Evacuación y Reutilización de aguas residuales. 2ª ed. Barcelona, España.

La acumulación de nitrógeno en el perfil del suelo tiene lugar después de los primeros años de haber aplicado aguas residuales al suelo y ocurre junto con el aumento de la población microbiana. Esta concentración tiende a un equilibrio dinámico y a un estado estacionario, en el que la acumulación del nitrógeno en el suelo se detiene; lo anterior sucede cuando la velocidad de decaimiento en la acumulación de nitrógeno orgánico es igual a la velocidad con que éste se origina. El tiempo necesario para alcanzar la condición estacionaria no está perfectamente determinado, pero se tiene conocimiento de que el proceso de almacenamiento de nitrógeno en el suelo, continúa a una velocidad relativamente constante después de varias décadas.

En la mayoría de los suelos se encuentran presentes el nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_3$ ) y el nitrógeno de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), en un estado de equilibrio dinámico, de acuerdo con:



El pH de los suelos determina el equilibrio de la ecuación de la reacción química arriba escrita. Esto implica que, en suelos con pH alcalino, la pérdida de nitrógeno amoniacal, debida a la volatilización provoca que se neutralicen los iones  $\text{H}^+$ . Entonces ocurre la reacción química anterior para que haya equilibrio nuevamente. La pérdida de nitrógeno por volatilización (es decir, su transformación en vapor o gas) es poco significativa en comparación con la asimilación de éste en los cultivos y por desnitrificación. Sin embargo, la eficiencia de estos dos últimos mecanismos de remoción depende de diversos factores. Así por ejemplo, cuando las aguas residuales que contienen nitrógeno se aplican al suelo durante el período de máximo crecimiento de los cultivos, predomina el proceso de eliminación de nitrógeno por asimilación de los cultivos sobre la desnitrificación. Además, la disponibilidad del nitrógeno, el tipo de cultivo, la duración del período de crecimiento y el uso consuntivo de los cultivos, son factores que influyen en la eficiencia de remoción del elemento en estudio.

También debe considerarse que no todos los cultivos se benefician por el nitrógeno en demasía e incluso puede disminuir su productividad; a manera de ejemplo, el contenido de azúcar en la remolacha se ve reducido al quedar nitrógeno disponible en el suelo, una vez que ha transcurrido el período de crecimiento de la remolacha. Cuando se aplica el nitrógeno al suelo durante el invierno, no se nitrifica sino que se acumula en el terreno; al llegar los meses cálidos (en primavera y verano), la nitrificación ocurre a una mayor velocidad, se llega a altas concentraciones de nitrógeno en períodos relativamente cortos y que se encuentran al alcance de los cultivos; ocurre entonces que, estos últimos (principalmente los forrajes) pueden contener altas concentraciones de nitrógeno y ser tóxicos para los animales que los consuman.

La desnitrificación consiste en la transformación bacteriana de nitrógeno de los nitratos a nitrógeno elemental, en condiciones anaerobias; es un mecanismo que permite remover el nitrógeno del suelo. Esta eliminación es importante en suelos estratificados y saturados o prácticamente saturados. Sin embargo, para el caso de suelos agrícolas las capas en las que se realiza la siembra se encuentran generalmente en condiciones aerobias, lo que no permite que ocurra el proceso de desnitrificación. A mayores profundidades en los estratos de suelo, resulta más factible encontrar condiciones anaerobias que facilitan el proceso de desnitrificación; a pesar de

ello, el contenido de carbono en el suelo disminuye con la profundidad, lo que limita a que el proceso de desnitrificación pueda ocurrir hasta profundidades cercanas a tres metros.

En relación con el potencial de hidrógeno (pH), los suelos pueden clasificarse de la siguiente manera: Suelos ácidos, neutros y alcalinos. Cuando el pH es mayor de 7 se dice que el suelo es alcalino y cuando es menor a 7 son suelos ácidos. Para suelos con valores entre 6 y 7 se les denomina neutros. Desde el punto de vista agrícola, los suelos neutros son los más apropiados para el desarrollo de los cultivos, debido a que los materiales nutrientes son más aprovechables y la disponibilidad del fósforo es máxima. Por lo general, los suelos de las regiones húmedas son ácidos y los de las regiones áridas son alcalinos. En los suelos ácidos la solución del suelo contiene más iones hidrógeno ( $H^+$ ) que oxhidrilos ( $OH^-$ ) y en los suelos alcalinos, la solución del suelo contiene más  $OH^-$  que  $H^+$ ; comúnmente los valores de pH en los suelos varían en un rango de 4 a 10 unidades.

#### 2.4 Degradación del fósforo

El fósforo es un elemento que se encuentra en aguas y suelos en forma de compuestos orgánicos solubles o en combinación con materia inorgánica. Estando presente en el agua, el fósforo puede originar la formación de compuestos orgánicos que deterioran la calidad del agua. Sin embargo, la presencia del fósforo en los suelos es positiva, dado que promueve el incremento de los materiales biológicos, lo que proporciona mejores propiedades al suelo.

La concentración de fósforo en las aguas residuales es, por lo general, mayor a la concentración del mismo elemento en los suelos; esta diferencia en acumulaciones permite la remoción del fósforo al aplicar aguas negras al suelo. Las aguas de desecho pierden este elemento al ser aplicadas al suelo debido a reacciones de adsorción y precipitación; la adsorción es la propiedad que tienen determinados cuerpos de fijar sobre su superficie otras sustancias y la precipitación es la separación de un cuerpo sólido del líquido en el que estaba contenido o disuelto.

El término sorción se utiliza para comprender en una sola palabra a los procesos de adsorción y precipitación, debido a la dificultad que existe para diferenciar a uno del otro mecanismo. La sorción implica la remoción del fósforo de la solución y está en función de la concentración de dicho elemento en las soluciones aplicadas, de la temperatura, del tiempo en que pueda efectuarse las reacciones y de los componentes de las aguas de desecho, que pueden reaccionar con el fósforo y alterar las propiedades del suelo; además de la capacidad de los materiales del suelo para mantener estas reacciones.

De acuerdo con lo anterior, resulta que los procesos principales de eliminación del fósforo son: la precipitación y la adsorción química, además de lo que las plantas puedan aprovechar.

La adsorción química se presenta cuando el fósforo (en forma de ortofosfatos) es adsorbido por los minerales de arcillas y por fracciones orgánicas del suelo. El fósforo que queda adsorbido o fijado a la superficie de la arcilla o de las partículas de suelo, es firmemente retenido por las partículas de suelo y por lo general no sufre lixiviación.

La precipitación química con calcio (a valores de pH desde neutros a alcalinos) y con hierro o aluminio (a valores ácidos de pH) se produce a una velocidad menor que la adsorción, pero es también significativa.

Por lo tanto, el fósforo se elimina mediante la cosecha de los cultivos, o bien se acumula en los sólidos del suelo en forma de compuestos orgánicos, sufre adsorción por iones o se precipita por los compuestos inorgánicos del suelo. Es posible removerlo también por la erosión del suelo, en forma de fósforo soluble, o llega a lixiviarse en el agua infiltrada, siendo esto último poco frecuente, como antes se comentó.

El contenido de fósforo en los suelos se encuentra en un rango de 0.01 y 0.2 % y varía de acuerdo con las reacciones químicas que ocurren entre el fósforo soluble y los materiales del suelo. En suelos a los que se les han aplicado altas cantidades de fertilizantes, se pueden obtener elevadas concentraciones de fósforo.

En los procesos de adsorción y precipitación del fósforo participan compuestos del suelo, tales como: iones solubles de hierro y aluminio, óxidos e hidróxidos, silicatos y calcio soluble, además de calcio en forma iónica de carbonatos. Durante la adsorción del fósforo ocurren reacciones con iones de hierro, aluminio o calcio y pueden presentarse sobre superficies de las partículas de suelo o sobre superficies de óxidos o hidróxidos que recubren a las arcillas cristalinas o sobre las superficies de silicatos amorfos.

Generalmente el aplicar fósforo a los terrenos agrícolas, beneficia a los cultivos pues aumenta el crecimiento de las plantas, pero la aplicación excesiva de este elemento puede resultar perjudicial para las cosechas, pues la presencia en exceso del fósforo, limita la disponibilidad de otros elementos como hierro, zinc y cobre, por ejemplo. La eliminación del fósforo es también función del tipo de sistema de aplicación al terreno que se utilice.

## 2.5 Metales pesados

A pesar de que los metales pesados se requieren en pequeñas cantidades para las plantas y animales, su presencia en altas concentraciones en las aguas residuales que se disponen en el suelo, resulta perjudicial y tóxica para la vida de los vegetales, microorganismos y animales. En estas condiciones, los metales pesados pueden formar parte de la cadena alimenticia, estando presentes en los cultivos y pueden dañar la salud de quien los consuma. Tal es el caso de metales como el cadmio y el cobre que pueden incorporarse en los cultivos y en órganos de humanos y animales. El zinc, níquel y cobalto generalmente no alteran a humanos y animales, pues forman compuestos prácticamente insolubles en los suelos, al igual que el arsénico, cromo y plomo, aunque este último en menor medida.

La remoción de los metales pesados en el suelo puede originarse por los vegetales, pueden ser lixiviados por las aguas que llegan a los acuíferos o a las aguas superficiales o quedar firmemente retenidos en la matriz del suelo. La retención en la matriz del suelo se produce principalmente a través de la sorción (adsorción y precipitación) y del intercambio iónico.

Los suelos poseen una capacidad de retención de metales pesados relativamente alta, sobre todo si el pH del suelo es mayor a 7. Por lo general, conforme el pH disminuye, la solubilidad de los metales es mayor, al igual que su concentración en la solución del suelo.

La interacción de los metales con otros compuestos y su estado químico regula la disponibilidad de los mismos para las plantas y el movimiento que puedan tener los metales a través del suelo. Así por ejemplo, metales como cobre, níquel, cadmio, plomo, zinc, manganeso y cobalto se presentan en forma de cationes divalentes en suelos ácidos; en suelos neutros o alcalinos se combinan con iones hidróxilo u otros metales.

Las aguas residuales domésticas contienen generalmente, bajas concentraciones de metales pesados, lo que no ocurre en el caso de aguas residuales de tipo industrial. Por lo general, las aguas negras municipales no representan peligro potencial para los cultivos en cuanto a metales pesados. Sin embargo, en caso de contener altas concentraciones de metales como cadmio, zinc, molibdeno, níquel y cobre pueden ser tóxicos para los cultivos. Como medida de prevención contra efectos fitotóxicos, es que han sido propuestos estándares de concentración de los metales pesados. De tal manera se sugiere, como uno de estos estándares, que el suelo al que se apliquen las aguas residuales, tenga un pH mayor a 6.5 y que se dispongan en él cuando más 250 mg/l de zinc o el equivalente como la suma de zinc, cobre o níquel. Es difícil cumplir con estos estándares en la realidad, puesto que no todos los suelos en que se aplican aguas residuales tienen pH altos, además de que la fitotoxicidad de los metales es visible cuando se encuentran en solución y no siempre se hallan de esta manera, sino que los metales se encuentran muchas veces retenidos en micelas en las partículas de los suelos agrícolas.

Debido a que los metales son retenidos en la materia orgánica o en las partículas de arcilla de los suelos, o a que se infiltran por los estratos del terreno con lo que pueden llegar hasta las aguas subterráneas, es poco probable que afecten a los cultivos, siempre y cuando no se encuentren en altas concentraciones en las aguas residuales aplicadas al suelo.

La fitotoxicidad que puede provocar la acumulación de metales en las tierras, depende del tipo de cultivo, del pH del suelo, del área de terreno utilizado y de la concentración de los metales.

Debe considerarse también que la capacidad de remoción de este tipo de elementos por medio de las plantas, es muy variable, de acuerdo con el cultivo de que se trate y con las partes de las plantas en que se acumulan los metales, tales como tallos, hojas, raíces, frutos y semillas. De esta manera, es posible que las plantas contribuyan con una remoción significativa de los metales pesados, o que ni siquiera participen como mecanismo de remoción.

## 2.6 Cationes intercambiables y sales.

Las altas concentraciones de cationes intercambiables tales como iones de sodio, calcio y magnesio, pueden provocar efectos perjudiciales para los suelos. Por ejemplo, el sodio en altas concentraciones en los suelos arcillosos, provoca la dispersión de las partículas del suelo lo que reduce la permeabilidad del mismo. Se han realizado estudios al respecto de los que se obtuvo un concepto denominado relación de adsorción de sodio (RAS), definida como:

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{0.5(Ca+Mg)}}$$

en donde:

Na = Sodio, miliequivalentes/l

Ca = Calcio, miliequivalentes/l

Mg = Magnesio, miliequivalentes/l

La relación de adsorción de sodio (RAS) es un índice que permite estimar el grado de afectación que el sodio contenido en las aguas residuales puede causar, al aplicarlas al suelo. Conforme aumenta el valor de la RAS se tiene un mayor porcentaje de sodio intercambiable en el suelo, y por lo tanto, una mayor tendencia a la toxicidad.

Las plantas pueden sufrir alteraciones debidas a las altas concentraciones de sodio. Las sales originan aumentos en la presión osmótica de la solución de suelos que se encuentra en contacto con las raíces de las plantas y estas sales pasan a formar parte de dicha solución; pueden ocupar el lugar de otros compuestos esenciales para el desarrollo de los cultivos y que deberían estar presentes en tales soluciones. Es decir que, los cationes de sodio (por ejemplo) sustituyen a otros cationes durante el intercambio; al ocurrir esto se presenta un desequilibrio de electrones en las micelas de suelos quedando cargas residuales eléctricas negativas, por lo que las partículas se repelen, desfloculando el suelo y rompiendo la estructura del mismo. Con ello disminuye la cantidad de agua y nutrientes disponibles para los cultivos.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los suelos define la magnitud con que un suelo puede retener o asimilar sales y es una medida de la reactividad química del suelo. Permite conocer la capacidad que tiene el suelo para adsorber contaminantes catiónicos; está en función del contenido de arcilla y de materia orgánica, además de las concentraciones de óxidos de hierro e hidruros de aluminio. A medida que el contenido de arcilla de un suelo aumenta, su capacidad de intercambio catiónico (CIC) lo hace también.

La salinidad excesiva causa daños a los cultivos. En las plantas herbáceas se observa un crecimiento menor, pueden tener hojas más oscuras, más gruesas y jugosas; en plantas leñosas se aprecian quemaduras en las hojas, necrosis y defoliación.

El daño causado por las sales depende de la especie cultivada, de la etapa de crecimiento del cultivo y del clima. En climas fríos los cultivos parecen ser más tolerantes a las sales (cultivos como alfalfa, frijol, remolacha, zanahoria, algodón, cebolla, tomate y calabazas); los cultivos hechos en tierras poco fértiles son más resistentes a las sales.

### 2.7 Remoción por medio de la vegetación

Las plantas pueden colaborar con la remoción de contaminantes por medio de los procesos siguientes:

- Captando y asimilando el nitrógeno y el fósforo del agua residual aplicada al suelo.
- Manteniendo e incrementando las tasas de entrada de agua y la permeabilidad del suelo.
- Disminuyendo la erosión del suelo.
- Eliminando microorganismos, principalmente en el proceso de escurrimiento superficial.

En el caso de emplear sistemas de infiltración rápida, las plantas deben resistir el agua y propiciar altas velocidades de infiltración. Si el sistema utilizado es el de escurrimiento superficial, se requieren combinaciones de hierbas perennes de estaciones cálidas y frías, que sean resistentes al agua. Algunos ejemplos de la capacidad de remoción de nutrientes que tienen las plantas se muestra en el Cuadro 2.4.

Cuadro 2.4

| ELIMINACION DE NITROGENO Y FOSFORO POR DIVERSOS CULTIVOS. |                               |                                |                   |                 |
|---|-------------------------------|--------------------------------|-------------------|-----------------|
| Tipo de cultivo   | Descripción                   | Materia seca producida (kg/ha) | Nitrógeno (kg/ha) | Fósforo (kg/ha) |
| Cultivos de forraje                                       |                               |                                |                   |                 |
| Alfalfa   | Legumbre perenne              | 15770                          | 504               | 39              |
| Gramma  | Perenne en estaciones cálidas | 19712                          | 560               | 80              |
| Raigrás   | Perenne en estaciones frescas | 8030                           | 235               | 67              |
| Trébol  | Legumbre bianual              | 7357                           | 177               | 18              |
| Festuca   | Perenne en estaciones frescas | 6854                           | 133               | 30              |
| Cultivos de campo   |                               |                                |                   |                 |
| Cebada  | Anual en invierno             |                                | 70                | 17              |
| Maíz  | Anual en verano               |                                | 174               | 19              |
| Algodón   | Anual en verano               |                                | 74                | 13              |
| Soya  | Anual en verano               |                                | 105               | 12              |

Fuente: Metcalf y Eddy. Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales. 2ª ed. Barcelona, España.

**2.8 Remoción de microorganismos patógenos**

En los procesos de tratamiento de aguas residuales, resulta de particular importancia la eliminación que mediante estos puede obtenerse de los microorganismos que causan daños a la salud pública. Este tipo de organismos son diferentes clases de bacterias, virus, protozoarios y helmintos. En el Cuadro 2.5 se ejemplifican algunos de los tipos de microorganismos patógenos que se pueden encontrar comúnmente en las aguas residuales.

Debido al riesgo de contraer este tipo de enfermedades, principalmente originadas por la ingestión de agua, verduras y frutas contaminadas por aguas residuales, se han llevado a cabo diversos estudios para determinar qué cantidad de microorganismos se mantiene presente en el agua después de haber sido tratadas y respecto a la cantidad de los mismos que pueden ocasionar infecciones, tanto en seres humanos como en animales, además de que se han realizado análisis para conocer la permanencia y movilidad de los microorganismos dentro del terreno.

A partir de estos estudios se han obtenido los datos que se presentan en los Cuadros 2.6 al 2.9

Cuadro 2.5

| <b>ALGUNOS EJEMPLOS DE MICROORGANISMOS QUE PUEDEN ENCONTRARSE EN LAS AGUAS RESIDUALES</b>                         |   |   |
|---|---|---|
| <b>TIPO DE MICROORGANISMO</b>   | <b>EJEMPLOS DE ENFERMEDADES CAUSADAS</b>  | <b>CAUSAS DEL CONTAGIO DE LA ENFERMEDAD</b>   |
| <b>BACTERIAS</b>  |   |   |
| Salmonella typhimurium  | Fiebre tifoidea   | Ingestión de agua potable contaminada con aguas residuales. Consumo de vegetales crudos que durante su cultivo fueron regados con aguas residuales.                                   |
| Salmonella shigella   | Disenteria bacilar  | Causada por beber aguas contaminadas o por ingerir alimentos que fueron regados con aguas negras.   |
| Bacterias del mismo género  | Fiebre paratifoidea<br>Gastroenteritis aguda  | Ingestión de agua o alimentos contaminados por aguas de desecho.  |
| <b>VIRUS</b>  |   |   |
| De tipo entérico<br>Ejemplos:<br>Virus de la polio<br>Echo coxsackie<br>Reovirus<br>Adenovirus<br>Rotavirus, etc. | Polio<br>Hepatitis infecciosa<br>Parálisis<br>Meningitis<br>Miocarditis<br>Diarreas<br>Dermatitis | Se encuentran comúnmente en las aguas residuales pues están presentes en las materias fecales. Infectan los tejidos del tracto respiratorio e intestinal, e incluso de otros órganos. |
| <b>PROTOZOARIOS</b>   |   |   |
| Entamoeba histolytica   | Disenteria amibiana   | También son debidas a el consumo de alimentos o agua que contiene este tipo de microorganismos.   |
| Naegleria gruberi   | Meningoencefalitis  |   |
| Giardia lamblia   | Desordenes intestinales   |   |
| <b>LOMBRICES INTESINALES</b>  |   |   |
| Ascaris sp<br>Enterobios sp<br>Trichuris sp<br>Taenia sp<br>Hymenolepis sp  | Parasitosis   | Por medio de cultivos regados con aguas residuales.   |

Fuente: Normas y Lineamientos para la Disposición de Aguas Residuales en Suelos. SEDUE, México, 1985.

Cuadro 2.6

| <b>SUPERVIVENCIA DE ALGUNOS MICROORGANISMOS PATOGENOS EN EL SUELO Y EN LAS PLANTAS</b> |   |                                       |
|--|---|---------------------------------------|
| <b>Microorganismo</b>  | <b>Medios</b>                               | <b>Tiempo de supervivencia (días)</b> |
| <b>Coliformes</b>  | <b>Superficie del terreno</b>               | <b>38</b>                             |
|  | <b>Vegetales</b>                            | <b>35</b>                             |
|  | <b>Pasto y trébol</b>                       | <b>6-34</b>                           |
| <b>Salmonella</b>  | <b>En el suelo</b>                          | <b>15-280</b>                         |
|  | <b>Vegetales y frutas</b>                   | <b>3-49</b>                           |
| <b>Salmonella typhi</b>  | <b>En el suelo</b>                          | <b>1-120</b>                          |
|  | <b>Vegetales y frutas</b>                   | <b>1-68</b>                           |
| <b>Shigella</b>  | <b>Sobre el pasto (aguas negras crudas)</b> | <b>42</b>                             |
|  | <b>Vegetales</b>                            | <b>2-10</b>                           |
|  | <b>En agua que contiene humus</b>           | <b>160</b>                            |
| <b>Bacilos de la tuberculosis</b>  | <b>En el suelo</b>                          | <b>180</b>                            |
|  | <b>En pasto</b>                             | <b>10-49</b>                          |
| <b>Entamoeba</b>   | <b>En el suelo</b>                          | <b>6-8</b>                            |
| <b>E. histolytica</b>  | <b>Vegetales</b>                            | <b>1-3</b>                            |
| <b>Quistes</b>   | <b>Agua</b>                                 | <b>8-40</b>                           |
| <b>Enterovirus</b>   | <b>En el suelo</b>                          | <b>8</b>                              |
|  | <b>Vegetales</b>                            | <b>4-6</b>                            |
| <b>Huevos de ascaris</b>   | <b>En el suelo</b>                          | <b>Hasta 7 años</b>                   |
|  | <b>Vegetales y frutas</b>                   | <b>27-35</b>                          |

Fuente: M.A. Gamrani. Aprovechamiento Agrícola de Aguas Negras Urbanas. Ed. Limusa, México, 1985.

Cuadro 2.7

| CANTIDAD DE MICROORGANISMOS REMANENTES EN LAS AGUAS DESPUES DE UN TRATAMIENTO CONVENCIONAL |                     |                                      |  |                                 |
|--|---------------------|--------------------------------------|--|---------------------------------|
| ORGANISMO  | AGUAS NEGRAS CRUDAS | EFLUENTE PRIMARIO (Organismos/litro) | EFLUENTE SECUNDARIO (Organismos/litro) | DESINFECCION (Organismos/litro) |
| Salmonella sp.   | $5.28 \times 10^3$  | $2.64 \times 10^3$                   | $1.32 \times 10^3$                     | $1.32 \times 10^1$              |
| E. histolytica   | 3.96                | 3.43                                 | 3.17                                   | $3.17 \times 10^3$              |
| Helminfos (huevos)   | 66                  | 6.6                                  | 13.2                                   | $1.32 \times 10^3$              |
| Mycobacterium sp.  | 52.8                | 26.4                                 | 3.96                                   | $3.96 \times 10^3$              |
| Enterovirus  | $1.05 \times 10^4$  | $5.3 \times 10^3$                    | 528                                    | 52.8                            |

Fuente: Process Design Manual for Land Treatment of Municipal Wastewater. EPA, E.U.A., 1977.

Cuadro 2.8

| NUMERO DE ORGANISMOS QUE PUEDEN CAUSAR ENFERMEDAD EN PERSONAS O ANIMALES SANOS |                 |
|--|-----------------|
| MICROORGANISMO   | DOSIS INFECTIVA |
| BACTERIAS  |                 |
| E. Coli enteropatógeno   | $10^8$          |
| Salmonella   | $10^6$ a $10^9$ |
| PROTOZOARIOS   |                 |
| E. Histolytica   | 20 quistes      |
| VIRUS  |                 |
| Distintos tipos de virus   | 1 a $10^2$      |

Fuente: Normas y Lineamientos para la Disposición de Aguas Residuales en Suelos. SEDUE, México, 1985.

Cuadro 2.9

| INFLUENCIA DE FACTORES AMBIENTALES EN LA SUPERVIVENCIA DE BACTERIAS Y VIRUS EN EL SUELO |                   |  |
|---|-------------------|--|
| FACTOR  | ORGANISMO         | INFLUENCIA   |
| pH  | Bacterias         | Supervivencia menor en suelos ácidos, $3 \leq \text{pH} \leq 5$ , que en neutros o alcalinos   |
|   | Virus             | Datos Insuficientes  |
| Antagonismo con microflora  | Bacterias         | Se incrementa la supervivencia en suelos estériles   |
|   | Virus             | Datos insuficientes  |
| Humedad   | Bacterias y virus | Mayor sobrevivencia en suelos húmedos y durante los periodos de lluvia   |
| Temperatura   | Bacterias y virus | Mayor supervivencia a temperaturas bajas (época de invierno)   |
| Luz solar   | Bacterias y virus | Menor supervivencia en la parte superficial del suelo, en donde se recibe más luz solar  |
| Materia orgánica  | Bacterias y virus | Mayor supervivencia a mayor contenido de materia orgánica; ocurre la activación de algunas bacterias cuando hay suficiente cantidad de materia orgánica en los suelos. |

Fuente: Process Design Manual for Land Treatment of Municipal Wastewater. EPA. E.U.A, 1977

Las bacterias sobreviven en el suelo durante unas cuantas horas; esta permanencia dependerá del tipo de organismo, clase de suelo, capacidad de retención de agua en el suelo y humedad del mismo; contenido de materia orgánica, potencial de hidrógeno (pH), temperatura, luz solar, lluvia, contaminación de aguas residuales; posible compatibilidad o rechazo de los microorganismos existentes en el suelo. Sin embargo, si se aplica el agua residual de manera intermitente, dando tiempo a que ocurran periodos de secado, puede eliminarse gran parte de las bacterias del agua, al ser estas retenidas en el suelo.

La permanencia de los virus en las aguas residuales después de haber pasado éstas por el suelo, se ve afectada por los siguientes factores: naturaleza del suelo, humedad, pH, oposición con la microflora del suelo. Los virus pueden sobrevivir desde periodos de 7 días hasta 6 meses en el suelo, ya que son adsorbidos por las partículas de éste.

Las propiedades físicas y químicas del suelo tienen una influencia importante en la remoción de microorganismos patógenos. A manera de ejemplo: un suelo arcilloso con textura gruesa y arenas consolidadas es un medio filtrante que permite retener las bacterias que contengan las aguas residuales; a diferencia de ello, en rocas muy fracturadas, como pueden ser piedras calizas y basaltos, las bacterias no son retenidas, sino que pueden permanecer contenidas en las aguas de desecho. La velocidad con que se infiltra el agua y el tamaño de la partícula de suelo también tienen influencia en la estancia y permanencia de las bacterias en el agua. De tal manera se ha estimado que un suelo poroso con textura fina (de 1.5 a 3 m de estrato de suelo fino), puede degradar prácticamente todas las bacterias presentes en el agua.

El proceso de adsorción constituye el principal mecanismo de remoción de virus por el suelo.

Atendiendo a la problemática que existe respecto al peligro de provocar el contagio de enfermedades infecciosas por el uso de aguas residuales para riego, se presentan las siguientes recomendaciones:

- a) Para cultivos que se consumen después de haber sido cocinados, hervidos o procesados, resulta adecuado el riego con aguas residuales tratadas.
- b) Deberán regarse frutas y vegetales con aguas residuales tratadas y desinfectadas. Los vegetales no deben regarse por aspersión por lo menos desde cuatro semanas antes de su cosecha. Para el caso de los forrajes, el riego debe suspenderse dos semanas antes de la cosecha.
- c) En los casos que sea posible, se recomienda realizar la desinfección de los suelos, que consiste en introducir vapor de agua en el terreno, antes de la siembra o después de la cosecha.

---

### **3. SISTEMAS DE IRRIGACION**

---

## CAPITULO 3

### SISTEMAS DE IRRIGACION

#### 3.1 Características principales de los sistemas de riego

El riego o irrigación consiste en la aplicación superficial de agua al terreno con el fin de suministrar a las especies vegetales la humedad necesaria para su desarrollo. El mantenimiento de la humedad adecuada del suelo en la rizosfera es de particular importancia para obtener una agricultura productiva.

Los tres procedimientos generales por los que se efectúa el riego son: riego por infiltración subterránea, riego superficial, riego por aspersion. Estos procedimientos se describen a continuación.

##### 3.1.1 Riego por infiltración subterránea

Este tipo de riego consiste en aplicar o inyectar agua afectando el nivel freático de manera que el agua humedezca la rizosfera por efecto de capilaridad. El movimiento ascendente de capilaridad deberá ser lo suficientemente rápido para que se puedan satisfacer las necesidades de agua de los cultivos. Este sistema de riego se puede emplear cuando el agua tenga un bajo contenido salino y si la precipitación es suficiente para lixiviar las sales de la superficie del suelo.

##### 3.1.2 Riego superficial

El riego superficial es el vertido controlado del efluente sobre el terreno; la superficie del suelo es el medio en el que escurre el agua que se distribuye por el terreno. La superficie se alisa y modifica mediante surcos, acanaladuras o bordes de tierra, que permiten distribuir el agua; el efluente circula por gravedad entre los surcos a través de los cuales se infiltra en las capas o estratos del suelo, el agua se dispone en los surcos mediante tuberías ranuradas, que pueden ser de aluminio.

La desventaja principal de este procedimiento es que el agua penetra en el suelo solamente en las porciones que se han cubierto durante una aplicación de agua residual determinada. Debido a que puede resultar difícil humedecer todo el terreno al mismo tiempo, la penetración del agua no es uniforme en el área regada.

Un diseño adecuado del sistema de riego permite lograr una aplicación uniforme. Otro tipo de riego superficial es mediante inundación, en este caso se realizan en el terreno ondulaciones paralelas, poco profundas, siguiendo la pendiente del terreno. Este método es aplicable en terrenos bien nivelados, con pendiente regular y moderada, además de contar con un suministro de aguas negras abundante. El empleo de bordos o represas para lograr la inundación de los terrenos es una práctica aceptable, pues con ello se logra retener el agua mientras que ésta humedece el suelo y es posible conducirla a través de canales de riego. El Cuadro 3.1 muestra parámetros recomendables para los sistemas de irrigación superficiales.

### 3.1.3 Riego por aspersión.

El riego por aspersión consiste en la distribución del agua a través del aire, de modo tal que cubra la superficie por irrigar. El agua es expulsada a presión por los orificios y boquillas de los mecanismos denominados aspersores. Este procedimiento no logra una gran uniformidad de riego en el área, pero permite aplicar una cantidad menor de agua y se alcanzan a cubrir superficies de terreno bastante considerables. La presión con que se despiden el agua de los aspersores varía en rangos desde  $0.25 \text{ kg/cm}^2$  hasta  $10 \text{ kg/cm}^2$ . Los valores más comunes fluctúan entre 2 y  $4 \text{ kg/cm}^2$ . Los sistemas de aspersión pueden ser de dos tipos: fijos y móviles; en caso de estar fijos pueden colocarse sobre la superficie de la tierra o estar enterrados. Los aspersores se encuentran montados sobre tubos espaciados a lo largo de tuberías de distribución de aguas residuales. Pueden ser empleados para irrigar terrenos agrícolas o bosques.

En los sistemas de aspersión sobre la superficie del terreno se hace uso de tuberías de aluminio que tienen costos relativamente bajos y que pueden ser portátiles, aunque pueden dañarse con facilidad debido a la corrosión. Las tuberías de plástico o de fibrocemento son útiles en sistemas enterrados; en este último tipo de sistemas de riego por aspersión la inversión inicial es elevada, pero a cambio de ello se trata de los sistemas más seguros en cuanto a buen funcionamiento.

El riego con aspersores de pivote central consiste en un tubo de distribución que descansa sobre unos soportes con ruedas que giran alrededor de un punto determinado; este es el procedimiento más empleado para el riego con aguas residuales. Los Cuadros 3.2 y 3.3 presentan parámetros usuales para el diseño de sistemas de riego por aspersión. En la Figura 3.1 pueden observarse las principales técnicas de regadío. Las Figuras 3.2 y 3.3 presentan los componentes principales de los sistemas de riego por aspersión.

Los sistemas de irrigación, además de beneficiar al desarrollo de los cultivos, tienen una capacidad de depuración de las aguas residuales y son los más eficientes sistemas de aplicación al terreno, en cuanto a seguridad y calidad del agua que se obtiene como efluente de ellos.

El agua vertida sobre el terreno es captada por las plantas, se presenta el fenómeno de evapotranspiración y a medida que se infiltra a través de los estratos de suelo ocurre la depuración del agua residual suministrada. La evapotranspiración es la combinación de los procesos de evaporación y transpiración en una superficie de terreno determinada, entendiéndose por evaporación al proceso mediante el cual las moléculas de agua en su estado líquido adquieren suficiente energía cinética para pasar del estado líquido al gaseoso; mientras que la transpiración es el proceso por medio del cual el agua absorbida por las plantas, es expulsada por éstas hacia la atmósfera en forma de vapor de agua.

Cuadro 3.1

| DATOS DE PROYECTO TÍPICOS PARA SISTEMAS DE APLICACION SUPERFICIAL |  |                    |
|---|--|--------------------|
| CARACTERISTICA  | VALOR O DESCRIPCION  |                    |
|   | Intervalo  | Valor típico       |
| <b>SISTEMA DE SURCOS</b>  |  |                    |
| Topografía <sup>1</sup>   | Desde terrenos prácticamente planos hasta pendientes ligeras                                   |                    |
| <b>Dimensiones</b>  |  |                    |
| Longitud del surco (m)  | 183-427  |                    |
| Espacio entre surcos (cm) <sup>2</sup>                            | 51-102   |                    |
| <b>Aplicación<sup>3</sup></b>                                     |  |                    |
| Tipo de tubo  |  | Aluminio perforado |
| Longitud del tubo (m)   | 24.4-30.5  |                    |
| Períodos de descanso de la aplicación                             | Hasta 6 semanas  | De 7 a 14 días     |
| <b>SISTEMA POR INUNDACION</b>                                     |  |                    |
| <b>Dimensiones de los bordos<sup>4</sup></b>                      |  |                    |
| Ancho de los bordos (m)   | 6.1-30.5   | 12.2-18.3          |
| Pendientes (%)  | 0.2-0.4  |                    |
| Longitud de los bordos (m)  | 183-427  |                    |
| Método de distribución <sup>5</sup>                               | Canales o zanjas revestidas de concreto, tubería enterrada o superficial de aluminio perforada |                    |
| Períodos de descanso de la aplicación                             | Hasta 6 semanas  | De 7 a 14 días     |
| <b>Tasa de aplicación por metro de ancho de bordo<sup>6</sup></b> |  |                    |
| Arcilla (l/m.s)   | 2-4  |                    |
| Arena (l/m.s)   | 10-15  |                    |

<sup>1</sup> Los terrenos relativamente planos son ampliamente utilizados en el riego por surcos que se trazan siguiendo la pendiente o si el terreno tiene una pendiente ligera los surcos se trazan a lo largo de las curvas de nivel.

<sup>2</sup> De acuerdo con el cultivo se determina el espacio entre surcos.

<sup>3</sup> Se recomiendan tramos cortos de tubería, buscando con ello tener diámetros menores de los tubos y disminuir las pérdidas de carga. Las tuberías de alimentación pueden colocarse un poco más elevadas para dar una carga hidráulica de 0.9 a 1.2 m para lograr una distribución uniforme.

<sup>4</sup> Las dimensiones de los bordos dependen del tipo de cultivo, de suelo y de la pendiente

<sup>5</sup> La distribución del agua residual para riego se lleva a cabo mediante un canal o zanja revestida con concreto, con compuertas en sus extremos, con tuberías enterradas como tubos de salida que conducen el agua a cada parcela en particular o con tuberías de aluminio perforada.

<sup>6</sup> Las tasas de aplicación varían dependiendo del tipo de suelo.

Fuente: Metcalf y Eddy. Ingeniería Sanitaria. Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales. Barcelona, España, 1985.

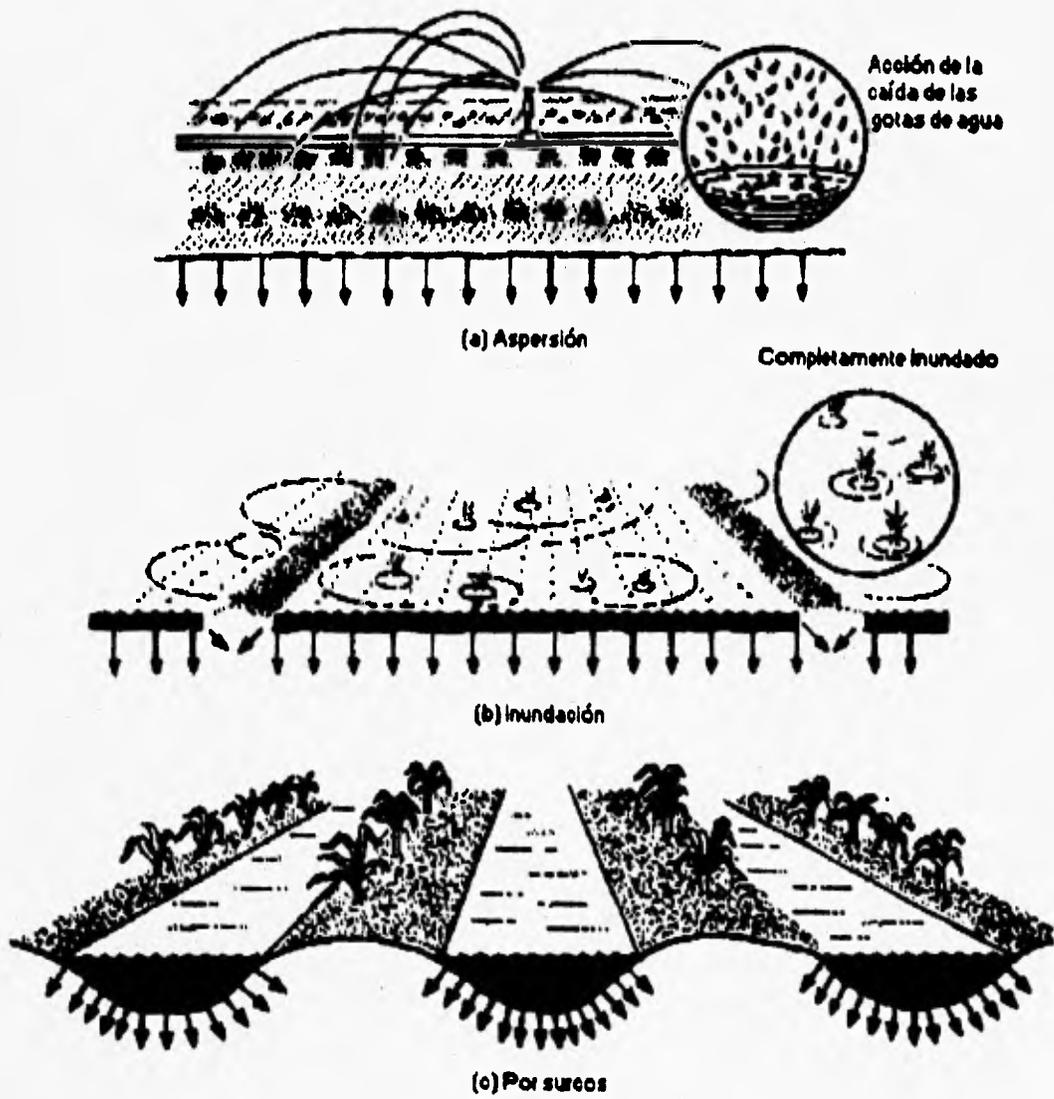


Figura 3.1 Técnicas de irrigación

Cuadro 3.2

| DATOS DE PROYECTO PARA SISTEMAS DE ASPERSION FIJOS   |   |  |
|--|---|--|
| Características  | Valor o descripción   |  |
|  | Intervalo   | Valor típico                                   |
| Espaciamiento entre aspersores (m)<br>(Rectangular, cuadrado o triangular)<br>Tasa de aplicación (cm/hora) <sup>1</sup>                                      | De 12.2 por 18.3 a<br>30.5 por 30.5<br>0.25-2.5 o mayores                 | De 18.3 por 24.4 a<br>24.4 por 30.5<br>0.4-0.6 |
| Boquillas de los aspersores  |   |  |
| Tamaño de los orificios o aberturas (cm)<br>Descarga por las boquillas (l/s)<br>Presión de descarga (kN/m <sup>2</sup> )<br>Sistemas de control <sup>2</sup> | 0.64-2.54<br>0.25-8.3<br>200-700<br>Automático, manual,<br>semiautomático | 0.5-1.6<br>350-400<br>Automático               |
| Tubos de salida <sup>3</sup>   |   |  |
| Tipo<br>Altura (m)   | Tubo galvanizado o de PVC   | 0.915-1.22                                     |

<sup>1</sup> Expresión para el cálculo de la tasa de aplicación:

$$\text{Tasa de aplicación (cm/hora)} = \frac{360 \text{ l/s (por aspersor)}}{\text{Superficie (m}^2\text{)}}$$

<sup>2</sup> Son recomendables los aspersores con una sola boquilla, pues es más difícil que ésta se obstruya.

<sup>3</sup> El control puede efectuarse mediante válvulas de funcionamiento hidráulico o eléctrico.

\* La altura debe ser tal que permita extraer el cultivo, el dato que se presenta en el cuadro es para la hierba. Debe estar bien sujeto el tubo de salida para que las vibraciones de los aspersores de impacto no los dañen.

Fuente: Metcalf y Eddy. Ingeniería Sanitaria. Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales, Barcelona, España, 1985.

Cuadro 3.3

| VALORES TÍPICOS PARA EL PROYECTO DE SISTEMAS DE ASPERSION MOVILES CON PIVOTE CENTRAL   |  |
|--|--|
| Característica   | Valor o descripción  |
|  | Intervalo típico   |
| Tamaño   |  |
| Longitud lateral (m)<br>Superficie de riego por unidad (ha)                            | 180-425<br>14-55   |
| Propulsión   |  |
| Tipo de transmisión<br>Duración de un giro   | Hidráulica o eléctrica<br>De 8 horas a 1 semana  |
| Primaria (presión con que se despiden el agua por el aspersor)                         |  |
| En la boquilla (kN/m <sup>2</sup> )<br>En el pivote (kN/m <sup>2</sup> )<br>Topografía | 350-450<br>550-650<br>Los sistemas pueden funcionar correctamente hasta en terrenos ondulados y hasta con pendientes de 15-20% |

Fuente: Metcalf y Eddy. Ingeniería Sanitaria. Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales. Barcelona, España, 1985.

En los proyectos que emplean el riego como un procedimiento de tratamiento participan distintos mecanismos de remoción como son la oxidación biológica, la remoción del nitrógeno y del fósforo por asimilación de los cultivos, desnitrificación, adsorción, pérdidas por evapotranspiración, etc. Mediante la oxidación biológica se reducen los compuestos orgánicos en los primeros estratos del suelo y en la superficie del mismo; con ello se pueden llegar a obtener concentraciones desde 1.2 hasta 2.2 mg/l de DBO en aguas crudas, de 0.6 a 2.1 mg/l de DBO (como medida de la materia orgánica) en aguas que ya han sido sometidas a tratamiento tanto primario como secundario, utilizando para ello cargas de aplicación de 15 cm/semana. En algunos procedimientos que han sido ejecutados se alcanzaron 1.5 mg/l de DBO al aplicar agua tratada a nivel primario cuya concentración inicial de DBO era cercana a 100 mg/l, con una tasa de aplicación de 5.6 kg/ha.día.

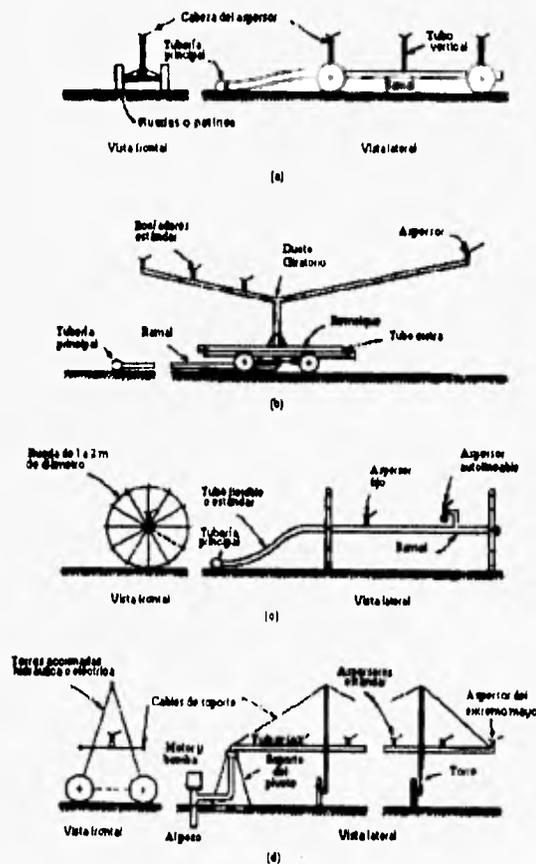


Figura 3.2 Sistemas de aspersión de movimiento mecánico

- a) Laterales remolcados por el extremo
- b) Unidad tipo ducto rotatorio
- c) Alas de rodamiento lateral (movimiento mecánico o manual)
- d) Ramal de autopropulsión (montado en el centro)

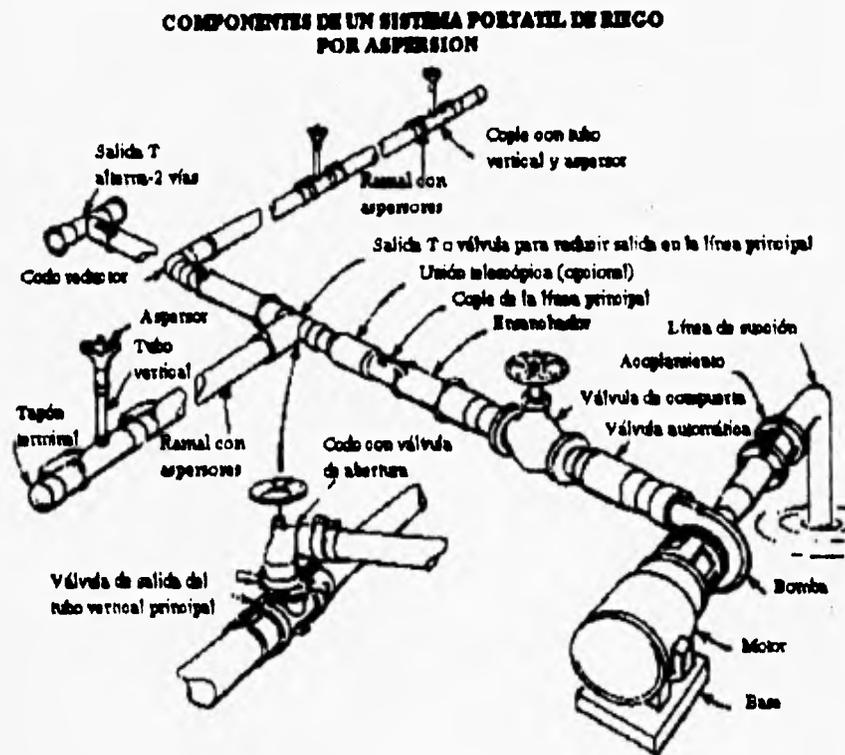


Figura 3.3 Instalación típica de un sistema de riego por aspersión

El nitrógeno se remueve en los sistemas de irrigación en 15-25 % por desnitrificación y casi la totalidad restante es asimilada por los cultivos.

El fósforo es degradado en rangos de 70-85% por adsorción y precipitación en los suelos y del 15 al 30% de su concentración es captada por la vegetación.

Por otra parte, la utilización de las aguas residuales para riego mejora la estructura del suelo además de su fertilidad; esto se debe a las aportaciones de nitrógeno, fósforo y materia orgánica que están contenidas en ellas. Sin embargo, resulta difícil que el origen de las aguas residuales sea puramente doméstico, dado que, por lo general se le añaden descargas de aguas residuales generadas en industrias, lo que provoca inseguridad respecto a su posible uso para riego. Esta incertidumbre se debe al riesgo de la presencia de microorganismos patógenos en las aguas negras, lo que puede afectar a la salud de los consumidores de cultivos regados con aguas de estas características; además de la posible existencia de sales, metales pesados tóxicos y otros

contaminantes en las aguas residuales, los que no sólo representan un peligro para la salud de quienes los consuman, sino que afectan las características de los suelos en el caso de encontrarse en altas concentraciones, disminuyendo su productividad agrícola.

Para diseñar un sistema de riego con objeto de proporcionar agua con características tales que pueda ayudar al crecimiento de las plantas y con el que sea posible obtener un tratamiento del agua residual aplicada, deben considerarse los siguientes puntos:

1. Objetivos del proyecto
2. Selección del emplazamiento
3. Tratamiento previo a la aplicación
4. Condiciones climatológicas y posibilidad de almacenamiento del agua residual en lagunas.
5. Carga hidráulica por aplicar
6. Necesidades del terreno
7. Selección del cultivo
8. Métodos de distribución
9. Ciclos de aplicación
10. Drenaje
11. Control del escurrimiento superficial

### 3.2.1 Objetivos del proyecto de sistemas de riego

El propósito principal del sistema de irrigación es el tratamiento del agua residual que se dispone en el terreno; junto con él se puede pretender obtener un beneficio económico al aprovechar los nutrientes contenidos en el agua residual como catalizadores del crecimiento de los sembradíos. Resulta factible también el empleo del agua tratada para la conservación de áreas verdes y de espacios abiertos.

En el caso en el que el principal objeto es la depuración de las aguas residuales, la carga hidráulica por aplicar estará en función de la capacidad de infiltración del suelo y de la carga de nitrógeno aplicada. En caso de que la capacidad hidráulica del terreno se limite por una capa superficial prácticamente impermeable o por un nivel de aguas freáticas cercano a la superficie, resulta conveniente construir drenes que contribuyan a aumentar la carga. El pasto es el tipo de vegetación que comúnmente se utiliza, debido a su alta capacidad de asimilación y descomposición del nitrógeno, además de su resistencia a altas cargas de agua.

Si se pretende obtener una buena cosecha que produzca beneficio económico, las necesidades de agua y de nitrógeno de los cultivos determinarán las cargas hidráulicas que puedan ser aplicadas. Resulta adecuado analizar la posibilidad de almacenar las aguas residuales (lo que puede hacerse en lagunas) en las épocas del año en que no se siembra cierto cultivo y aprovecharlas para dar un riego completo durante la etapa del desarrollo del cultivo en la que sea más requerida.

La reutilización que puede dársele al agua una vez tratada permite la conservación del agua potable, pues el regadío de áreas verdes y de espacios abiertos es factible de realizar con tales aguas tratadas. Es recomendable para este fin el empleo de efluentes de tratamientos secundarios, con tasas de aplicación que sean adecuadas al tipo de vegetación que se encuentre en el lugar.

### 3.2.2 Elección del terreno o emplazamiento por irrigar

Existe una amplia variedad de factores que intervienen en la selección del sitio en que se debe efectuar el riego. Dentro de los más importantes de éstos, se encuentra las propiedades de drenabilidad del suelo, es decir, la facilidad con que se puede desalojar el agua a través de él. También es de particular importancia el tipo de cultivo o vegetación a la que se aplicará el riego; esto obedece a que ambas variables influyen en la determinación de la carga hidráulica que deberá aplicarse al terreno.

Preferentemente deben utilizarse terrenos moderadamente permeables por los que se pueda infiltrar cerca de 5 cm diarios, de manera intermitente. De tal manera, deberán buscarse y seleccionarse suelos desde arcillas hasta arenas limosas. Las pendientes de las cultivos tendrán como límite el 20% o menos, de acuerdo al equipo mecánico que se utilice. En la medida de lo posible, se buscarán terrenos que se encuentren en sitios alejados de la población, con un manejo adecuado de las aguas residuales y del terreno, intentando con ello preservar la salud de los agricultores y de la población que habite cerca del lugar.

Las cargas o tasas de aplicación determinan la superficie total que se requiere para implantar el sistema de tratamiento por riego. Además de ello deben tomarse en cuenta las zonas que se destinarán para el amortiguamiento, almacenamiento, caminos de acceso o vialidades, diques, bordos, muros u obras de protección contra inundaciones, cercas, alambrado, iluminación, edificios de operación y casetas de vigilancia.

La amplia variación de tasas de aplicación permite únicamente dar valores típicos de tamaños de terrenos necesarios, tales como:

- De experiencias previas se tiene que la superficie que se requiere para tratar mediante riego un gasto de 3800 m<sup>3</sup>/día, varía entre 22 y 226 ha, estando el rango común entre 40 y 80 ha.
- Las porciones o franjas del terreno a las que no se les aplica agua residual mediante riego (zonas de amortiguamiento) son comúnmente utilizadas en los procesos de irrigación por aspersión.

En el Cuadro 3.4 se presenta un resumen de criterios para la selección del emplazamiento. Las Figuras 3.4 a 3.6 ilustran los sistemas de regadío.

Cuadro 3.4

| FACTORES Y CRITERIOS DE ELECCION DEL SITIO EN QUE SE EFECTUARA EL RIEGO CON AGUAS RESIDUALES |   |
|--|---|
| FACTOR   | CRITERIO  |
| <b>SUELO</b>   |   |
| Tipo   | De preferencia suelos de tipo margoso, siendo aceptables suelos arenosos y arcillosos   |
| Drenabilidad   | Recomendable un suelo bien drenado  |
| Espesor  | Se recomienda un espesor relativamente uniforme de 1.5 m a 1.8 m o mayor, para todo el terreno de cultivo   |
| <b>AGUA SUBTERRANEA</b>  |   |
| Distancia hasta la capa freática   | Al menos 1.5 m. En caso de ser necesario puede utilizarse drenaje para tener esta distancia   |
| Control del agua subterránea   | Se requerirá para recargar el agua subterránea en casos en que el nivel de aguas freáticas se encuentre por debajo de 3.1 m de la superficie  |
| Movimiento del agua subterránea  | Debe determinarse la velocidad y la dirección del movimiento  |
| Pendientes   | Hasta del 20% con o sin terrazas  |
| Aislamiento  | Es recomendable que el emplazamiento se encuentre retirado de la población. La distancia dependerá de las características del agua residual, del método de aplicación y del tipo de cultivo |
| Distancia de la fuente de agua residual  | Deberá determinarse aplicando criterios económicos  |
| Formaciones subterráneas   | Resulta recomendable obtener mapas y estudiar las formaciones del subsuelo, para determinar si se pueden contaminar los acuíferos al infiltrarse y/o percolarse el agua residual aplicada   |

Fuente: Metcalf y Eddy. Ingeniería Sanitaria. Tratamiento, Evacuación y reutilización de Aguas Residuales. Barcelona, España, 1965.

### 3.2.3 Grado de tratamiento requerido previo a la aplicación

El agua por aplicar mediante riego al terreno debe tener un nivel de depuración determinado, que está en función de diversas variables tales como: normas de salud pública, carga por aplicar y eficiencia de los equipos de tratamiento que se empleen. Así, por ejemplo, puede ser necesaria la estabilidad biológica de las aguas para evitar los malos olores en las lagunas de almacenamiento o durante el invierno; de tal manera que resulta conveniente hacer una comparación entre los costos de tratamiento y los costos del proyecto y la construcción de depósitos de almacenamiento, tales como lagunas de estabilización.

En general las normas sanitarias determinan el grado de tratamiento que debe proporcionarse al efluente, previamente a su aplicación mediante irrigación, dichos lineamientos o normas deben ser un parámetro muy importante que delimite, para el caso de ciertos cultivos que

se consumen crudos, el nivel de tratamiento que se requiera sea secundario, avanzado, desinfección o incluso el caso en que se prohíba el riego con aguas residuales.

Pueden mencionarse otros factores que influyen en esta determinación, como son: el tipo de cultivo por regar, el uso final del producto que habrá de cosecharse, el contacto que puedan tener las aguas de riego con la población y el método de aplicación.

#### 3.2.4 Clima y almacenamiento

En el caso de cultivos que se cosechan una sola vez al año, el agua residual deberá aplicarse únicamente durante la época de riego, siendo necesario complementar con el almacenamiento de las aguas negras para riego, durante 1 y hasta 3 meses en climas templados y de 4 a 7 meses en climas fríos.

Los sistemas de irrigación pueden funcionar aceptablemente hasta en temperaturas bajo cero grados Celsius.

La irrigación con aguas residuales debe detenerse cuando se alcance la precipitación máxima permitida; esta última se encuentra en función de las tasas máximas de infiltración del suelo y del escurrimiento superficial originado por las aguas pluviales. Para aquellos lugares en que la infiltración sea limitada y en los que el escurrimiento de aguas de origen pluvial sea considerable, precipitaciones tan bajas como de 0.5 cm/día harán necesaria la suspensión de la irrigación con aguas residuales. En casos en que no se tengan las situaciones adversas anteriormente citadas, puede continuarse aplicando el efluente aún con precipitaciones diarias mayores a 2.54 cm (1 pulgada).

#### 3.2.5 Cargas de agua residual por aplicar

A partir del análisis de las características del agua residual por aplicar, se pueden efectuar balances del agua, nitrógeno, fósforo, materia orgánica (como DBO), etc., con la finalidad de establecer la carga adecuada para cada parámetro.

Se determina entonces la carga requerida para cada parámetro y con ella la superficie de terreno por irrigar, eligiendo de entre ellas la que necesite una mayor superficie. A esta carga se le denominará carga crítica.

El gasto de agua residual por aplicar, la precipitación, la evapotranspiración, la percolación y la escorrentía son las variables que deben tenerse en consideración para determinar la carga residual por aplicar. Debe cumplirse que el caudal de agua residual aplicado más la precipitación sean iguales a la evapotranspiración más la percolación o infiltración.

La ecuación del balance de agua que debe tenerse es:

$$\text{Precipitación de proyecto} + \text{Agua residual aplicada} = \text{evapotranspiración} + \text{infiltración o percolación}$$

Además es necesario tomar en cuenta la variación de cada uno de estos parámetros a lo largo de las estaciones del año, siendo conveniente hacer un balance mensual y anual.

Para determinar cada uno de los elementos de la ecuación de equilibrio o balance hidráulico arriba escrita se considera lo siguiente:

- La precipitación de proyecto se calcula por medio de un análisis de frecuencias de los años en que se hayan registrado niveles más altos de precipitación. Es práctica común y aceptable tomar el valor del año con más precipitación en un conjunto de 10 años. La precipitación anual de proyecto puede ser cuantificada como el promedio de los valores mensuales a lo largo del año.
- La dispersión en la medición de la evapotranspiración es generalmente pequeña, por lo tanto puede considerarse aproximadamente constante para todo el año.
- La percolación (entendiéndose como tal a la infiltración del agua residual en el suelo y al movimiento a través de él, hasta formar parte del agua subterránea) es determinada mediante el estudio de diferentes factores tales como: características y propiedades del suelo, la geología de los estratos inferiores, las características del acuífero y la duración del período de secado requerido para obtener el crecimiento adecuado de los cultivos. La permeabilidad o conductividad hidráulica de las capas del perfil de suelo es el principal elemento que altera la percolación del terreno en donde se pretende implantar el sistema de irrigación.



**Figura 3.4** Tubería para aplicación de aguas residuales en riego

### 3.2.6 Cargas de nitrógeno

La importancia de conocer la carga de nitrógeno que puede ser aplicada a un terreno radica en que los iones de nitrato permanecen en los estratos del suelo y en caso de llegar hasta los acuíferos pueden afectar la calidad del agua subterránea que los reciba. El nitrógeno que se dispone en el terreno se distribuye de la siguiente manera:

- Es asimilado por los cultivos
- Es desnitrificado
- Se volatiliza
- Llega a las aguas superficiales
- Se infiltra hasta alcanzar las aguas subterráneas
- Queda retenido en el suelo

La presencia de nitrógeno, en cualquiera de sus formas (orgánico, amoniacal, nitrato y nitrito) altera las características de los suelos.

Mediante la siguiente expresión es posible calcular la carga de nitrógeno que se aporta al terreno al aplicar agua residual:

$$N=0.1CL$$

Donde:

N : Carga anual de nitrógeno (kg/ha.año)

C : Concentración de nitrógeno total (mg/l)

L : Carga hidráulica anual (cm/año)

La degradación del nitrógeno al ser asimilado o captado por los cultivos depende del tipo de cultivo de que se trate (como se ejemplifica en el Cuadro 2.4). Es necesario efectuar la cosecha, es decir arrancar las plantas del terreno.

La eficiencia de remoción mediante los procesos de desnitrificación y volatilización del nitrógeno está en función de la tasa de aplicación (carga de agua residual), de las propiedades del agua residual que se pretenda disponer en el terreno y de los microorganismos que estén presentes en el suelo. La degradación del nitrógeno por desnitrificación puede ser del orden del 15 al 25% del total de la concentración de este elemento que haya sido aplicada. En cuanto al fenómeno de volatilización del amoníaco componente del nitrógeno amoniacal, es poco significativa en el caso de que el agua residual reporte potenciales de hidrógeno (pH) menores a 7 y cuando se tengan altas concentraciones de nitrógeno en el efluente por aplicar.

El suelo tiene cierta capacidad para almacenar el nitrógeno, pero esta propiedad es limitada ya que no puede hacerlo permanentemente. Tanto el nitrógeno amoniacal como el nitrógeno orgánico son descompuestos en nitratos los cuales pueden ser lixiviados o descomponerse en forma de gas nitrógeno al ocurrir el proceso de desnitrificación.

En caso de que el nitrógeno en cualquiera de sus formas no haya podido ser removido del agua residual effluente al sistema de riego, persistirá su existencia en la misma o se infiltrará en el subsuelo, pudiendo contaminar los acuíferos.

### 3.2.7 Tasas de aplicación de fósforo

La fijación en los cultivos y la precipitación química son los principales métodos de eliminación de fósforo en los proyectos de tratamiento de aguas residuales mediante riego. Por lo general, el suelo tiene una alta capacidad para la fijación y/o precipitación del fósforo; de tal manera resulta que aproximadamente un 20% de la concentración de este elemento es retenida por las plantas y el restante se degrada por la acción del suelo.

### 3.2.8 Carga orgánica

La carga hidráulica y la concentración de materia orgánica medida como DBO, son los dos parámetros más importantes que determinan la carga orgánica media diaria que debe aplicarse. De acuerdo con estudios realizados por Thomas R.E. en el libro titulado "Degradation of Wastewater Organics in Soil" se requieren de 11.2 a 28 kg/ha.día para que el contenido de materia orgánica en el suelo sea constante.

Las condiciones del suelo se ven beneficiadas al adicionarle materia orgánica a éste, además de que proporciona carbono que es un nutriente importante para los microorganismos presentes en el terreno.

Si se aplica al área por irrigar un effluente de tratamiento a nivel secundario, es posible añadir 2.2 kg/ha.día o menos en caso de estar en el rango antes recomendado, entre 11.2 y 28 kg/ha.día. Respetando estos valores difícilmente se tendrán problemas en cuanto a la acumulación de materia orgánica en el suelo. En caso de que el agua residual haya sido previamente tratada hasta un nivel primario se pueden manejar cargas orgánicas mayores a 22.4 kg/ha.día.

El agua para irrigación deberá ser dispuesta de manera intermitente, es decir, teniendo períodos de descanso después de cada aplicación; esto permite que los microorganismos cuenten con el tiempo adecuado para llevar a cabo la descomposición de la materia orgánica, además de que con ello se logra el drenado suficiente del agua a partir de la capa superficial del suelo y que haya penetración de aire, manteniendo condiciones aerobias en el suelo. Los períodos de reposo o descanso del terreno, que deben pasar entre cada aplicación de agua residual varían de acuerdo con el tipo de cultivo, de la cantidad de parcelas y de la operación del riego. En los sistemas de riego por aspersión las etapas de descanso fluctúan desde menos de un día hasta 14 días, con valores comunes de 5 a 10 días; en riego superficial toma de 6 a 14 días, pudiendo llegar a 6 semanas.

### 3.2.9 Superficie de terreno requerida

El área total de terreno que se necesita en un sistema de irrigación en el que se pretende efectuar el tratamiento de las aguas residuales, estará dividida en las siguientes superficies parciales:

- La superficie de terreno para efectuar el tratamiento.

- Zonas de amortiguamiento.
- Areas para almacenamiento.
- Superficies para edificios, vialidades o caminos, zanjas.
- Regiones destinadas a posibles ampliaciones futuras y espacios disponibles para alguna emergencia.
- En caso de requerir un tratamiento previo a la irrigación (como puede ser un pretratamiento, sedimentación, tratamiento biológico, desinfección) debe considerarse el área de terreno que sea preciso para ello.

La región en la que ocurre el mecanismo de tratamiento es denominada superficie de campo. La superficie de campo se determina con base en las cargas permisibles para parámetros como: carga hidráulica, carga de nitrógeno, fósforo, materia orgánica, etc.). Se conoce como carga crítica aquella que requiere mayor superficie de campo, haciendo el análisis y la comparación entre las cargas de los parámetros anteriormente mencionados.

Para la carga hidráulica, la superficie de campo está dada por la expresión que se muestra a continuación:

$$S.C. = \frac{3.65}{L}$$

Expresión en la que:

- S.C.: Superficie de campo (hectáreas)
- Q: Gasto (m<sup>3</sup>/día)
- L: Carga hidráulica anual (cm/año)
- 3.65: Factor de conversión de unidades

La superficie de campo en el caso de parámetros como la carga de nitrógeno, fósforo, materia orgánica medida como DBO<sub>5</sub>, etc., se determina mediante:

$$S.C. = \frac{0.36}{L}$$

En donde:

- S.C. : Superficie de campo (hectáreas)
- C : Concentración del parámetro en estudio (mg/l)
- Q : Gasto en m<sup>3</sup>/día
- L<sub>c</sub> : Carga del componente (kg/ha.año)

### 3.2.10 Elección del cultivo apropiado para irrigar

La selección de los cultivos o sembradíos debe considerar las siguientes características:

- Capacidad para degradar y eliminar el nitrógeno
- Requerimientos de agua
- Tolerancia de los cultivos a los componentes del agua residual
- Reglamentos sanitarios
- Operación del sistema de irrigación

Los forrajes, cultivos de campo, la vegetación en áreas con jardines y los bosques son, comúnmente, los tipos de cultivo en que se pueden desarrollar estos sistemas de depuración de aguas residuales mediante riego.

- **Forrajes.** Dentro de ellos puede enlistarse a los pastos de caña de las canarias, bromus, festuca, raigrás perenne y grama. Este tipo de cultivos tienen una gran capacidad de captación de nitrógeno, pueden soportar altas cargas de agua residual y también contenidos elevados de sólidos totales disueltos y boro.

El tratamiento previo que se requiere en los cultivos de forrajes es al menos de nivel primario. Por lo general, se trata de sembradíos perennes que no requieren de mayores cuidados y que pueden tener un uso posterior.

- **Cultivos de campo.** Tales como la cebada, sorgo, maíz y milo. No tienen tan alta aptitud para soportar o tolerar tasas de aplicación elevadas de agua residual. En cuanto a la conductividad eléctrica si se reporta un aumento en ella ocurrirá la disminución de la producción de los cultivos; esto se ilustra en el Cuadro 3.5. Es recomendable aplicar un tratamiento primario al agua residual por utilizar en esta clase de cultivos.

El período en que se dan estos cultivos es anual y por ello requieren de mayores atenciones, por medio de las actividades siguientes:

- Plantación o siembra
- Cultivo
- Cosecha
- Preparación del campo

Resulta conveniente la variación de los cultivos a lo largo del año debido a que esto colabora con la degradación y eliminación de nutrientes.

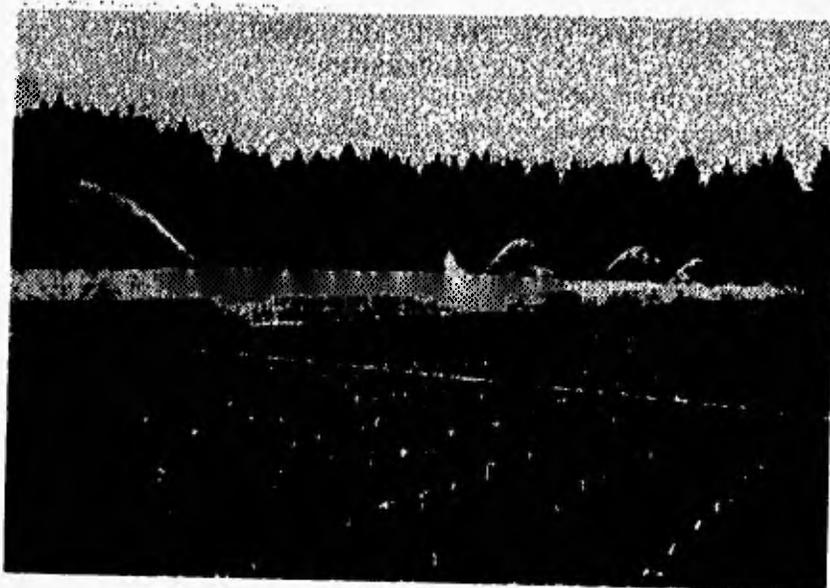
Cuadro 3.5

| REDUCCION DE LA PRODUCTIVIDAD DE LOS CULTIVOS DEBIDA A ALTAS TASAS DE CONDUCTIVIDAD ELECTRICA PRESENTES EN LAS AGUAS DE RIEGO. |   |      |      |
|--|---|------|------|
| TIPO DE CULTIVO  | CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (mmhos/cm) EN EL CASO DE LA REDUCCION DE LA PRODUCTIVIDAD DEL CULTIVO EN: |      |      |
|  | 0%  | 25%  | 100% |
| Cultivos de forraje  |   |      |      |
| Alfalfa  | 2.0   | 5.4  | 15.5 |
| Gramma   | 6.9   | 10.8 | 22.5 |
| Trébol   | 1.5   | 3.6  | 10   |
| Maíz   | 1.8   | 5.2  | 15.5 |
| Raigrás perenne  | 5.6   | 8.9  | 19   |
| Festuca  | 3.9   | 8.6  | 23   |
| Cultivos de campo  |   |      |      |
| Cebada   | 8.0 <sup>(1)</sup>  | 13   | 28   |
| Maíz   | 1.7   | 3.8  | 10   |
| Algodón  | 7.7   | 13   | 27   |
| Papas  | 1.7   | 3.8  | 10   |
| Soya   | 5.0   | 6.2  | 10   |
| Remolacha  | 7.0   | 11.0 | 24   |
| Trigo <sup>(1)</sup>   | 6.0   | 9.5  | 20   |

<sup>(1)</sup> El trigo y la cebada resisten menos las altas tasas de conductividad eléctrica durante los períodos de germinación y siembra, en tales casos la conductividad eléctrica no debe sobrepasar de 4 a 5 mmhos/cm.

Fuente: Metcalf y Eddy. Ingeniería Sanitaria. Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales. Barcelona, España, 1985.

- **Vegetación en áreas con jardines.** Las diferentes áreas verdes tales como las franjas laterales y los camellones centrales en caminos y autopistas, zonas verdes en aeropuertos, en parques y lugares recreativos, campos de golf, etc., pueden ser regadas con aguas residuales e implantar en ellas un sistema de tratamiento. El riego de estas superficies tiene ventajas como el hecho de que no representa un costo por adquisición del terreno y no se trata con cultivos que sean consumidos y que deban cumplir con reglamentaciones de carácter sanitario; por otra parte la cantidad de agua requerida para estas áreas, en la mayoría de los casos, es menor que en los demás sistemas de irrigación. Además, el agua residual puede aplicarse en una superficie mayor, pues los requerimientos del terreno son menores en relación a otros sistemas.



**Figura 3.5 Terreno irrigado mediante aspersión**

- **Irrigación de bosques.** Las zonas boscosas pueden ser aprovechadas para riego empleando aguas residuales con la finalidad de conseguir la depuración de estas últimas, teniendo las ventajas que se enlistan a continuación:

- Comúnmente existen regiones boscosas próximas a los lugares en que se originan las aguas residuales.
- Los suelos boscosos poseen propiedades de infiltración apropiadas para llevar a cabo el tratamiento.
- Los costos de adquisición de los terrenos boscosos son inferiores a los de los terrenos agrícolas.
- Durante épocas frías, el suelo de los bosques conserva temperaturas un poco más altas que los terrenos destinados a la agricultura.

De la misma manera que el riego de los bosques presenta ciertos atractivos, también tiene restricciones, como son:

- Los árboles pueden ser poco resistentes o tolerantes a las aguas residuales.
- La degradación del nitrógeno (principalmente por captación de los cultivos) es menor comparada con la irrigación de otro tipo de cultivos.
- Generalmente se necesita utilizar aspersores fijos, cuyos costos son bastante altos.
- La aplicación del agua residual durante etapas en las que la precipitación se encuentre en rangos elevados, puede ocasionar la inundación y anegación de los árboles que se encuentren presentes en la superficie de riego.

En el Cuadro 3.6 se presenta información acerca de la evapotranspiración y de la degradación de nitrógeno en regiones boscosas.

Cuadro 3.6

| VALORES DE EVAPOTRANSPIRACION Y RETENCION DE NITROGENO EN BOSQUES |                             |             |                                    |
|---|-----------------------------|-------------|------------------------------------|
| ESPECIE   | EVAPOTRANSPIRACION (cm/año) |             | CAPTACION DE NITROGENO (kg/ha.año) |
|   | INTERVALO                   | VALORTIPICO |                                    |
| Pinos   | 13-86                       | 38          | 30-70                              |
| Coníferas de hoja caduca  | 46-86                       | 64          | 40-80                              |
| De hoja caduca  | 22-86                       | 43          | 50-100                             |

Fuente: Metcalf y Eddy. Ingeniería Sanitaria. Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales. Barcelona, España, 1985.

### 3.2.11 Sistema de drenaje para el área de riego

El drenaje de un sistema de tratamiento de aguas residuales en suelos es de particular importancia, debido a que a través de él, es posible recuperar el agua residual que ha sido renovada, es decir, el efluente del sistema. Generalmente el drenaje consiste en conductos como tuberías enterradas con juntas, orificios o perforaciones que permiten recoger y transportar el agua depurada después de haberse infiltrado ésta a través del suelo. Los diámetros de las tuberías son comúnmente de 10 a 20 cm (4 a 8"). Se forma una red de tubos de drenaje que se encuentran enterrados 1, 2 y 3 cm bajo la superficie y son interceptados en algún extremo del terreno por una zanja denominada de cierre.

El nivel de aguas freáticas (N.A.F) experimenta un descenso al colocar los drenes, en los días siguientes a la aplicación del agua residual en forma de riego al terreno.

Los conductos mencionados son necesarios en suelos cuyas propiedades de drenabilidad son escasas, en los casos en que el nivel de aguas freáticas se encuentra próximo a la superficie lo que disminuye la depuración de las aguas negras aplicadas al terreno o en los casos de que tal nivel afecta el desarrollo de los cultivos.

Respecto a la topografía se tiene que ésta influye en la posición, profundidad y variación anual del N.A.F., por lo que deben analizarse tales factores al efectuar el anteproyecto del sistema de irrigación. Es preciso realizar estudios para determinar las condiciones del subsuelo y del agua subterránea.

Los factores que determinan el espaciamiento que debe haber entre los drenes son la permeabilidad del suelo y la profundidad del nivel de aguas freáticas. En suelos con permeabilidades bajas o cuando se apliquen cargas altas la separación entre drenes puede estar en el rango de 15 a 30 m. La distancia entre tuberías para drenes puede ser mayor a 150 m en suelos altamente permeables.

### 3.2.12 Regulación o control del escurrimiento superficial derivado del sistema de irrigación

El funcionamiento del sistema de riego ocasiona un escurrimiento superficial compuesto por las aguas excedentes del riego, aguas en exceso de la precipitación y de la protección del propio sistema de riego, es decir, de las posibles fallas, rupturas, escapes de agua de las tuberías o drenes componentes del conjunto de unidades para riego. A continuación se analizan brevemente los componentes del escurrimiento superficial generado por el proceso de irrigación.

- **Agua en exceso del riego.** El excedente del agua utilizada para riego es mayor en los sistemas de aplicación superficial lo que provoca una excesiva acumulación del agua en los extremos de la superficie de aplicación. Utilizando un conjunto de zanjas se efectúa la recolección del agua y puede llegar a un depósito de pequeñas dimensiones, un cárcamo de bombeo y una línea de conducción a presión que lleve el agua al almacenamiento o a recirculación al riego.

Entre el 10 y el 40% del volumen de agua residual aplicada resulta excedente al riego, en función del sistema, de la atención prestada al mismo y de la tasa de aplicación.

- **Escurrecimiento debido a la precipitación pluvial.** En los casos en que la precipitación pluvial sea de tal magnitud que pueda inundar o dañar la superficie de riego es necesario tomar provisiones para evitar tales efectos; el agua en exceso de la precipitación puede colectarse mediante canales o zanjas y puede ser incorporada o recirculada al propio sistema de tratamiento mediante riego, en caso de no contar con las características deseadas para utilizarse en el riego o si la cantidad con que escurre es demasiada, deberá ser desalojada construyendo para ello una obra de protección y un canal con compuertas dispuestas de manera tal que permitan dicha conducción para el desalojo de las aguas de origen pluvial.

Los factores que determinan el volumen de escurrimiento previsto son: la capacidad de infiltración del suelo, la humedad natural de los estratos de suelo, la pendiente, la clase de vegetación existente en la zona, la temperatura ambiente y la del suelo.

La calidad del agua debida a la precipitación pluvial deberá ser determinada por medio de análisis, ya sea en campo o en laboratorio, según sean las posibilidades que se tengan. En el Cuadro 3.7 se presenta información al respecto, obtenida de estudios realizados en los Estados Unidos de América.

- **Previsión de fallas en el sistema.** Es necesario tomar medidas preventivas debido a posibles desperfectos en el sistema de riego, tales como la ruptura de las tuberías que conducen el agua a los aspersores, la aplicación en demasía de agua residual al terreno para riego, etc. Esto implica llevar a cabo una supervisión y mantenimiento detallado de cada uno de los componentes del sistema de irrigación como son: las tuberías que transportan el agua residual a las parcelas, los aspersores en los casos en que el riego se efectúe por medio de estos mecanismos, el equipo de bombeo cuando sea necesario, etc.

Cuadro 3.7

| CONTENIDO PROMEDIO DE NITROGENO Y FOSFORO EN ESCURRIMIENTO PLUVIAL EN ZONAS RURALES |                      |               |                    |                    |                    |
|---|----------------------|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Fuente  | Concentración (mg/l) |               |                    |                    |                    |
|   | DBO                  | DQO           | NO <sub>3</sub> -N | N <sub>total</sub> | P <sub>total</sub> |
| Precipitación   | 12-13                | 9-16          | 0.14-1.1           | 1.2-0.04           | 0.02-0.04          |
| Terreno forestal  |                      |               | 0.1-1.3            | 0.3-1.8            | 0.01-0.11          |
| Terreno agrícola  | 80                   | 7             | 0.4                | 9                  | 0.02-1.7           |
| Tuberías de drenaje de riego  |                      |               |                    |                    |                    |
| De flujo superficial  |                      |               | 0.4-1.5            | 0.6-2.2            | 0.2-0.4            |
| Para drenaje subterráneo  |                      |               | 1.8-1.9            | 2.1-19             | 0.1-0.3            |
| Tuberías de drenaje para terrenos de cultivo  |                      |               |                    | 10-25              | 0.02-0.7           |
| Líquido que se infiltra debido al abono que se almacena en el terreno               | 10 300-13 800        | 25 900-3 1500 |                    | 1 800-2 350        | 190-280            |
| Escorrentamiento en superficies dedicadas al ganado                                 | 1 000-11 000         | 31 000-41 000 | 10-23              | 920-2 100          | 290-360            |

Fuente: Metcalf y Eddy. Ingeniería Sanitaria. Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales. Barcelona, España, 1985.

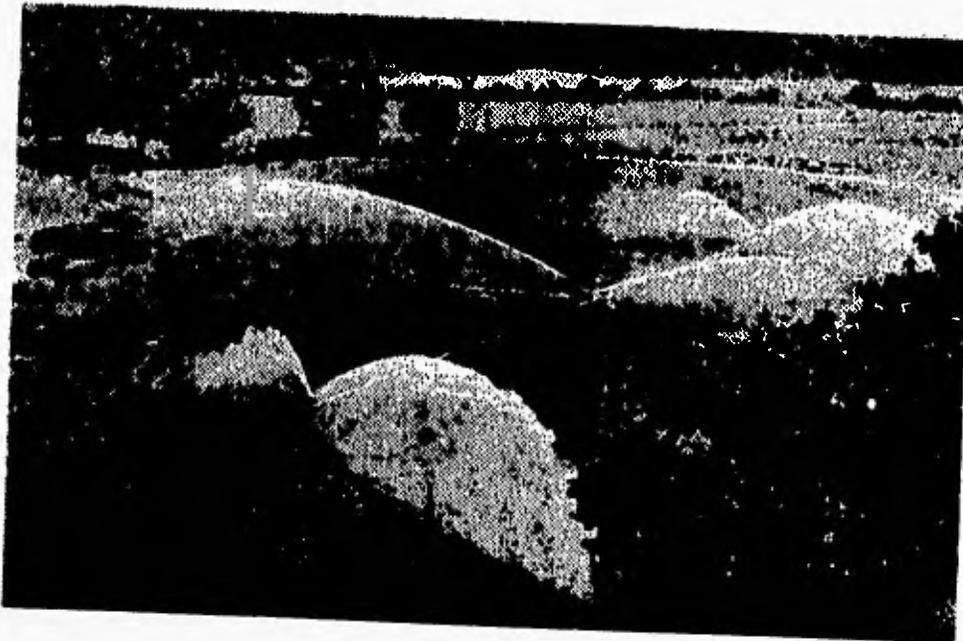


Figura 3.6 Cultivos regados por aspersión

### 3.2.13 Ejemplo de cálculo del balance de aguas para un sistema de riego

A continuación se presenta un ejemplo sencillo de la determinación del balance de aguas para un sistema de riego, contando con los datos siguientes:

- La precipitación de proyecto ha sido tomada como la del año más húmedo (con mayor precipitación) en un período de diez años, teniendo una distribución mensual
- Se cuenta con los datos medios mensuales de evapotranspiración
- El terreno prácticamente plano, sus pendientes son muy pequeñas
- El tipo de suelo es marga arenosa con una tasa de percolación de 25 cm mensuales (La percolación incluye la infiltración del agua a través del suelo y su desplazamiento dentro de él)
- El forraje que se cultiva es grama
- Una parte del agua residual para riego será almacenada en lagunas durante la época de invierno
- El escurrimiento en exceso, en caso de existir, será recolectado y almacenado con la finalidad de recircularlo posteriormente

Tomando en cuenta las siguientes consideraciones puede procederse a llevar a cabo el balance de agua. La ecuación de balance de agua, presentada previamente en este capítulo, es:

$$\text{PRECIPITACION DE PROYECTO} + \text{AGUA RESIDUAL APLICADA} = \text{EVAPOTRANSPIRACION} + \text{PERCOLACION}$$

Se procede a determinar las pérdidas, medidas como lámina de agua en cm, las cuales se conforman por la suma de la evapotranspiración y la percolación (columnas 2 y 3 del cuadro 3.8). A continuación se calcula la lámina de agua residual por aplicar en la superficie de riego restando a las pérdidas totales de agua la precipitación de proyecto (columna 4 menos columna 5). En el Cuadro 3.8 se encuentra la determinación del balance de agua de este ejemplo.

De los resultados obtenidos en el Cuadro 3.8 se tienen las siguientes conclusiones:

- El mes de mayor requerimiento de aplicación de agua residual es el de julio en que se precisa de 42.9 cm, lo que provoca una tasa aproximada de 10 cm/semana.
- Considerando que el volumen de agua residual del que se dispone es igual al que se requiere anualmente, el agua residual de la que se dispone mensualmente es igual al total del agua residual aplicada anualmente entre los doce meses del año (386 cm/año entre 12 meses/año lo que da como resultado 32.2 cm de agua residual).
- El almacenamiento es necesario en los meses en que el volumen de agua residual disponible sea mayor que el requerido (desde noviembre hasta abril para el ejemplo).
- Los 386 cm de carga hidráulica anual se encuentran en el rango normal de cargas para riego que va de 61 a 600 cm/año
- Siguiendo los resultados de este balance es posible determinar las necesidades de superficie y de almacenamiento del sistema.

La Figura 3.7 es un ejemplo de un diagrama de flujo de un sistema de tratamiento en el que se utiliza a la irrigación como proceso de tratamiento avanzado.

Cuadro 3.8

| EJEMPLO DE BALANCE DE AGUAS PARA UN SISTEMA DE RIEGO |                        |                 |                      |                              |                                      |                               |
|--|------------------------|-----------------|----------------------|------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| Mes (1)  | Pérdidas de agua (cm)  |                 |                      | Lámina de agua aplicada (cm) |                                      |                               |
|  | Evapotranspiración (2) | Percolación (3) | Pérdidas totales (4) | Precipitación (5)            | Agua residual aplicada (4)-(5) = (6) | Lámina total aplicada (5)+(6) |
| Enero  | 1.8                    | 25.4            | 27.2                 | 5.8                          | 21.4                                 | 27.2                          |
| Febrero  | 3.8                    | 25.4            | 29.2                 | 5.8                          | 23.4                                 | 29.2                          |
| Marzo  | 7.9                    | 25.4            | 33.3                 | 5.3                          | 28.0                                 | 33.3                          |
| Abril  | 9.9                    | 25.4            | 35.3                 | 4.1                          | 31.2                                 | 35.3                          |
| Mayo   | 13.2                   | 25.4            | 38.6                 | 1.0                          | 37.6                                 | 38.6                          |
| Junio  | 16.5                   | 25.4            | 41.9                 | 0.5                          | 41.4                                 | 41.9                          |
| Julio  | 17.8                   | 25.4            | 43.2                 | 0.3                          | 42.9                                 | 43.2                          |
| Agosto   | 16.5                   | 25.4            | 41.9                 | 0                            | 41.9                                 | 41.9                          |
| Septiembre   | 11.2                   | 25.4            | 36.6                 | 0.5                          | 36.1                                 | 36.6                          |
| Octubre  | 9.9                    | 25.4            | 35.3                 | 1.5                          | 33.8                                 | 35.3                          |
| Noviembre  | 3.8                    | 25.4            | 29.2                 | 2.6                          | 26.6                                 | 29.3                          |
| Diciembre  | 2.0                    | 25.4            | 27.4                 | 5.6                          | 21.8                                 | 27.4                          |
| Total anual  | 114.3                  | 304.8           | 419.1                | 33.0                         | 386.1                                | 419.1                         |

Fuente: Ingeniería Sanitaria. Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales. Barcelona, España, 1985.

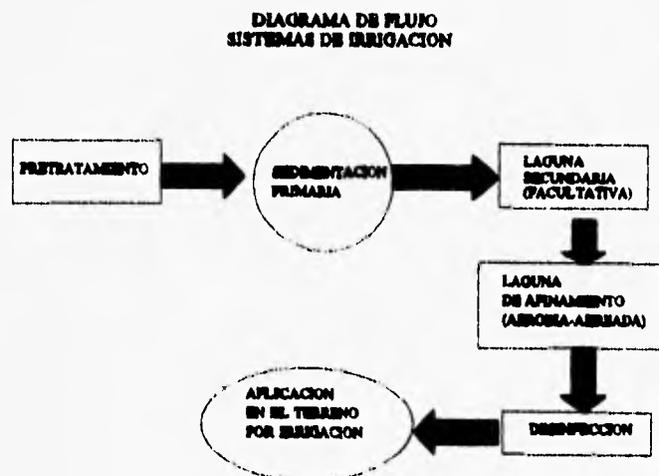


Figura 3.7 Diagrama de flujo. Tratamiento mediante riego

---

#### **4. SISTEMAS DE INFILTRACION**

---

## CAPITULO 4

### SISTEMAS DE INFILTRACION

#### 4.1 Generalidades

La infiltración es el proceso por medio del cual el agua o en general un líquido puede penetrar a través de los poros de un sólido, para los fines del presente estudio este último se trata del suelo. A la combinación del proceso de infiltración con el movimiento del agua a través de los estratos de suelo se le denomina percolación, como anteriormente se explicó.

La depuración de las aguas residuales mediante este tipo de sistemas ocurre debido a la capacidad de degradación de contaminantes que tienen los estratos de suelo y a la descomposición que realizan los microorganismos que se encuentran presentes en ellos.

A diferencia de los sistemas de irrigación, los de infiltración permiten la aplicación de cargas hidráulicas más grandes. La nitrificación, desnitrificación y adsorción son los procesos principales de remoción de nitrógeno; no lo es la asimilación de dicho elemento por los cultivos, como ocurre en el riego; esto último se debe a que la carga de nitrógeno puede exceder a las concentraciones de este elemento que requieran los cultivos. La cantidad total de nitrógeno que se puede remover es comúnmente cercana al 30% del total del mismo, al aplicar láminas de 1.11 m/año; a menor aplicación se puede obtener una mayor eficiencia de remoción de nitrógeno. Por lo general es posible aplicar sólidos en mayores cantidades y las pérdidas de agua por evapotranspiración son menores, en relación con los sistemas de irrigación.

La acción del suelo mientras el agua residual se infiltra a través de él, permite la remoción de los contaminantes. Gracias a ello se pueden obtener excelentes remociones de sólidos suspendidos, materia orgánica medida como DBO y de coliformes fecales. En el Cuadro 4.1 están registrados valores respecto a las eficiencias de remoción de algunos parámetros por medio de este tipo de sistemas de tratamiento en suelos. La adsorción, el intercambio catiónico y la precipitación química son otros mecanismos de remoción que participan en el tratamiento de las aguas residuales al emplear sistemas de infiltración.

Los tipos de suelo más apropiados para estos métodos de tratamiento son aquellos que tienen permeabilidades altas, tales como arenas y arenas-limosas. La principal ventaja de estos sistemas de tratamiento es la capacidad de admitir grandes volúmenes de agua.

Existen dos tipos de sistemas de infiltración, los de infiltración rápida e infiltración lenta.

Cuadro 4.1

| EFICIENCIAS DE REMOCION EN LOS PROCESOS DE INFILTRACION |                            |
|---|----------------------------|
| Parámetro   | Eficiencia de remoción (%) |
| DBO   | 85-99                      |
| DQO   | 50                         |
| Sólidos Suspendidos                                     | 98                         |
| Nitrógeno total   | 0-50                       |
| Fósforo total   | 60-95                      |
| Metales   | 50-95                      |
| Microorganismos   | 98                         |
| Sólidos disueltos                                       | 10                         |

Fuente: "Land Treatment of Municipal Wastewater Effluents". G. Morgan Powell, Denver, U.S.A., 1975

## 4.2 Sistemas de infiltración rápida

### 4.2.1 Descripción del proceso

La infiltración rápida consiste en la aplicación del agua residual directamente sobre terrenos permeables y profundos, generalmente arenosos o areno-limosos.

Comúnmente la disposición de las aguas residuales se efectúa en estanques de infiltración y en algunos casos mediante aspersores. Durante su recorrido o flujo a través del medio, los contaminantes contenidos en las aguas son adsorbidos o degradados biológicamente. La recolección del efluente tratado se realiza utilizando drenes subterráneos conectados a un múltiple cerrado o a canales a cielo abierto. En los casos en que se pretenda recargar los acuíferos con el efluente, no se requiere de drenaje subterráneo. Aproximadamente la totalidad de las aguas residuales que se disponen por medio de infiltración rápida se percolan a través del suelo y parte del efluente tratado, por lo general alcanza a llegar a las aguas subterráneas.

La aplicación de las aguas negras a los estanques se realiza de manera intermitente, es decir, proporcionando etapas de descanso para el terreno. El período de aplicación del influente depende de las características del suelo y de la tasa de aplicación de las aguas residuales y puede estar en un rango de pocas horas hasta varias semanas. Durante los períodos de no aplicación del agua debe permitirse el drenado del suelo con lo que ocurre la entrada de aire, evitando que se presente un estado anaerobio en él. El régimen hidráulico de funcionamiento de un estanque de infiltración se ilustra en la Figura 4.1.



**Fig. 4.1 Régimen hidráulico de funcionamiento de un estanque de infiltración**

La construcción de los estanques de infiltración se lleva a cabo comúnmente con la remoción de la capa orgánica de la superficie del suelo y por la formación de bordos poco profundos aprovechando para ello este mismo material. Los terrenos sobre los que se construyan los estanques deben estar constituidos por arenas y suelos altamente permeables; el fondo de los estanques suele estar cubierto con un tipo de hierba resistente tanto a condiciones húmedas como a secas y que contribuye a la eliminación del nitrógeno y a preservar la capacidad de infiltración de la superficie. El drenaje puede consistir en tuberías de concreto o de arcilla sin juntear.

Antes de proceder a la construcción de un sistema de infiltración rápida, debe estudiarse el perfil del suelo hasta una profundidad importante (30 m o más) y establecer las condiciones de las aguas subterráneas y las características de percolación del agua. Como una primera estimación puede emplearse una carga de 150 mm/día durante 2 semanas de descanso; las cargas reales a aplicar están en función del clima y del suelo.

Existe la posibilidad de que se reduzca la capacidad de infiltración del suelo por obturación de las capas superiores, como una medida de corrección en caso de presentarse este problema, es recomendable arar el suelo y voltear la tierra; el riesgo de que ocurra tal obturación se reduce con un tratamiento previo a las aguas por aplicar en el terreno que puede consistir en cribado y desarenación al menos; en casos especiales puede ser necesaria la sedimentación a nivel primario o incluso secundario, de acuerdo con la disponibilidad y las características del suelo.

#### 4.2.2 Aplicaciones y eficiencia del proceso

El proceso de tratamiento de infiltración rápida puede ser utilizado cuando se dispone de terrenos con la extensión y características convenientes. Resulta ser uno de los procedimientos más económicos, confiables y eficientes para el tratamiento de las aguas residuales. El efluente que se obtiene es de una muy buena calidad y puede dársele reuso agrícola, industrial, municipal y en la recarga de acuíferos.

La calidad del agua tratada de un sistema de infiltración rápida que ha sido bien diseñado y cuyo funcionamiento ha sido adecuado puede llegar a compararse con la calidad de una fuente de abastecimiento de agua potable. Los porcentajes típicos de remoción de contaminantes son:

|   |          |
|---|----------|
| - DBO y Sólidos Suspendidos Totales   | 95 a 99% |
| - Nitrógeno Total Kjeldhal<br>(convertido biológicamente a nitritos y nitratos) | 25 a 90% |
| - Fósforo Total (dependiendo de la capacidad de adsorción del suelo)            | 0 a 90%  |
| - Coliformes fecales  | 99.9%    |

Los tres procesos principales en los sistemas de infiltración se ilustran en la Figura 4.2

**4.2.3 Criterios de diseño**

El diseño de un sistema de tratamiento por infiltración rápida involucra elementos tales como los objetivos del mismo, las características que debe tener el terreno, el nivel de tratamiento que se requiere que haya sido aplicado al agua residual de manera previa, las cargas de aplicación y las condiciones climatológicas.

Para el proyecto de un sistema de tratamiento por infiltración rápida se pueden utilizar los valores de los parámetros de diseño que muestra el Cuadro 4.2

**Cuadro 4.2**

| CRITERIOS DE DISEÑO PARA SISTEMAS DE INFILTRACION RAPIDA |                                      |
|--|--------------------------------------|
| Parámetro  | Valor típico                         |
| Carga Orgánica*  | 2.2 a 11.2 g DBO/ día-m <sup>2</sup> |
| Períodos de aplicación                                   | 9 horas a 2 semanas                  |
| Períodos de drenado                                      | 15 horas a 2 semanas                 |
| Número mínimo de estanques de infiltración               | 2                                    |
| Altura de bordos   | 1.2                                  |
| Profundidad de drenes subterráneos                       | 1.8 m o más.                         |

\* Esta restricción en la carga orgánica disminuye el rango de aplicación de carga hidráulica a un intervalo de 0.02 a 0.08 m<sup>3</sup>/día-m<sup>2</sup>, equivalentes a requerimientos de área de 1080 a 4320 m<sup>2</sup> por cada l/s de gasto medio. En caso de tratarse de efluentes secundarios, la limitación de carga orgánica resulta de requerimientos de terreno de 200 a 400 m<sup>2</sup> por cada l/s de gasto medio.  
Fuente: CNA. Manual para la selección de sistemas alternativos de tratamiento de aguas residuales y lodos producidos.

**4.2.3.1 Objetivos del proyecto**

El principal propósito de un sistema de infiltración es el de la depuración o tratamiento de las aguas residuales que se aplican en él. Es posible reutilizar el agua después de haber sido tratada, esto puede ser para recargar acuíferos o mediante su recuperación por medio de pozos o drenes y reutilizarla posteriormente por ejemplo en riego, para recargar corrientes superficiales por escurrimiento subsuperficial natural; es posible además almacenarla temporalmente en el acuífero.

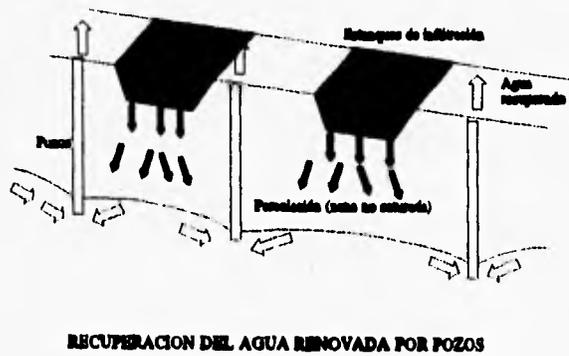
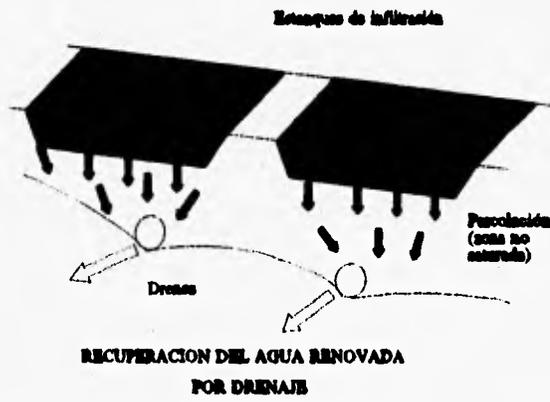


Figura 4.2 Procesos principales en los sistemas de infiltración

#### 4.2.3.2 Selección del emplazamiento

Para que la infiltración del agua aplicada a través de los suelos sea suficiente y permita obtener una depuración aceptable de la misma, se requiere de suelos con altas tasas de infiltración, hasta del orden de 10 a 61 cm/día e incluso mayores. Esto implica la necesidad de contar con suelos tales como arenas, arenas limosas, limos arenosos y gravas; sin embargo, tanto las arenas muy gruesas como la grava son poco adecuadas dado que la infiltración a través de ellas es demasiado rápida, tanto que no proporciona tiempo suficiente para que los mecanismos de remoción actúen sobre las aguas contaminadas, principalmente en los estratos más cercanos a la superficie, a unos cuantos centímetros de ella.

Además de la permeabilidad otros factores intervienen en la elección del sitio apropiado para la ubicación del emplazamiento, tales como: los niveles de percolación, la profundidad del nivel de aguas freáticas y la calidad del agua subterránea; las propiedades del subsuelo y las del acuífero.

#### 4.2.3.3 Nivel de tratamiento requerido antes de la disposición del agua residual

El tratamiento previo sugerido para este procedimiento de depuración de las aguas servidas es, cuando menos, la reducción de los sólidos suspendidos para disminuir la obstrucción de los poros del suelo, ya que tal obturación impide la infiltración y puede ocasionar malos olores; es posible precisar de algún tratamiento biológico previo, como el de lodos activados o el de biodiscos. Por lo general, no es necesario un grado de tratamiento mayor, como pudiera ser la desinfección, dado que los sistemas de infiltración rápida tienen una eficiencia de remoción de microorganismos patógenos bastante alta.

#### 4.2.3.4 Condiciones climatológicas y almacenamiento

Los sistemas de infiltración rápida son altamente resistentes a las condiciones adversas del clima, siendo éstas principalmente las de temperaturas bajas. Lo anterior obedece a que la infiltración no precisa de la vegetación como un mecanismo de degradación de contaminantes importantes, es decir que puede prescindir de ella lo que ocurre en épocas de invierno. En México son pocas las regiones que tienen temperaturas muy bajas y solamente durante el invierno, lo que disminuye la importancia de este aspecto en la eficiencia de este tipo de sistemas. El almacenamiento en estanques en los que se efectúa la infiltración rápida, no se ve afectado significativamente por las variaciones en la temperatura.

#### 4.2.3.5 Cargas de aplicación

Un parámetro importante a considerar en cualquier sistema de aplicación de aguas residuales al suelo es el de la magnitud de las cargas por aplicar, tales como la hidráulica, la orgánica, la de nitrógeno además de otros elementos que pueden estar presentes en las aguas negras.

**Carga hidráulica.** Los rangos en los que varía la carga hidráulica son de 10 a 150 cm/semana en sistemas que permiten tasas moderadas; en los que aceptan niveles elevados de cargas hidráulicas se tienen intervalos entre 150 y 210 cm/semana. La determinación de la magnitud de la carga hidráulica que pueda aplicarse en un emplazamiento determinado depende de la permeabilidad del estrato menos permeable del suelo, al encontrarse en estado saturado, además

de considerar las condiciones más adversas que puedan presentarse con respecto al clima.

Resulta indispensable que la aplicación se realice por etapas, es decir, de manera intermitente; esto ayuda a conservar las cargas de proyecto y que el suelo pueda renovar sus características y propiedades que propician la depuración de las aguas residuales que hayan sido dispuestas en él. Durante un período de entre 5 y 20 días debe darse reposo al suelo evitando aplicar aguas negras en él; gracias a ello se logra la aereación del suelo mediante la penetración del oxígeno en las partículas del suelo con lo que se mantiene el estado aerobio. Cuando se alcanza el secado de la superficie tiene lugar la descomposición de la materia orgánica y el proceso de nitrificación. Estos procesos a su vez ayudan a mantener las condiciones de infiltración aceptables en el suelo; por ejemplo: la capa de materia orgánica que obstruye el flujo del agua a través del suelo es removida al ocurrir su descomposición; la nitrificación permite la liberación de puntos de adsorción de amonio en los suelos de tipo arcilloso y en los humus.

Una vez que haya transcurrido el tiempo en que se da descanso al terreno e inicie nuevamente la aplicación del agua residual hasta inundar el emplazamiento, el nitrato se lixivia hasta que se establezcan condiciones anaerobias y tenga lugar la desnitrificación.

Comúnmente, las tasas de aplicación fluctúan en un intervalo de 6 a 120 m/año. En el Cuadro 4.3 se muestran valores de las cargas hidráulicas comunes en sistemas de infiltración rápida, tomando como ejemplos algunos sistemas ubicados en los Estados Unidos de América.

Cuadro 4.3

| TASAS DE APLICACION COMUNES Y DIFERENTES TIPOS DE SUELOS EN SISTEMAS DE INFILTRACION RAPIDA |                          |               |  |
|---|--------------------------|---------------|--|
| Ubicación del emplazamiento   | Carga hidráulica (m/año) | Tipo de suelo | Nivel de tratamiento previo del efluente |
| Whittier Narrows (Los Angeles, California)  | 127                      | Arena         | Secundario                               |
| Flushing Meadows, Arizona   | 110                      | Arena         | Secundario                               |
| Santee, California  | 81                       | Grava         | Secundario                               |
| Lake George, Nueva York   | 43                       | Arena         | Secundario                               |
| Calumet, Michigan   | 34                       | Arena         | Sin tratamiento                          |
| Ft. Devens, Massachusetts   | 29                       | Arena y grava | Primario                                 |
| Hemet, California   | 33                       | Arena         | Secundario                               |
| Westby, Wisconsin   | 11                       | Marga limosa  | Secundario                               |

Fuente: Metcalf y Eddy. Ingeniería Sanitaria. Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales. Barcelona, España, 1985.

**Carga orgánica.** La concentración de materia orgánica que se tenga en el influente aplicado, determinará las condiciones aerobias o anaerobias que se presenten en el suelo. Puede ejercerse un control de dichos estados por medio de ciclos de aplicación intermitentes; es decir que, durante las etapas en que nos se aplica agua residual al terreno, el aire penetra en el suelo con lo que se proporciona oxígeno a los microorganismos que intervienen en la descomposición de la materia orgánica. Algunos ejemplos de cargas orgánicas de aplicación en sistemas de infiltración rápida en los Estados Unidos de América se muestran en el Cuadro 4.4

Cuadro 4.4

| VALORES TÍPICOS DE CARGAS ORGÁNICAS PARA SISTEMAS DE INFILTRACION RÁPIDA |   |   |
|--|---|---|
| Tipo de influente y ubicación del sistema                                | Carga orgánica (Kg de DBO <sub>5</sub> /ha-día) | Relación entre el tiempo de descanso o secado del terreno y período de aplicación |
| Agua residual producida por industrias alimenticias                      |   |   |
| Leicester, Nueva York  | 560   | 5:1   |
| Deihi, Nueva York  | 270   | 3:1   |
| Sumter, Carolina del Sur   | 120   | 2:1   |
| Agua residual municipal  |   |   |
| Santee, California   | 64  | 1:1   |
| Flushing Meadows, Arizona  | 50  | 1:1   |
| Whittier Narrows, California   | 22  | 1.6:1   |
| Lake George, Nueva York  | 21  | 13:1  |
| Westby, Wisconsin  | 10  | 1:1   |

Fuente: Metcalf y Eddy. Ingeniería Sanitaria. Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales. Barcelona, España, 1985.

**Carga de nitrógeno.** La desnitrificación constituye el principal proceso de remoción del nitrógeno en los sistemas de infiltración; cuando se trata de sistemas con altas tasas de aplicación, no es sólo el procedimiento de eliminación más significativo, sino que es el único que ocurre.

La degradación de este elemento puede verse notablemente incrementada si se aplica periódicamente el agua residual en los suelos y se deja una etapa de descanso o reposo para ellos, teniendo entonces condiciones aerobias y anaerobias de acuerdo con el ciclo de aplicación y reposo que se ejecute. Con ello es factible obtener eficiencias hasta del 80% en la degradación del nitrógeno con el efecto conjunto de la desnitrificación y la adsorción de amoníaco durante la etapa de aplicación e inundación.

**Cargas de otros componentes.** Debido a que en los sistemas de infiltración rápida se disponen elevadas cargas hidráulicas, resulta factible el que se presenten concentraciones significativas de elementos tales como fósforo, metales pesados y sales solubles; sodio, cloruros y sulfatos. La capacidad de retención de los tipos de suelos empleados en sistemas de infiltración rápida es baja para asimilar sales solubles, pero resulta elevada para metales pesados y fósforo. También resulta limitada la remoción de sodios, cloruros y sulfatos.

#### 4.2.3.6 Métodos de distribución

La distribución del agua residual puede realizarse mediante aspersión o por medio de estanques de extensión. La decisión respecto a cual de estos procedimientos es más conveniente de utilizar es función de factores tales como las condiciones del suelo, la topografía, el clima y el almacenamiento.

El agua residual puede ser dispuesta en el terreno por aspersión en el caso de altas cargas hidráulicas de aplicación, mayores a 10.2 cm/semana; es recomendable que exista o se disponga de vegetación resistente al agua (hidrofítica) que permita proteger la superficie del suelo y que evite el escurrimiento superficial del agua aplicada. Cuando se trate de bosques, también es posible emplear aspersores.

La segunda técnica de disposición en infiltración rápida es la de estanques de extensión. El proyecto de un estanque de infiltración rápida debe dar como resultado una superficie de dimensiones tales que permita dispersar los sólidos que impidan u obstruyan la infiltración del agua a través del suelo, para ello puede ser plantada vegetación o una capa de arena y grava en la superficie del terreno. Si se tiene un área sin vegetación es recomendable escarificar o rascar el terreno para remover la acumulación de los sólidos; en caso de contar con plantas en el terreno, debe aplicarse correctamente la carga durante el ciclo de disposición, hasta que la vegetación se haya establecido y se adapte a la agresividad de las aguas servidas.

#### 4.2.3.7 Períodos de aplicación

Es necesario que el agua residual se suministre al terreno de manera intermitente, es decir, teniendo un tiempo en que se efectúe tal abastecimiento y otra etapa en la que éste sea suspendido y se dé un descanso al terreno; durante los períodos de secado ocurre la descomposición de los materiales que se encuentran en exceso en el suelo y que pueden afectar a la infiltración, además tiene lugar la reareación del suelo que es importante para que se restablezcan las condiciones aerobias en él.

La magnitud de la carga hidráulica, la concentración de sólidos y las condiciones climatológicas son los factores que establecen la duración del período de secado. En el Cuadro 4.5 se presentan diferentes datos referentes a los ciclos de aplicación en sistemas de infiltración rápida.

#### 4.2.3.8 Regulación del flujo subterráneo y recuperación del agua renovada

Todo sistema de depuración de aguas negras por medio del suelo debe proporcionar la regulación del movimiento del agua a través del subsuelo y facilitar la recuperación del agua, una vez que ha sido renovada. En ocasiones el agua fluirá hasta alcanzar y recargar el nivel freático pero, cuando esto no sea posible las técnicas de recuperación del agua serán las de una red de drenaje, el bombeo para su extracción o la circulación natural hacia las aguas superficiales.

Si se pretende que el agua tratada drene hacia corrientes superficiales, debe tenerse un control de la profundidad a la que se encuentre el nivel de aguas freáticas, para que las aguas subterráneas no asciendan hasta la región de infiltración; esto implica que el acuífero debe tener la capacidad de transmitir lo más rápido posible, el agua tratada hacia la zona de infiltración.

Cuadro 4.5

| PERIODOS DE APLICACION EN SISTEMAS DE INFILTRACION RAPIDA |   |                      |                     |                                   |
|---|---|----------------------|---------------------|-----------------------------------|
| Localización y/o estación del año                         | Objetivo de la disposición                      | Tiempo de aplicación | Período de descarga | Tipo de terreno                   |
| Calumet, Michigan   | Obtener mayores tasas de infiltración           | 1 a 2 días           | 7-14 días           | Arena, sin limpiar <sup>(1)</sup> |
| Flushing Meadows, Arizona                                 |   |                      |                     |                                   |
| Infiltración máxima                                       | Aumentar la capacidad de adsorción del amoníaco | 2 días               | 5 días              | Arena con una capa vegetal        |
| Verano  | Elevar la eliminación de nitrógeno              | 2 semanas            | 10 días             | Arena con una capa vegetal        |
| Invierno  | Elevar la eliminación de nitrógeno              | 2 semanas            | 20 días             | Arena con una capa vegetal        |
| Fort Devens, Massachusetts                                | Maximizar las tasas de infiltración             | 2 días               | 14 días             | Hierba sin limpieza               |
|   | Maximizar la eliminación de nitrógeno           | 7 días               | 14 días             | Hierba sin limpieza               |
| Lake George, Nueva York                                   |   |                      |                     |                                   |
| Verano  | Aumentar las tasas de infiltración              | 9 horas              | 4-5 días            | Arena sin impurezas               |
| Invierno  | Aumentar las tasas de infiltración              | 9 horas              | 5-10 días           | Arena sin impurezas               |
| Tei Aviv, Israel  | Elevar la renovación del agua residual aplicada | 5-6 días             | 10-12 días          | Arena                             |
| Vineland, Nueva Jersey                                    | Maximizar las tasas de infiltración             | 1-2 días             | 7-10 días           | Arena con sólidos <sup>(2)</sup>  |
| Whittier Narrows, California                              | Maximizar las tasas de infiltración             | 9 horas              | 15 horas            | Gravilla                          |
| Westby, Wisconsin   | Aumentar al máximo las tasas de infiltración    | 2 semanas            | 2 semanas           | Con hierba                        |

(1) Limpiar el terreno consiste en eliminar físicamente los sólidos suspendidos

(2) En la superficie del suelo ocurre la mezcla de las partículas de éste y de los sólidos.

Fuente: Metcalf y Eddy. Ingeniería Sanitaria. Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales. Barcelona, España, 1985.

La diferencia de niveles requerida para que el agua freática no invada la zona de infiltración está dada por la siguiente expresión:

$$Wl = \frac{KDH}{L}$$

Donde:

W = Ancho de la zona de infiltración (m)

l = Carga hidráulica aplicada (m/día)

K = Conductividad hidráulica del acuífero (m/día)

D = Espesor medio de la región bajo el nivel freático perpendicular a la dirección de flujo (m)

H = Diferencia de cotas entre el nivel del agua en la corriente o cuerpo de agua superficial y el nivel de aguas freáticas máximo permisible, por debajo de la zona de infiltración, en metros

L = Distancia lateral del flujo (m)

Wl es la cantidad de agua aplicada por metro de longitud axial, para una sección determinada. Su importancia estriba en que es el factor que controla el tamaño del estanque o laguna de infiltración (Figura 4.3).

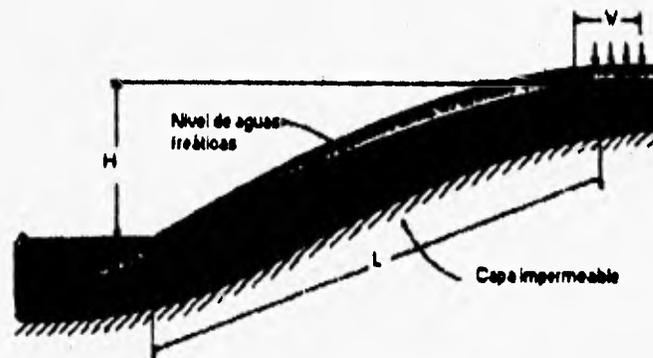


Figura 4.3 Drenaje natural del estanque de infiltración rápida hacia un cuerpo de agua superficial

En caso de que el volumen de agua por aplicar esté limitado por el agua subterránea, las cargas hidráulicas por aplicar pueden ser altas y el ancho del estanque puede reducirse.

Para el dimensionamiento de los estanques de infiltración es necesario considerar la superficie de terreno disponible, la carga hidráulica, la topografía, la posibilidad de operación y las características del agua subterránea. El sistema de infiltración debe estar compuesto por dos estanques: una laguna para inundación y una para secado, salvo que se disponga de una laguna para almacenamiento.

El drenaje del sistema debe permitir que se alcance el tiempo de retención necesario y que el agua fluya dentro del subsuelo una distancia tal que resulte suficiente para obtener la calidad esperada en el agua después de que se ha infiltrado a través del suelo.

El tiempo de retención y de transporte es determinado por la calidad del influente que se aplica, la tasa de aplicación, la capacidad de remoción de contaminantes del suelo y la permeabilidad de este medio; además de las características del acuífero.

No existen valores específicos para determinar la profundidad y el espaciamiento a los que deberán colocarse los drenes subterráneos de recuperación del agua infiltrada. Sin embargo, investigadores como Bouwer han desarrollado una ecuación para la determinación de la distancia a partir de la zona de infiltración, a la que deben ser colocados los drenes (Figura 4.4):

$$H_c^2 = H_d^2 + IW(W+2L)K$$

En la que:

$H_c$  = Altura del nivel freático por debajo del borde exterior de la zona de infiltración, en metros

$H_d$  = Altura del dren por arriba de la capa impermeable, en metros

$I$  = Tasa de infiltración, cm/día

$W$  = Ancho del estanque de infiltración, en metros

$L$  = Distancia del dren, en metros

$K$  = Conductividad hidráulica del suelo, cm/día

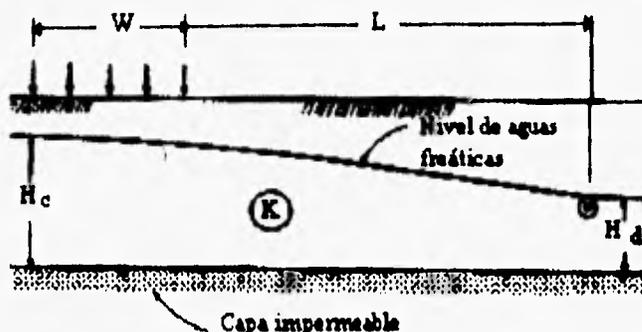


Figura 4.4 Recolección por drenes del agua renovada

Los materiales para las tuberías de recolección pueden ser concreto, plástico (PVC), aluminio, etc.; la utilización de uno u otro material está en función del precio y de su disponibilidad en la región. La colocación de los tubos se hace por medio de zanjas para cuya excavación se emplea maquinaria como retroexcavadoras. Las tuberías de concreto deben ser cubiertas con grava para que no penetren a ellas las arenas finas y los limos; si se trata de tuberías de plástico se pueden equipar con pequeños filtros de fibra de vidrio; éstos últimos no se requieren en suelos orgánicos, en limos y arcillas limosas. En la Figura 4.5 se presenta el drenaje para una zona de infiltración y en la Figura 4.6 pueden observarse algunos arreglos comunes de drenaje en suelos.

#### Pozos de recuperación

En los sistemas de infiltración rápida pueden utilizarse pozos para recobrar el agua que ha sido infiltrada. La recuperación se hace con objeto de reutilizar el agua depurada, con el fin de ejercer un cierto control del nivel de aguas freáticas, para aumentar la distancia necesaria para que ocurra la renovación y con ello incrementar también la eficiencia del sistema.

La posibilidad de recuperación del efluente es determinada por factores como: la profundidad del acuífero, el confinamiento del mismo y la permeabilidad de los estratos de suelo. Por consiguiente para lograr una recuperación satisfactoria del agua residual es necesario mantener el nivel de las aguas subterráneas por debajo de la zona de infiltración y poder retener el agua en las regiones próximas a los pozos de recolección.

De esta manera, deben tomarse en cuenta factores como el espaciamiento de los pozos, la profundidad, la forma en que se cierran y el gasto que puedan recobrar. Tales características dependen a su vez de la geología, del tipo de suelo, de las características del agua subterránea y de las cargas de aplicación del influente al sistema.

El estudio de las características del cono de depresión o abatimiento (por medio de pozos de observación y pruebas de bombeo) que se forma por el bombeo permite determinar la distancia a la que deben estar separados los pozos de recuperación.

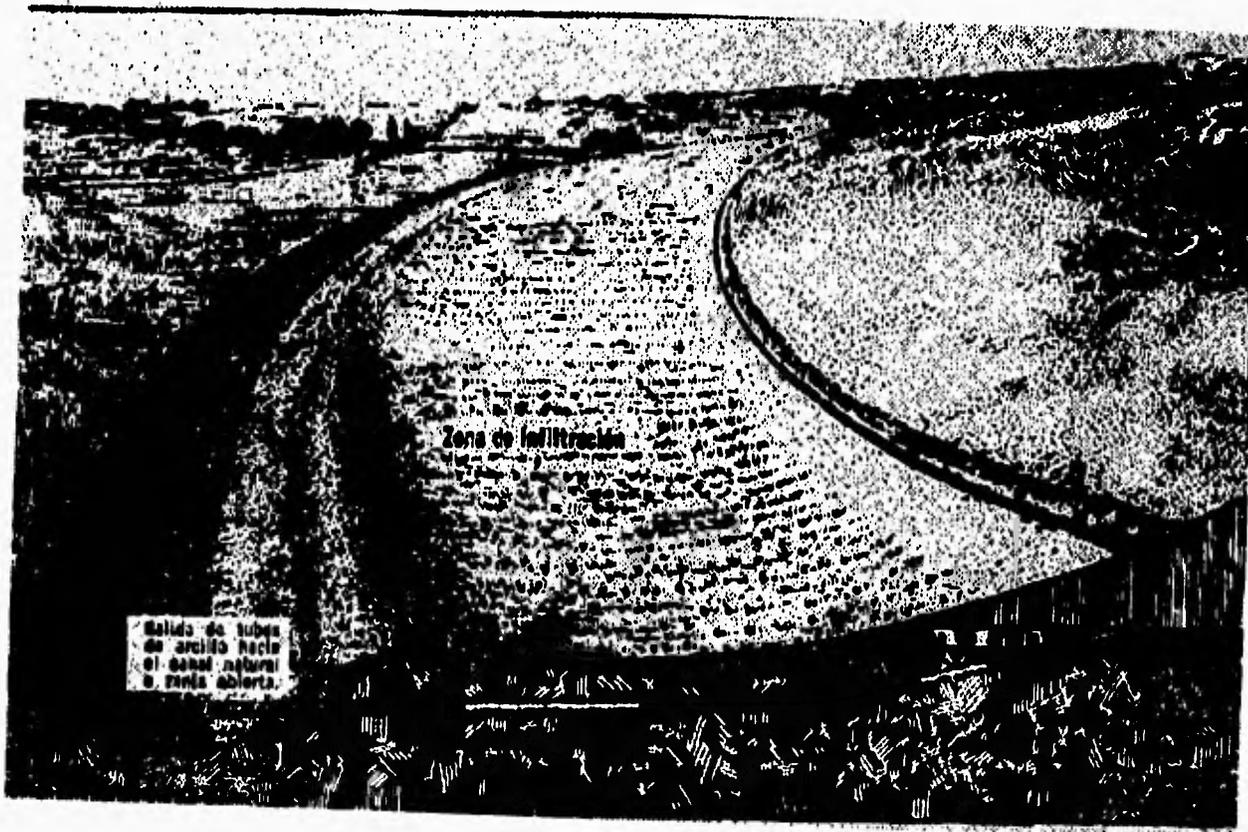


Figura 4.5 Drenaje en zonas de infiltración

#### 4.2.4 Características del proceso y calidad del efluente

En el Cuadro 4.6 se resumen datos respecto a las características del procedimiento de infiltración rápida y a la calidad esperada del efluente en tales sistemas.

**Cuadro 4.6**

| <b>CARACTERISTICAS DEL PROCESO DE INFILTRACION RAPIDA Y CALIDAD DEL EFLUENTE</b> |  |
|--|--|
| <b>Característica</b>  | <b>Valores típicos</b>   |
| Disposición del agua residual  | Superficial, por anegamiento del terreno   |
| Tasa anual de aplicación (m/año)   | 6 a 171  |
| Requerimientos de área (m <sup>2</sup> por l/s)                                  | 185 a 5 174  |
| Tasa semanal de aplicación (cm/semana)   | 10 a 305   |
| Tratamiento previo mínimo recomendado  | Sedimentación primaria   |
| Destino final del agua tratada   | Recuperación con drenes o percolación al acuífero  |
| Requerimientos de cubierta vegetal   | Opcional   |
| Pendiente del terreno  | No es un factor crítico; pendientes muy grandes requieren de mayor movimiento de tierras para construcción de bordos |
| Permeabilidad del suelo  | Alta (arenas o limos arenosos)   |
| Profundidad del nivel de aguas freáticas   | Al menos de 3 m. Se pueden aceptar menores profundidades si se cuenta con drenes subterráneos                        |
| Calidad del efluente   | Percolación de efluente primario o secundario a través de 4.5 m de suelo   |
| DBO (mg/l)   | Promedio: 2      Máxima: 5   |
| SST (mg/l)   | Promedio: 2      Máxima: 5   |
| N-NH <sub>3</sub>  | Promedio: 0.5      Máxima: 2   |
| NTK  | Promedio: 10      Máxima: 20   |
| P  | Promedio: 1      Máxima: 5   |

Fuente: CNA. Manual para la Selección de sistemas alternativos de tratamiento de las aguas residuales y lodos producidos. México, 1989.

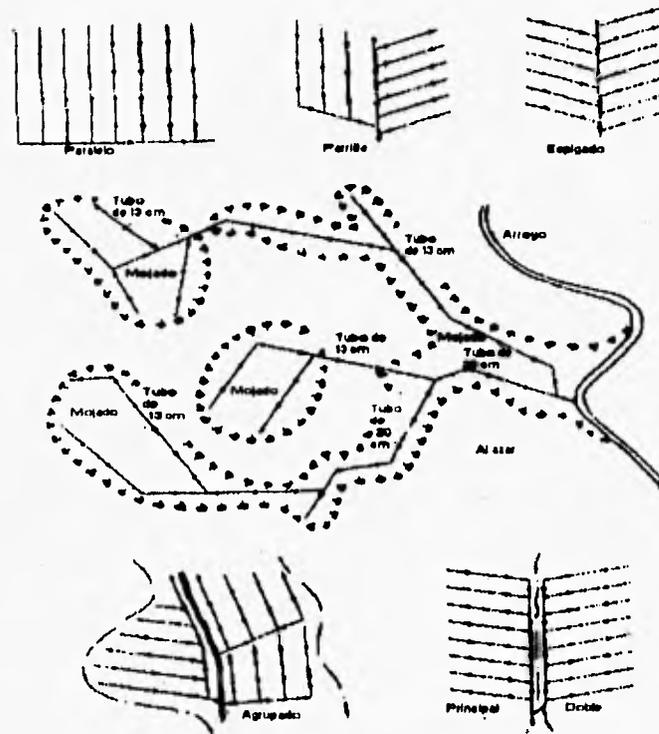


Figura 4.6 Distintos arreglos de drenaje en suelos

**4.3 Sistemas de infiltración lenta**

**4.3.1 Descripción general**

Los suelos con cultivos vegetales y con permeabilidad de baja a moderada, como suelos limosos o limo-arenosos son idóneos para la infiltración lenta como un método de tratamiento de aguas residuales. La aplicación del agua residual se efectúa por aspersión la mayor parte de las veces y en algunas ocasiones por escurrimiento superficial; es preferible el método de disposición por aspersión debido a que proporciona una distribución más uniforme del agua en el terreno, independientemente de su topografía.

La recolección del agua tratada puede llevarse a cabo en drenes subterráneos, captada por medio de canales o en su defecto, el agua puede percolarse a través del subsuelo. Es necesario procurar que exista una cubierta vegetal de la superficie del suelo que ayuda a mejorar la eficiencia del tratamiento.

Los mecanismos de remoción que participan en los procesos de infiltración lenta son:

- Filtración simple a través del suelo
- Precipitación química
- Adsorción química

- Intercambio iónico
- Oxidación biológica
- Captación de nutrientes por la vegetación

La selección de los cultivos dependerá de factores como:

- Capacidad de adaptabilidad del cultivo al tipo de suelo y a las condiciones climatológicas
- Uso consuntivo de la vegetación
- Tolerancia de los cultivos a los contaminantes presentes en las aguas residuales aplicadas
- Adsorción de nutrientes por las plantas
- Valor económico del cultivo
- Aspectos en materia de salud pública
- Duración de la temporada de crecimiento del cultivo

Los requerimientos de pretratamiento al agua residual por aplicar son: cribado, desarenación y sedimentación primaria, así como el control en la concentración de microorganismos patógenos dado que estos últimos representan un peligro para los posibles consumidores del cultivo.

#### 4.3.2 Aplicaciones del proceso

Pueden obtenerse efluentes de alta calidad de los sistemas de infiltración lenta; además de ello este método de tratamiento reporta atractivos como: la recuperación económica de los cultivos, la captación y aprovechamiento de los nutrientes por las plantas y la posible recuperación y reúso del agua si se tiene un sistema de drenes subterráneos.

#### 4.3.3 Eficiencia del proceso

La calidad del efluente es, comúnmente, excelente. Los valores de las eficiencias de remoción de contaminantes para estos sistemas se muestran a continuación:

- DBO y Sólidos Suspendidos Totales: 90 a 99%
- Nitrógeno total Kjeldhal (convertido biológicamente a nitritos y nitratos): 50 a 95%
- Fósforo total: (dependiendo de la capacidad adsorbsiva del suelo): 80 a 99%
- Coliformes fecales: 99.99%

|  |           |
|--|-----------|
| - DBO y Sólidos Suspendidos Totales  | 90 a 99 % |
| - Nitrógeno Total Kjeldhal (convertido biológicamente a nitritos y nitratos) | 50 a 95 % |
| - Fósforo Total (dependiendo de la capacidad de adsorción del suelo)         | 80 a 99 % |
| - Coliformes fecales   | 99.99 %   |

4.3.4 Criterios de diseño

A continuación se enlistan los principales factores que deben considerarse para el diseño de sistemas de infiltración lenta:

**Carga Hidráulica.** 0.6 a 6 m/año, equivalentes a requerimientos de terreno de 5 000 a 50 000 m<sup>2</sup> por l/s de gasto medio.

**Carga Orgánica.** 0.02 a 0.56 g DBO/m<sup>2</sup>-día. Para un influente con 50 mg/l de DBO esta restricción de carga orgánica representa requerimientos de terreno del orden de 7 500 hasta 190 000 m<sup>2</sup> por cada l/s de gasto medio.

**Permeabilidad del suelo.** 0.15 a 5 cm/h

4.3.5 Características del proceso y calidad del efluente

En el Cuadro 4.7 se resumen las principales características del proceso de infiltración lenta y de la calidad del efluente esperada.

Cuadro 4.7

| CARACTERISTICAS DEL PROCESO DE INFILTRACION LENTA Y CALIDAD DEL EFLUENTE |  |
|--|--|
| Característica   | Valor típico   |
| Disposición del agua en el emplazamiento                                 | 1. Aspersores<br>2. Superficial: Mediante canales abiertos con compuertas.<br>Empleando tuberías con orificios o válvulas. |
| Tasa anual de aplicación (m/año)   | 0.6 a 6.1  |
| Requerimientos de área (m <sup>2</sup> por l/s)                          | 5 174 a 51 742   |
| Tasa semanal de aplicación (cm/sem)                                      | 1.27 a 10.16   |
| Nivel de tratamiento previo sugerido                                     | Cribado  |
| Destino final del agua tratada   | Evapotranspiración y recuperación con drenes o percolación al acuífero   |
| Necesidades de cubierta vegetal  | Debe existir la cubierta vegetal   |
| Pendiente del terreno  | Menos de 2% en terrenos cultivados<br>Menos de 4% en terrenos no cultivados  |
| Permeabilidad del suelo  | Moderada   |
| Profundidad del nivel freático   | Mínima: 0.6 a 1 m  |
| Calidad del efluente   | Percolación de efluente primario o secundario a través de 1.5 m de suelo   |
| DBO  | Promedio: 2 Máxima: 5  |
| SST  | Promedio: 1 Máxima: 5  |
| N-NH3  | Promedio: 0.5 Máxima: 2  |
| NTK  | Promedio: 3 Máxima: 8  |
| P  | Promedio: 0.1 Máxima: 0.3  |

Fuente: CNA. Manual para la selección de sistemas alternativos de tratamiento de aguas residuales y lodos producidos. México, 1989.

---

## **5. SISTEMAS DE ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL**

---

## CAPITULO 5

### SISTEMAS DE ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL

#### 5.1 Generalidades

Los sistemas de escurrimiento superficial, también conocidos como sistemas de circulación superficial en lámina, se caracterizan porque el agua residual es aplicada en la parte superior de terrenos inclinados o terrazas dispuestas para éste fin; tales terrenos son poco permeables y generalmente cuentan con una cubierta vegetal. Se permite el escurrimiento del agua residual a través del terreno y se recolecta por medio de canales o zanjas.

La remoción de los contaminantes tiene lugar gracias al efecto combinado de procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en la lámina de agua que se encuentra en contacto con el suelo, la vegetación y los microorganismos. Los principales mecanismos de remoción que ocurren en este tipo de sistemas son: la filtración simple del agua, la nitrificación biológica, adsorción de nutrientes por las plantas; inactivación de microorganismos patógenos por la luz solar, intercambios iónicos con el suelo y bioxidación.

La técnica del escurrimiento sobre el terreno no es un simple sistema de vertido sino que implica la recolección una vez que el agua ha fluído a través del suelo; es aplicable a suelos poco permeables y puede utilizarse como un proceso de tratamiento terciario, cuando su objetivo es mejorar la calidad de los efluentes tratados hasta un nivel secundario.

El terreno debe cubrirse con árboles o plantas (como henos de forrajes) con la finalidad de disminuir el riesgo de erosión y ayudar a la eliminación de nutrientes; la percolación que se puede producir es por lo general, poco significativa debido a la naturaleza impermeable del terreno seleccionado. Es necesario efectuar la preparación del terreno pues se precisa nivelarlo e igualarlo, con el fin de evitar la formación de pequeños canales y de puntos bajos que interfieran en el escurrimiento del agua a través de las terrazas.

El agua residual suele aplicarse mediante boquillas rociadoras que la distribuyen sobre la superficie del terreno. La pendiente del terreno depende de la carga hidráulica aplicada, siendo el tiempo de retención un factor importante para lograr un tratamiento completo; la velocidad de circulación debe ser baja para evitar la erosión. La pendiente no puede ser muy reducida, pues esto puede ocasionar que se desarrollen condiciones anaerobias, si ocurre el almacenamiento del agua. Pueden aplicarse hasta 175 mm/semana y con etapas de descanso de 16 a 18 horas por cada 6 a 8 horas de funcionamiento.

Es recomendable que el agua residual dispuesta sobre las terrazas recorra al menos un distancia de 90 metros, para que a lo largo de este trayecto ocurra el tratamiento; sin embargo tal longitud dependerá de las características del agua vertida, de las propiedades del terreno, de la cubierta vegetal y de los microorganismos presentes en el suelo. En las Figuras 5.1 y 5.2 pueden observarse las principales características de los sistemas de aplicación superficial.

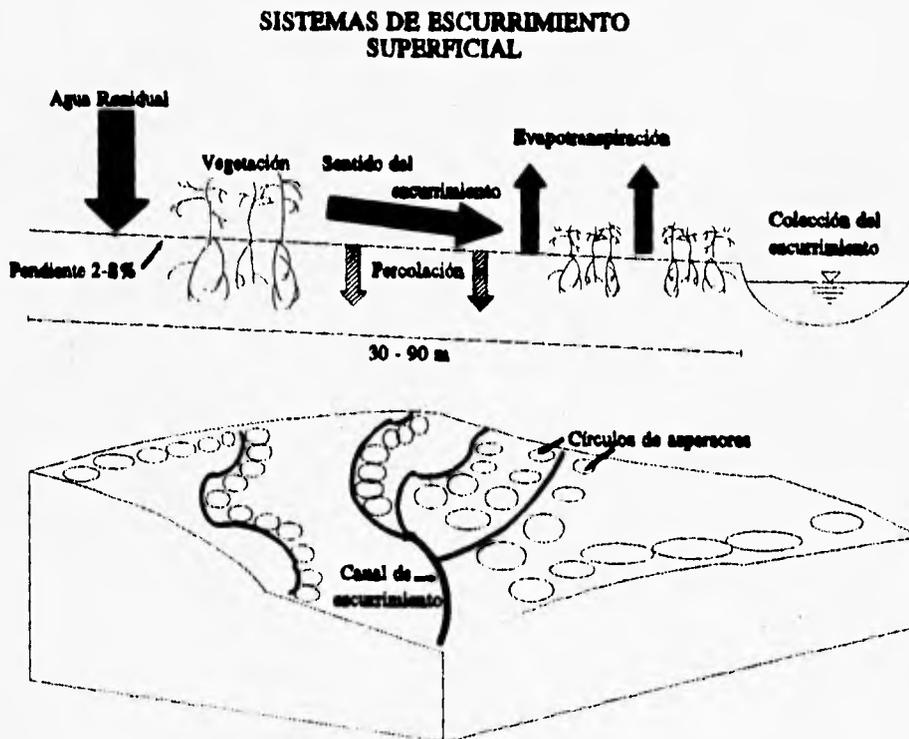
**5.2 Objetivos de diseño**

El principal objetivo del riego por escurrimiento superficial en lámina es el tratamiento del agua residual aplicada sobre las terrazas. Un objetivo secundario es la producción agrícola; entre los cultivos recomendados se encuentran forrajes, cultivos perennes, tolerantes a altas humedades en el suelo y con raíces profundas.

**5.3 Criterios de aplicación**

La disposición del agua residual debe cumplir con los siguientes puntos:

- a) Evitar encharcamientos en el suelo ya que pueden provocar condiciones insalubres.
- b) Impedir que se presenten condiciones anaerobias en el agua.
- c) Mantener o conservar la humedad suficiente para que sobrevivan los microorganismos en la superficie del suelo.



**Figura 5.1 Sistemas de escurrimiento superficial**

La aplicación del agua puede efectuarse mediante canales abiertos con compuertas o tuberías con válvulas u orificios. En algunos casos, de acuerdo con la geometría del sistema, puede requerirse construir planchas de concreto o mampostería con estructuras de disipación de energía del agua y a su vez como un medio de distribución de la misma sobre el terreno.

Generalmente el agua recorre distancias entre 30 y 60 m, pero son recomendables recorridos al menos de 90 m, por lo explicado anteriormente, el empleo de terrazas es común en terrenos extensos. La determinación de la pendiente adecuada del terreno debe ser estudiada cuidadosamente, dado que si es muy pequeña puede provocar encharcamientos y si es muy grande, ocasiona erosión.

#### 5.4 Elección del emplazamiento

Para este tipo de sistemas son útiles suelos con baja permeabilidad, como pueden ser arcillas y limos arcillosos. Las pendientes pueden considerarse en rangos de 2 a 8% y se debe contar con superficies suficientemente lisas para permitir el escurrimiento del agua residual. En caso de utilizarse pendientes mayores al 8%, pueden ocurrir: problemas de erosión; ser necesarias longitudes mayores para lograr la depuración esperada y presentar dificultades al utilizar maquinaria para la labranza. Es recomendable sembrar pasto en el terreno, para que en él puedan subsistir los microorganismos que llevan a cabo la degradación de la materia orgánica presente en el agua residual aplicada; debe preverse la construcción de obras para desalojar las excedencias, como puede ser un canal de demasías.

Debido a la baja permeabilidad de los suelos utilizados en este tipo de sistemas, el peligro de la contaminación de las aguas subterráneas es reducido, pero a pesar de esto, es recomendable que el nivel de aguas freáticas tenga una profundidad de al menos 60 cm; de manera tal que no se encuentre saturada la región de las raíces de las plantas.

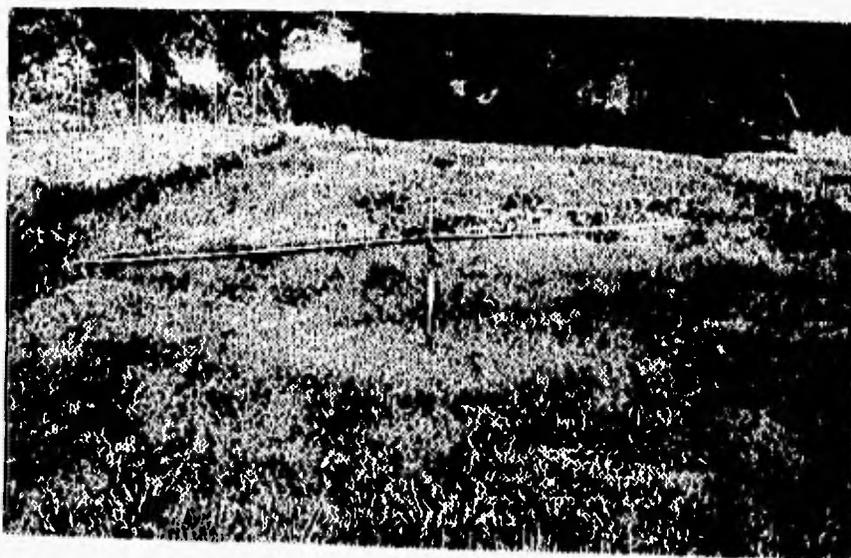


Figura 5.2 Aplicación por circulación superficial en lámina

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

### 5.5 Nivel de tratamiento previo a la aplicación

El proceso de flujo superficial se caracteriza por su alta eficiencia en la remoción de la materia orgánica y nitrógeno; por lo general se emplea para remover estos compuestos en aguas residuales tratadas a nivel secundario y también puede emplearse (con reservas) cuando se disponen aguas residuales crudas, es decir, sin tratamiento previo.

A pesar de que es posible aplicar aguas residuales crudas a las que se les haya sometido a un cribado de sólidos gruesos, esto es poco recomendable, pues se requiere una superficie de terreno mucho mayor para lograr una depuración aceptable de las aguas de desecho; las demandas de terreno se pueden reducir si las aguas reciben un tratamiento biológico convencional previo. En caso de utilizar el sistema de escurrimiento superficial como un medio de tratamiento secundario la depuración mínima recomendable es el desbaste, desarenado y eliminación de grasas, logrando con ello evitar la saturación u obturación de los sistemas de distribución. No es recomendable el cultivo de productos comestibles y pueden utilizarse aspersores para la aplicación del agua en las terrazas.

Cuando el escurrimiento superficial en lámina se emplea como un proceso de tratamiento avanzado es recomendable un tratamiento previo en lagunas. También puede efectuarse una desinfección de las aguas antes de aplicarlas en el terreno, lo que permitiría que ya no fuera necesaria una desinfección posterior y puede hacer factible la aspersión sin el peligro de la generación de neblinas con contaminantes, disminuyendo a su vez el riesgo que representan los microorganismos patógenos presentes en las aguas residuales.

### 5.6 Condiciones climatológicas y características de almacenamiento

Los sistemas de depuración de aguas residuales por escurrimiento superficial en lámina son más eficientes en climas cálidos y relativamente secos. Este tipo de tratamiento sufre alteraciones negativas debido al clima frío; en las regiones en las que en el invierno las temperaturas son muy bajas, debe almacenarse el agua residual durante esta época del año. En el invierno la eficiencia de remoción de contaminantes de este tipo de procesos se reduce significativamente, debido a que disminuye la actividad biológica y la asimilación de los contaminantes por los cultivos.

Durante la época de lluvias deben disminuirse las cargas de aplicación del agua residual, además de que los tiempos de secado pueden resultar más largos.

Los requerimientos de almacenamiento para este tipo de sistemas se presentan para épocas de invierno, en donde la temperatura baje considerablemente, lo que ocurre en pocos lugares de México. Durante la época de lluvia es necesario efectuar el almacenamiento del agua residual, pues el agua pluvial incrementa el volumen de agua que escurre por el terreno; en caso de no contar con terrenos para el almacenaje del agua residual, deben reducirse las tasas de aplicación de las mismas.

### 5.7 Eficiencias del proceso de tratamiento

Los sistemas de escurrimiento superficial en lámina reportan altas eficiencias de remoción de contaminantes. Para el caso de aguas residuales de origen municipal se tienen los datos que

se presentan en el Cuadro 5.1

**Cuadro 5.1**

| <b>EFICIENCIAS DE REMOCION EN LOS PROCESOS DE ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL</b> |                                   |
|---|-----------------------------------|
| <b>Parámetro</b>  | <b>Eficiencia de remoción (%)</b> |
| DBO   | 80 a 95                           |
| DQO   | 80                                |
| Sólidos suspendidos   | 80 a 95                           |
| Nitrógeno total   | 70 a 90                           |
| Fósforo total   | 40 a 80                           |
| Metales   | 50                                |
| Microorganismos   | 98                                |
| Sólidos disueltos   | 30                                |
| Coliformes fecales  | 90 a 99                           |

Fuente: 'Land Treatment of Municipal Wastewater Effluents'. G. Moran Powell, Denver, U.S.A., 1975.

**5.8 Cargas de aplicación**

Las tasas de aplicación de cargas como la hidráulica y la orgánica en los sistemas de escurrimiento superficial son de particular importancia pues determinan las condiciones de diseño.

**5.7.1 Carga hidráulica.** Los valores para la carga hidráulica se encuentran en un rango entre 0.8 y 1.8 cm/d para agua residual cruda o con un tratamiento primario y en un intervalo de 2.1 a 5.7 cm/día para aguas con tratamiento previo a nivel secundario. La determinación del escurrimiento se lleva a cabo mediante un balance de agua como el siguiente:

$$\text{PRECIPITACION DE PROYECTO} + \text{AGUA RESIDUAL APLICADA} = \text{EVAPO-TRANSPIRACION} + \text{PERCOLACION} + \text{ESCURRIMIENTO}$$

Los valores de la precipitación y de la evapotranspiración de proyecto se determinan de la misma manera que en el caso de los sistemas de riego, es decir, el valor de la precipitación de proyecto se calcula elaborando un análisis de frecuencias de los años más húmedos de lo normal, siendo común utilizar el valor del año que haya presentado una mayor precipitación en un período de 10 años, aunque siempre es recomendable emplear el intervalo más largo del que pueda disponerse. La precipitación anual de proyecto puede determinarse aplicando la distribución media de las precipitaciones mensuales registradas; la evapotranspiración es un valor que fluctúa mes con mes, pero por lo general, es aproximadamente constante año con año. Respecto a las pérdidas por percolación sus valores serán menores o iguales a 0.25 cm/día, para determinar las condiciones de percolación se deben realizar los estudios con la mayor saturación posible del suelo.

Una vez que se han determinado los elementos de la ecuación de balance de agua anteriormente presentada, es posible despejar de ella el escurrimiento; comúnmente los intervalos de variación para éste varían desde el 40% en verano, hasta el 80% en invierno del agua residual más la precipitación que ha sido aplicada.

**5.7.2 Carga Orgánica.** A pesar de que aún no se han definido intervalos exactos de carga orgánica por aplicar en sistemas de escurrimiento superficial en lámina, se cuenta con experiencias que permiten tomar valores a partir de ellas. Tal es el caso del sistema de Melbourne, Australia el cual recibe una carga de 76.2 kg/ha.día de DBO<sub>5</sub> y se obtiene una eficiencia de remoción del 96%. Se han registrado también eficiencias de depuración que oscilan entre el 92 y el 95% para cargas de 15.7 a 20.20 kg/ha.día, esto permite hacer una estimación de que pueden llegar a aplicarse cargas orgánicas del orden de 20 kg/ha.día

La materia orgánica que se adhiere al disponer las aguas residuales sobre el terreno sufre oxidación biológica al filtrarse a través de la capa vegetal superficial, debido a esto, el contenido natural de materia orgánica del suelo no se ve incrementado de manera considerable; a pesar de lo cual, deben limitarse las cargas orgánicas de manera que no sean muy altas dado que una excesiva tasa de aplicación de materia orgánica puede disminuir la eficiencia de tratamiento e inclusive llegar a producir condiciones anaerobias en el suelo.

Respecto a los períodos de aplicación y de descanso que deben proporcionarse al terreno, se sabe que es factible un período de 6 a 8 horas de aplicación y de 16 a 18 horas de descanso; sin embargo, experiencias en sistemas de flujo superficial en lámina en Australia reportan que se han obtenido aceptables eficiencias de remoción de materia orgánica para períodos hasta de 6 meses continuos de aplicación seguidos con 6 meses de reposo para el terreno; cabe mencionar que la duración de las etapas de descanso estará en función de factores tales como el clima, las características y condiciones en que se encuentren las zanjas del sistema de recolección, además de la factibilidad del almacenaje.

**5.8.3 Tasas de aplicación de nitrógeno.** El proceso de nitrificación - desnitrificación y la asimilación de nitrógeno por los cultivos son las principales mecanismos de degradación de este elemento para los sistemas en estudio. Se forma una capa aerobia-anaerobia entre la lámina de agua, la materia orgánica y el suelo saturado subyacente a dicha lámina o película de agua residual, en la cual tienen lugar los fenómenos de nitrificación y desnitrificación.

**5.8.4 Cargas de aplicación de fósforo y metales.** La eliminación de fósforo en los sistemas de escurrimiento superficial es muy reducida debido a que la infiltración del agua residual a través de las capas de suelo también resulta estar limitada y sólo ocurre en las capas superficiales, obedeciendo ello a la naturaleza impermeable de los suelos empleados para este tipo de sistemas; al ser tan baja la permeabilidad del suelo, el agua residual tiene poco contacto con los componentes de hierro y aluminio presentes en el suelo, los que por lo general fijan mayores cantidades de fósforo; el tiempo de retención del agua aplicada sobre el terreno es menor a 24 horas, es decir que es reducido, lo que también dificulta la degradación de este elemento. A pesar de esto, se presenta una remoción de fósforo en la capa orgánica superficial del terreno, la cual puede ser escarificada periódicamente intentando con ello una mayor fijación de fósforo en el suelo de tipo arcilloso. Atendiendo a esto, se recomienda que el contenido de fósforo de las aguas residuales por aplicar sea relativamente bajo, menor a 10 mg/l.

Para el caso de metales pesados se han logrado eficiencias de remoción mayores al 90%, tal degradación ocurre en la capa vegetal superficial.

### 5.9 Superficie de terreno requerida

Para cargas hidráulicas del orden de 3.3 a 9.8 m/año se requieren terrenos de 3 200 a 9 240 m<sup>2</sup> por cada l/s de gasto medio.

Para un influente con 150 mg/l de DBO<sub>5</sub>, son necesarios de 2 300 a 23 000 m<sup>2</sup> por cada l/s de gasto medio. Así por ejemplo, la superficie necesaria para un sistema de circulación superficial en lámina de 0.044 m<sup>3</sup>/s puede ir desde 10 ha hasta 45 ha. En caso de requerir almacenamiento en lagunas, el área que se precisa para el funcionamiento adecuado del sistema, se incrementará en función de los requerimientos de almacenaje.

Un resumen de las principales características del proceso y de la calidad del influente se presenta en el Cuadro 5.2

### 5.10 Características de las terrazas en que se aplica el agua residual

Entre las características deseables de las terrazas (también denominadas bancales) a lo largo de las cuales se pretende permitir el escurrimiento del agua residual se tienen las siguientes:

- Pendientes uniformes, entre 2 y 6% sin que existan depresiones, huecos u ondonadas.
- La superficie de las terrazas debe ser lo más lisa posible, para permitir el flujo del agua residual en una delgada lámina.

De acuerdo con experiencias en el sistema de tratamiento por escurrimiento superficial de Paris, Texas, en donde se tratan aguas residuales industriales con bancales cuya longitud es de 53.3 m. Para aguas residuales domésticas se precisan al menos entre 36 y 46 metros de longitud que debe recorrer el agua aplicada para que pueda ocurrir su eficiente remoción.

### 5.11 Selección de la vegetación

La importancia de la capa vegetal que se encuentra sobre las terrazas radica en que tal cubierta es el hábitat en el que subsisten los microorganismos que llevan a cabo la oxidación de la materia orgánica. Además de ello, evita la erosión del suelo y capta concentraciones considerables de nutrientes que se encuentran presentes en el agua residual.

Entre los tipos de pastos más recomendables para sistemas de flujo superficial se encuentran: pastos de caña de las Canarias (nombre científico Phalaris), festuca (festuca arundinacea), trébol, pastos de centeno italiano (Lolium multiflorum).

Cuadro 5.2

| SISTEMAS DE ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL<br>CARACTERISTICAS DEL PROCESO Y CALIDAD DEL INFLUENTE                                       |   |
|--|---|
| Técnica de aplicación del agua residual  | Mediante aspersión o de manera superficial con el uso de canales con compuertas, tuberías con orificios o con válvulas                          |
| Tasa anual de aplicación (m/año)   | 3.1 a 21.4  |
| Necesidades de área (m <sup>2</sup> por l/s)   | 1 478 a 10 164  |
| Tasa semanal de aplicación (cm/semana)   | Aguas crudas: 6.35 a 15.24  |
|  | Efluente secundario: 15.24 a 40.64  |
| Carga hidráulica<br>Requerimientos de terreno  | 3.3 a 9.8 m/año<br>3200 a 9240 m <sup>2</sup> por l/s   |
| Carga orgánica<br>Requerimientos de terreno  | 0.56 a 5.6 g de DBO, por m <sup>2</sup> /día, para influente con 150 mg/l de DBO,<br>De 2300 a 23000 m <sup>2</sup> por cada l/s de gasto medio |
| Tratamiento previo mínimo recomendado  | Pretratamiento (cribado y desarenación)   |
| Destino final del agua tratada   | Escorrimento superficial, evapotranspiración, percolación al acuífero y captación del agua tratada en zanjas de recolección                     |
| Cubierta vegetal   | Es necesaria su existencia  |
| Pendiente del suelo o de las terrazas (bancales)   | 2 a 8 %   |
| Permeabilidad del suelo  | Baja, menor a 0.5 cm/año  |
| Profundidad del nivel de aguas freáticas   | No es un factor de importancia para este tipo de sistemas   |
| Calidad del efluente, para un escurrimiento de aguas municipales con pretratamiento a lo largo de una distancia de 45 m de terreno |   |
| DBO <sup>5</sup>   | Promedio: 10 mg/l Máxima: 15 mg/l   |
| SST  | Promedio: 10 mg/l Máxima: 20 mg/l   |
| N-NH <sub>3</sub>  | Promedio: 0.8 mg/l Máxima: 2 mg/l   |
| NTK (Nitrógeno total Kjeldhal)   | Promedio: 3 mg/l Máxima: 5 mg/l   |
| P  | Promedio: 4 mg/l Máxima: 6 mg/l   |
| Régimen hidráulico de aplicación   | 6 a 8 horas de aplicación y 16 a 18 horas de descanso, de 5 a 6 días por semana   |
| Recuperación del agua en canales colectores  | 40 a 80% del agua aplicada, dependiendo de la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y tipo de cultivos                            |

Fuente: CNA. Manual para la selección de sistemas alternativos de tratamiento de aguas residuales y lodos producidos. México, 1989.

Como anteriormente se explicó en el Capítulo 3 del presente trabajo, las características más importantes que deben reunir los cultivos para poder emplearse en este tipo de sistemas, son:

- La capacidad de eliminación del nitrógeno
- Las necesidades de agua por parte del cultivo
- Tolerancia del tipo de cubierta vegetal a las aguas residuales
- Cumplir con las Normas Sanitarias vigentes

### 5.12 Técnicas de distribución

Los principales procedimientos para la aplicación del agua residual en los sistemas de escurrimiento superficial son la aspersión y la inundación superficial.

Para seleccionar el procedimiento de distribución más conveniente deben considerarse factores tales como: la topografía, los sólidos suspendidos presentes en el agua residual, los métodos agrícolas utilizados, además de cuestiones económicas.

**5.12.1 Aplicación por aspersión.** El riego por aspersión se ejecuta en las partes superiores de los bancales y posteriormente escurre por la pendiente de la terraza o bancal; los aspersores pueden ser de tipo fijo o giratorios, no es recomendable utilizar equipos de aspersión portátiles debido a que el movimiento para su colocación puede hacer que la superficie de la terraza no sea tan lisa como se requiere para el flujo continuo del agua residual.

El espaciamiento entre aspersores oscila entre 18 y 25 m, dependiendo de los requerimientos de cultivo del tipo de vegetación presente en la parte superior de las terrazas.

**5.12.2 Disposición superficial.** Para este fin se hace uso de tuberías ranuradas ubicadas en la parte superior de las terrazas, como se muestra en la Figura 5.3. Debe evitarse que ocurra sedimentación dado que si existen concentraciones elevadas de sólidos suspendidos en las aguas residuales pueden presentarse estados anaerobios que a su vez provocan malos olores, entre otros efectos no deseables.

El sistema de recolección del flujo para procesos de tratamiento por circulación superficial se diseña para el escurrimiento del efluente tratado y no para la infiltración y percolación. La cantidad de agua que fluye por la ladera del terreno varía en rangos del 40 al 80% del caudal aplicado; el volumen restante se pierde por infiltración y evapotranspiración.

La recolección se efectúa en zanjas colocadas en el extremo final de las terrazas, posteriormente se conduce por canales o tuberías que trabajan por gravedad hasta que alcanzan el sitio de su vertido, control y/o desinfección. La disposición final del efluente puede hacerse en cuerpos o corrientes de agua superficiales, formar parte de sistemas de tratamiento más avanzados o para su reúso en otras zonas agrícolas, recarga de acuíferos, empleo del agua tratada en la industria, etc.

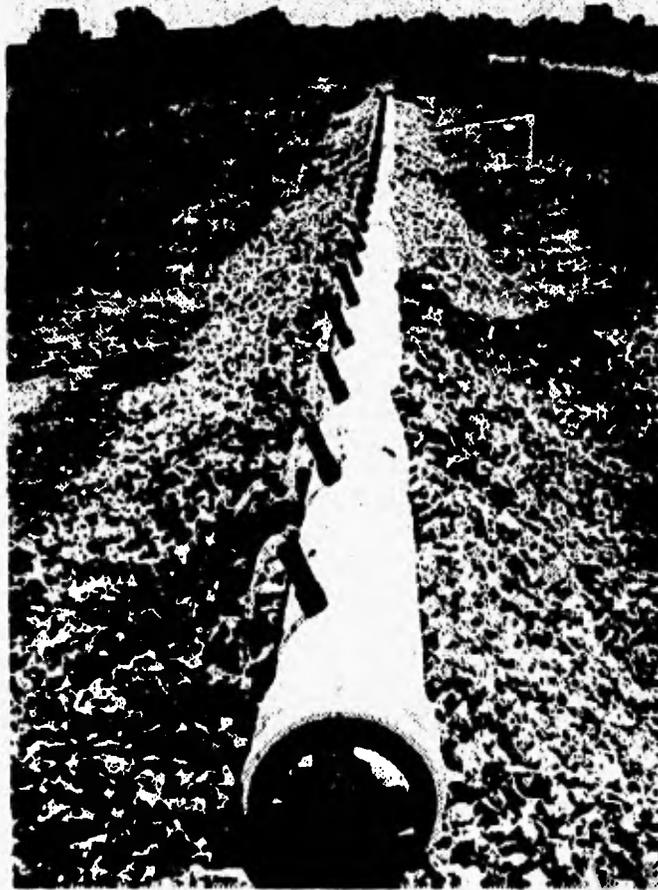


Figura 5.3 Tubería perforada para la aplicación en terrazas

En los sistemas en los que se aplica el agua residual en terrazas preparadas para su escurrimiento o circulación, es de particular importancia la lámina de escurrimiento producida por la precipitación pluvial; el funcionamiento del sistema no se altera si la precipitación es ligera, es decir, si alcanza láminas del orden de 0.13 a 0.25 cm/hora. Cuando el agua de lluvia se mezcla con el agua residual ocurre una dilución que puede disminuir la concentración de contaminantes en el agua aplicada e incrementar con ello su calidad; pero por otra parte, una lluvia muy intensa puede provocar un aumento en la erosión del suelo de la terraza, lo cual resulta perjudicial para el procedimiento de depuración.

---

## **6. SISTEMAS DE APLICACION DE LODOS**

---

## CAPITULO 6

### SISTEMAS DE APLICACION DE LODOS

#### 6.1 Características de los lodos

Los procesos de tratamiento de aguas residuales traen consigo la producción de lodos, esto se debe a que se obtiene una cierta cantidad de partículas sólidas sedimentables en las que se encuentran elementos minerales inertes y materia orgánica fermentable, sobre las cuales se absorben sales minerales y algunos microorganismos tales como: bacterias, virus y parásitos, que están contenidos en las aguas domésticas de desecho; estas sustancias se separan del agua y forman un lodo con un contenido alto de agua, biológicamente inestable en el que aún se encuentra presente una parte importante de la concentración inicial de contaminantes; ante esto se formula la interrogante sobre la disposición que puede y debe darse a los lodos. Es posible dejarlos secar en terrenos que forman parte de la planta de tratamiento, pero esto resulta poco factible cuando el costo del terreno es muy elevado. Sin embargo, los lodos contienen materia orgánica y nutrientes como el nitrógeno y el fósforo en cantidades suficientes para ser utilizados como fertilizantes agrícolas en estado natural, previo tratamiento.

Hasta este momento se han citado ventajas y aspectos positivos de la aplicación al terreno con propósitos de mejoramiento agrícola; no obstante, se pueden presentar obstáculos como los siguientes:

- Riesgo de que las plantas sufran contaminación bacteriana o parasitaria
- Efectos nocivos para la vegetación inducidos por la presencia de algunos componentes de los lodos, como pueden ser productos de origen doméstico y aguas residuales industriales que indebidamente se hayan desechado al alcantarillado municipal
- La posibilidad de que los agricultores no accedan a utilizar lodos en sus cultivos

##### 6.1.1 Origen de los lodos

Los lodos se producen en las unidades de pretratamiento, en las de tratamiento mecánico y biológico de las plantas de depuración de las aguas negras.

En el pretratamiento los lodos se obtienen al efectuarse el cribado a través de las rejillas; en el proceso de separación del aceite en el que se lleva a cabo la desnatación de las aguas residuales, además del desarenado en que también se originan lodos. En los procesos de tratamiento de aguas residuales por métodos mecánicos también tiene lugar la existencia y generación de lodos, esto ocurre en unidades como son sedimentadores primarios y secundarios,

así como en unidades de filtración; de igual manera se producen lodos en unidades de tratamiento biológico, en las que se consume la materia orgánica contenida en las aguas residuales y algunos nutrientes como nitrógeno y fósforo, debido a la acción de los microorganismos y comúnmente en presencia de oxígeno; es posible citar entre tales unidades a los tanques de aereación mediante procesos de lodos activados, en los que una parte de los lodos son recirculados con la finalidad de conservar la cantidad de microorganismos que realizan la remoción de contaminantes en las aguas residuales; el resto de los lodos se extrae y somete a otro proceso de tratamiento o se lleva al sitio de su disposición final.

Los lechos bacterianos y los biodiscos, son otros ejemplos de procedimientos de remoción en los que ocurre la producción de lodos y en los que, de una manera similar a los procesos de lodos activados, una parte de los lodos se recircula y otra se lleva a unidades de tratamiento de lodos como pueden ser espesadores o mecanismos de deshidratación; en las lagunas, que son estanques en donde la materia orgánica y las sustancias nutrientes se consumen por microorganismos y algas a través del proceso de fotosíntesis, también se producen lodos pero, por lo general en cantidades menores; cuando se trata de lagunas facultativas y anaerobias la generación de lodos puede ser más elevada. Asimismo los lodos se originan en unidades de tratamiento anaerobio como el tanque Imhoff, así como en tanques sépticos en los que los lodos se mantienen en el receptáculo y deben evacuarse una vez al año. De igual manera, en tratamientos de tipo fisicoquímicos se producen lodos; ejemplos de este tipo de procedimientos son: la floculación, la flotación y la electroflotación. Algunas de las características de los lodos producidos en plantas de tratamiento se enuncian en el Cuadro 6.1, en la Figuras 6.1 se presenta un diagrama de generación, tratamiento y disposición de lodos.

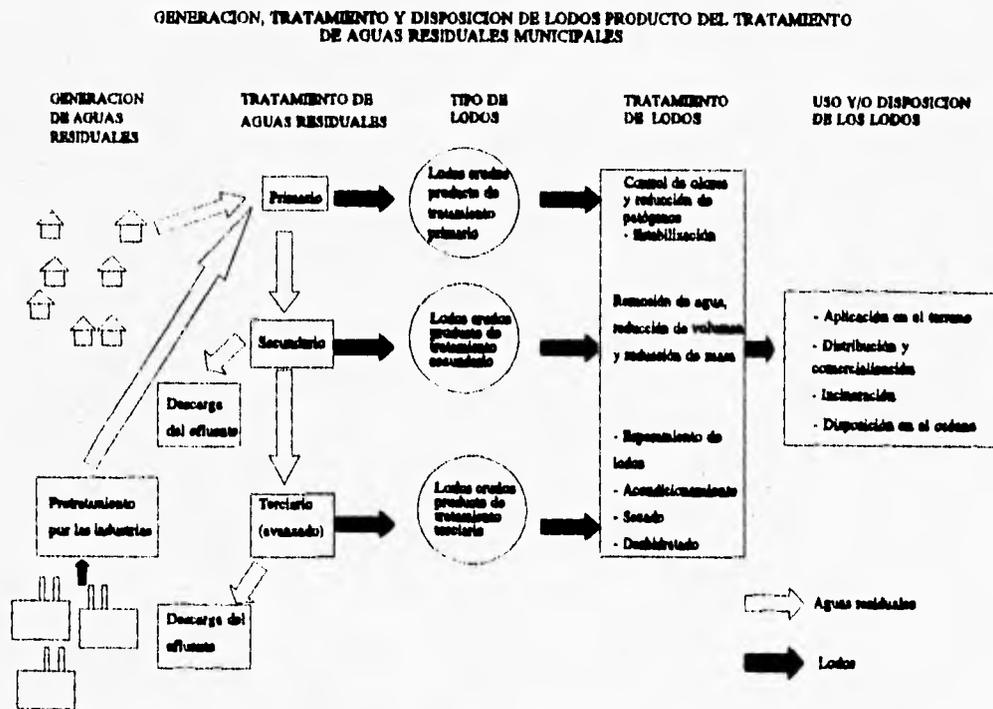


Figura 6.1 Diagrama de generación, tratamiento y disposición de lodos

### 6.1.2 Propiedades de los lodos

Los lodos que hayan sido resultado de un tratamiento de aguas residuales a nivel primario o secundario, se presentan como un líquido con partículas sólidas suspendidas heterogéneas, representando un volumen del 0.05 al 0.5 % del volumen del agua tratada para los lodos frescos y un poco menor para lodos activados. La floculación del agua (proceso mediante el cual una sustancia que se encuentra dispersa coloidalmente se separa del líquido que la contiene en forma de partículas discretas y no como masa continua) incrementa el volumen de lodos producidos y su peso aproximadamente en un 10%; el color de los lodos se encuentra entre el pardo y el gris, además de que su olor es desagradable debido a que contiene productos fermentables.

Cuadro 6.1

| LODOS COMUNES DEL AGUA Y DE LAS AGUAS DE DESECHO                     |  |  |
|--|--|--|
| Lodo   | Porcentaje de concentración de sólidos | Características  |
| Primario crudo   | 4-8                                    | Mal olor, color pardo grisáceo; no drena bien en los lechos de secado, pero se puede deshidratar mecánicamente |
| Primario digerido anaerobio  | 6-10                                   | Se deshidrata bien en los lechos de secado, color negro, olor a moho, produce gas                              |
| Humus del filtro   | 3-4                                    | Esponjoso, color café  |
| Activado excedente   | 0.5-1.5                                | Poco olor, color café amarillento, esponjoso; difícil de deshidratar; biológicamente muy activo                |
| Digerido mixto (Primario + activo excedente)                         | 2-4                                    | Café negruzco, produce gas, olor a moho; no tan fácil de drenar como el primario digerido                      |
| Anaerobio digerido   | 1-3                                    | Café amarillento, en ocasiones es difícil de deshidratar, biológicamente activo                                |
| Excedente de tratamiento con alumbre (sulfato de aluminio y potasio) | 0.5-1.5                                | Amarillo grisáceo, sin olor; muy difícil de deshidratar  |

Fuente: Aprovechamiento Agrícola de Aguas Negras Urbanas. M.A. Gamrasni. México, 1985.

Algunas de las principales propiedades de los lodos son las siguientes:

#### Propiedades físicas

a) **Contenido de materia seca.** Varía de 3 a 8% y es el peso del residuo seco después de calentar hasta 105°C

b) **Contenido de materia volátil.** Es del 60 al 85% de la materia seca y se determina por la diferencia entre el peso del lodo seco a 105°C y del mismo después de calentarse hasta peso constante a 550°C

c) **Contenido de agua intersticial.** El agua que existe en los lodos se encuentra de las siguientes formas:

- El agua libre que se elimina por filtración o por sedimentación
- Agua ligada o adsorbida que se encuentra contenida en las moléculas químicas, sustancias coloidales y células de materia orgánica y que solamente con calor pueden eliminarse

d) **Viscosidad.** La viscosidad permite definir la capacidad de los lodos de constituirse en una masa en estado de reposo y en un fluido después de la mezcla, lo que es de importancia para el transporte de lodos.

e) **Carga específica.** Determina la capacidad de sedimentación de los lodos, sus unidades son  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{día})$  y se define como la cantidad de materia seca sedimentada por unidad de superficie, depende del contenido de materia volátil.

f) **Poder calorífico.** La capacidad de combustión debido al contenido de materia orgánica que presentan los lodos les permite ser incinerados; el poder calorífico, se expresan en kilocalorías por kg de lodo o de materia volátil.

#### **Propiedades químicas.**

a) **Materia orgánica.** El contenido de materia orgánica en los lodos varía de 68 a 85% de la materia seca y corresponde a la materia volátil

b) **Elementos nutrientes.** Los nutrientes son sustancias que favorecen al crecimiento de las plantas y cuya presencia en los lodos les da una importancia considerable en materia agrícola, para ello pueden esparcirse los lodos o mezclarlos con desperdicios domésticos. Tales nutrientes son el fósforo (expresado como Pentóxido de fósforo  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), potasio (expresado como Oxido de Potasio  $\text{K}_2\text{O}$ ) y el nitrógeno total. En el Cuadro 6.2 se presentan algunos contenidos de estos nutrientes en los lodos.

c) **Microcontaminantes orgánicos.** Son productos químicos que se encuentran comúnmente en las aguas domésticas de desecho, ejemplos de ellos son los detergentes y contenidos químicos de medicinas

d) **Microcontaminantes minerales.** Algunos de los elementos minerales contenidos en los lodos tienen un efecto benéfico para las plantas o sobre el alimento de las plantas, sin embargo, otros tienen una acción adversa respecto al uso posterior que pueda darse a las aguas residuales, entre estos últimos puede considerarse al boro y al cobre. De esto se deduce que es necesario conocer la composición de los lodos antes de utilizarlos en la agricultura

e) **Vitaminas.** El ser humano no utiliza la totalidad de las vitaminas que ingiere, la cantidad que no requiere la elimina y por ello se encuentran en las aguas servidas y en los lodos.

**Propiedades biológicas.** Las aguas residuales y los lodos generados a partir de ellas, contienen flora y fauna (en forma de microorganismos), tales como las que se enlistan a continuación:

**a) Bacterias.** Las bacterias que se encuentran en los lodos pueden ser patógenas y se pueden clasificar de la manera siguiente:

- **Aerobias estrictas.** Solamente se desarrollan en presencia de aire
- **Facultativas.** Pueden desarrollarse tanto en presencia de aire como en estados anaerobios, es decir sin requerir de aire
- **Anaerobias estrictas.** Su desarrollo no se efectúa en presencia de aire

El tratamiento biológico de los lodos permite el desarrollo de ciertas bacterias y se opone al de algunas otras; por otra parte, si los lodos son almacenados se propician condiciones anaerobias y consecuentemente el desarrollo de esta clase de bacterias.

Frecuentemente se encuentran microorganismos patógenos en los lodos, por lo que es recomendable eliminarlos de los mismos.

**b) Virus.** En la materia sólida de los lodos se localizan enterovirus, adenovirus y reovirus; aunque puede resultar complicado, se requiere llevar a cabo su eliminación.

**c) Parásitos.** A menudo se encuentran en los lodos parásitos como: huevos de áscaris, tricocéfalos, helmintos, tenias o duelas hepáticas y su remoción es aún más difícil.

**d) Hongos.** Las levaduras y los saprófitos son los más comunes en los lodos.

**e) Algas.** En los lodos de tipo primario y secundario no se localizan, pero sí se presentan en los lodos producidos en lagunas.

**f) Macrofauna.** Pueden encontrarse en lodos activados o en lechos bacterianos animales tales como: gusanos, larvas de insectos, crustáceos y arañas pequeñas.

**Cuadro 6.2**

| CARACTERISTICAS AGRONOMICAS DE LOS LODOS RESIDUALES URBANOS<br>(PRIMARIOS + ACTIVADOS) EN PORCENTAJE DE MATERIA SECA |           |  |                                     |                  |
|--|-----------|--|-------------------------------------|------------------|
| Tipo de lodo   | N         | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (Fosfato de Nitrógeno) | K <sub>2</sub> O (Oxido de Potasio) | Materia orgánica |
| Lodos frescos  | 3.5 a 4.5 | 2 a 3  | 0.5 a 1                             | 60 a 80          |
| Lodos digeridos  | 2 a 2.5   | 1 a 2  | 0.2 a 0.5                           | 40 a 65          |

Fuente: Aprovechamiento Agrícola de Aguas Negras Urbanas. M.A. Gamrasni, México, 1985.

A manera de resumen: las características principales de los lodos que pretenden aplicarse al terreno, son:

- Los constituyentes más importantes de los lodos para sistemas de aplicación al terreno son el nitrógeno, fósforo y potasio; metales pesados y elementos tóxicos como los microorganismos patógenos y los parásitos.
- Las plantas requieren para su crecimiento determinadas cantidades de elementos como el zinc, pero concentraciones excesivas pueden ser tóxicas para éstas, además de el posible daño a las aguas subterráneas y superficiales.
- El valor como fertilizante de los lodos depende, entre otras cosas, del tipo de lodos del que

se trate, es decir de la fuente en que fueron originados, además de los métodos de tratamiento a los que hayan sido sometidos; en el Cuadro 6.3 se presentan intervalos típicos del contenido de nutrientes en los lodos y en el Cuadro 6.4 pueden apreciarse las concentraciones de metales en los mismos.

- La composición de nutrientes en los lodos es función del contenido de sólidos y de las tasas de aplicación; los metales pesados se requieren para el desarrollo de los cultivos, pero resultan tóxicos si se encuentran en concentraciones altas.

Cuadro 6.3

| INTERVALO DE VALORES TÍPICOS DE NUTRIENTES EN LODOS DIGERIDOS |               |              |
|---|---------------|--------------|
| Nutriente<br>en porcentaje de sólidos totales (%)             | Lodo digerido |              |
|   | Intervalo     | Valor típico |
| Sólidos volátiles (%)   | 30-60         | 40           |
| Nitrógeno (N)   | 1.6 - 6.0     | 3.0          |
| Fósforo (expresado como P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )       | 1.5 - 4.0     | 2.5          |
| Potasio (K <sub>2</sub> O)                                    | 0.0 - 3.0     | 0.5          |

Fuente: Ingeniería Sanitaria. Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales. Metcalf and Eddy

Cuadro 6.4

| CONCENTRACION DE METALES EN LODOS |                    |       |         |
|-----------------------------------|--------------------|-------|---------|
| Metal                             | Valor (mg/l = ppm) |       |         |
|                                   | Intervalo          | Media | Mediana |
| Plata                             | nd - 960           | 225   | 90      |
| Arsénico                          | 10 - 50            | 9     | 8       |
| Boro                              | 200 - 1 430        | 430   | 350     |
| Bario                             | nd - 3 000         | 1460  | 1 300   |
| Berilio                           | nd                 | nd    | nd      |
| Cadmio                            | nd - 1 100         | 87    | 20      |
| Cobalto                           | nd - 800           | 350   | 100     |
| Cromo                             | 22 - 30 000        | 1 800 | 600     |
| Cobre                             | 45 - 16 030        | 1 250 | 700     |
| Mercurio                          | 0.1 - 89           | 7     | 4       |
| Manganeso                         | 100 - 8 800        | 1 190 | 400     |
| Níquel                            | nd - 2 800         | 410   | 100     |
| Plomo                             | 80 - 26 000        | 1 940 | 600     |
| Estroncio                         | nd - 2 230         | 440   | 150     |
| Selenio                           | 10 - 180           | 26    | 20      |
| Vanadio                           | nd - 2 100         | 510   | 400     |
| Zinc                              | 51 - 28 360        | 3 483 | 1 800   |

nd = no determinado

Fuente: Ingeniería Sanitaria. Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales. Metcalf y Eddy. Barcelona, España, 1985.

## 6.2 Objetivos de los sistemas de aplicación de lodos

Los principales propósitos de los sistemas de aplicación de lodos son:

- 1) Evacuar los productos residuales en forma de lodos.
- 2) El aprovechamiento de los nutrientes y de la materia orgánica contenida en los lodos, para el mejoramiento de los cultivos.
- 3) Mejoramiento de la estructura del suelo y con ello de su capacidad de retención de agua y nutrientes.

## 6.3 Selección del sitio de aplicación

El correcto funcionamiento del sistema de aplicación de lodos dependerá en gran parte de la elección adecuada del emplazamiento. Tal decisión se toma considerando los siguientes aspectos:

a) **Ubicación respecto a zonas restringidas.** Estas zonas, que pueden denominarse como críticas, son aquellas en las que existe alguna restricción para la aplicación de lodos sobre el terreno, lo que puede deberse a la cercanía a regiones habitadas y/o a cuerpos de agua superficiales o subterráneos. Influyen también algunos aspectos como el clima, la geología y el tipo de suelo; los procedimientos de aplicación y la legislación correspondiente.

b) **Facilidad de acceso al sitio.** Es recomendable ubicar el sistema en un lugar que no se encuentre aislado; en caso de que esto no sea posible, deberán construirse las vías de comunicación como caminos, carreteras, o transporte por ductos para los líquidos que puedan generarse

c) **Pendiente del terreno.** El intervalo sugerido se encuentra entre 5 y 8%, pendientes menores a este rango traen consigo problemas de sedimentación, mientras que valores más altos al 8% provocan dificultades respecto a la erosión y al funcionamiento de los equipos.

d) **Propiedades del suelo.** Las propiedades físicas y químicas del suelo son de los principales factores que determinan el grado de aptitud del mismo para aprovechar los lodos como fertilizantes; aunque, por lo general, cualquier tipo de suelo es propicio para la aplicación de lodos, lo que conlleva a su regeneración y fertilización. Deben seleccionarse suelos con capacidad de infiltración, estabilización biológica y absorción del lodo aplicado y que sean aptos para permitir el desarrollo de cultivos.

Por lo tanto, las características deseables en el terreno son:

- 1) Permeabilidad moderada. (De 1.5 a 15 cm/h).
- 2) Drenabilidad moderada.
- 3) Tratarse de suelos alcalinos o neutros (con pH mayores o iguales a 7), lo que controla la solubilidad de los metales pesados.
- 4) La capa de suelo superficial debe ser lo suficientemente profunda y tener una textura relativamente fina para poder retener la humedad, sin afectar la permeabilidad referida en el punto 1, y fijar los nutrientes.

Cuando el tipo de suelo en que se pretenda disponer los lodos carezca de alguna propiedad anteriormente descrita, deberán estudiarse soluciones de mejoramiento para cada caso en particular.

e) **Geología.** En el caso de que existan fallas, fisuras, agrietamientos, etc. puede ocurrir que los lodos aplicados se lixivien y contaminen las aguas subterráneas; además de que los sismos pueden provocar también daños en el suelo o en la roca y producir infiltración de los lodos al manto de aguas subterráneas.

#### **6.4 Transporte y distribución comercial**

Para llevar los lodos al lugar en que serán utilizados se dispone de diversos medios, como son:

- Camiones cisterna
- Camiones ordinarios para lodos sólidos
- Transportes hidráulicos

La selección del medio de transporte más conveniente depende de la naturaleza de los lodos, de la cantidad por transportar y del costo o precio unitario de la distribución. De tal manera los lodos en estado líquido ocupan más volumen que los secos, aunque tengan el mismo peso de sustancias nutrientes; sin embargo, es más sencillo el llenado de cisternas y el transporte a través de tuberías, además de que debido a su alto contenido de agua propician que ya no sea necesario el riego posterior a su aplicación al terreno; a diferencia de los lodos secos que difícilmente recuperan su humedad, por lo que el terreno necesita ser irrigado después del vertido de los lodos.

La irregularidad de los requerimientos de lodos por los cultivos durante el año trae como consecuencia la necesidad de almacenamiento de los lodos como se explica a continuación: debido a que los lodos líquidos deben distribuirse sobre los cultivos sólo cuando las plantas se encuentran en una etapa de crecimiento tal que ya están en pie; sin embargo, la producción de lodos es continua lo que obliga a su posterior almacenamiento; para este fin debe contarse con estanques, fosas o lagunas o bien aplicarles otro proceso como puede ser la incineración o la digestión. En caso de que los lodos no se encuentren estabilizados será necesario utilizar fosas cubiertas que disminuyan el desprendimiento de malos olores.

Los terrenos agrícolas cercanos al emplazamiento pueden ser los sitios más viables hacia donde conducir los lodos; sin embargo, resulta necesario realizar un análisis costo-beneficio en el que se comparen el valor fertilizante de los nutrientes que se encuentren en los lodos con el costo de distribución y aplicación de lodos al terreno. Para que resulte conveniente la aplicación agrícola de lodos, el precio real de éstos, debe ser menor que el de abonos o fertilizantes comerciales que puedan ser adquiridos por los agricultores.

La producción de los cultivos resulta beneficiada por la disposición de lodos en el terreno, lo que ha sido observado en plantaciones de maíz, alfalfa y forrajes; a través de estudios de estas cosechas se ha inferido que una tasa de aplicación de entre 10 y 22 mg de lodo seco/ha genera condiciones similares a las que pueden lograrse con el empleo de fertilizantes comerciales. El

rendimiento de los cultivos se incrementa en función del tipo de suelo, de las características y composición de los lodos, de las condiciones climatológicas, de las cargas que se apliquen y de los procedimientos de operación y distribución de los que se disponga.

### **6.5 Procedimientos de operación y aplicación**

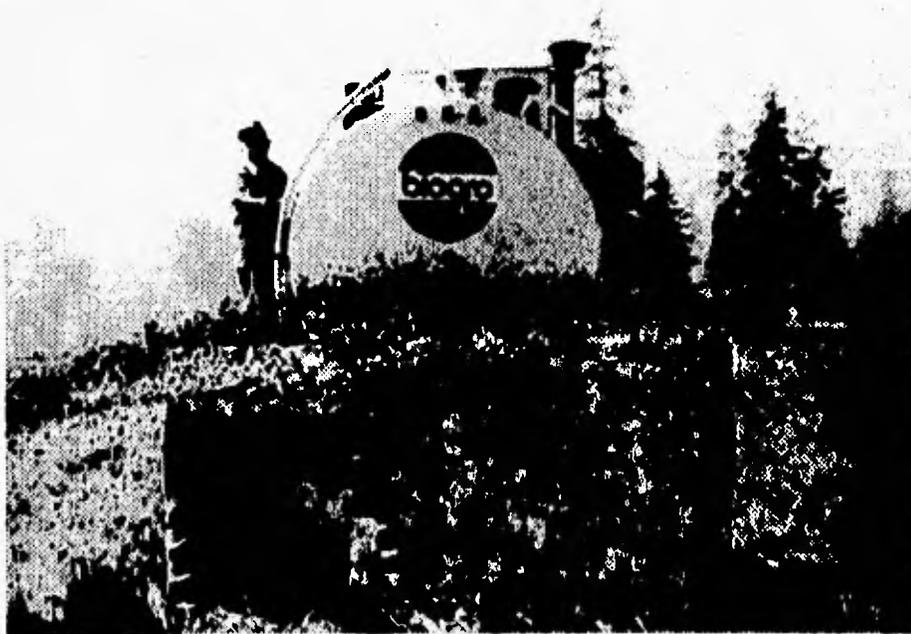
Los métodos de distribución y aplicación que tienen mayor aceptación se basan en las siguientes consideraciones:

- Utilización de lodos con alto contenido de humedad para aplicarse como una lámina de riego por inundación, por inyección superficial o por riego por aspersión
- Empleo de lodos secos o deshidratados para su aplicación directa, para distribuirse estando mezclados con materia orgánica o como fertilizante para el suelo

Cuando los lodos se encuentran en estado líquido la aplicación puede efectuarse por aspersión, utilizando sistemas de surcos o extenderse en camiones cisterna; el verter lodos líquidos al terreno evita la necesidad de deshidratación de los lodos además de que el transporte de los líquidos puede resultar más sencillo utilizando para ello camiones cisterna; por otra parte, si el lodo se encuentra deshidratado es como si se aplicara un abono animal semisólido al terreno y tales procedimientos de aplicación son conocidos y utilizados por los agricultores. A continuación se describen las principales técnicas de aplicación:

a) **Descarga con uso de camión cisterna.** Los camiones cisterna tienen capacidades que oscilan entre 3.8 y 7.6 m<sup>3</sup> y se usan para efectuar la descarga directa del lodo mediante un conducto con orificios, que se ubica en la parte posterior del camión; conforme éste circula a lo largo del terreno se vierte el lodo sobre este último. El conducto o tubería dispone de válvulas con las que se regulan las tasas de aplicación, además de que esto también se logra alterando la velocidad del camión; también es posible adaptar pulverizadores al camión con lo que se pretende cubrir una mayor superficie de aplicación.

Los camiones cisterna tienen la ventaja de que su operación es relativamente sencilla y pueden utilizarse en diferentes lugares de aplicación como son pastos, sembradíos, campos de golf, etc.; sin embargo, también afrontan algunas desventajas como son un elevado costo de adquisición en el mercado, las dificultades que ocurren durante época de lluvias y un elevado costo de operación y mantenimiento. Además de ello, los camiones cisterna no pueden penetrar en las parcelas cuando el terreno se encuentra blando, lo que implica la necesidad de contar con zonas de almacenamiento durante la época de lluvia o bien adaptar neumáticos que permitan la flotación de los camiones; un inconveniente más es que el paso continuo de los vehículos puede dañar las plantaciones y a la estructura del suelo haciéndolo más denso y afectando las propiedades de infiltración. En la Figura 6.2 se muestra el vertido de lodos en estado líquido por medio de camiones cisterna.



**Figura 6.2** Aplicación de lodos líquidos mediante camiones cisterna

**b) Aspersión.** Es posible hacer uso de aspersores con orificios suficientemente grandes para el manejo de lodos con sólidos. El suministro se efectúa mediante sistemas de aspersión fijos o móviles; los aspersores de tipo móvil requieren de mayor atención por parte del operador mientras que los de tipo fijo pueden trabajar de manera automática. Las principales ventajas que ofrecen los procesos de aplicación mediante aspersión son: la disminución de la mano de obra, menor necesidad de preparación del terreno, la posibilidad de emplearse en una amplia variedad de cultivos y de su funcionamiento en terrenos húmedos que dificultan la utilización de camiones, además de que el riego puede realizarse durante la etapa de crecimiento del cultivo. A pesar de estas ventajas, la técnica de la aspersión también presenta problemas como los elevados costos del equipo de bombeo a alta presión, el hecho de que el lodo tiene contacto con todas las partes de las plantas (hojas, tallo, raíz, etc.), lo que puede dañar a cultivos sensibles; a todo esto se debe añadir el desprendimiento de organismos patógenos a través de los aerosoles. Un aerosol es una suspensión de partículas microscópicas de una materia sólida o líquida que se encuentra en el aire, que se expelle a presión en forma de nube tenue; para controlar la contaminación por aerosoles pueden prepararse zonas de amortiguamiento (como pueden ser barreras vegetales en las que se diluye u obstaculice el flujo a través del aire de tales aerosoles), emplear aspersión con baja presión, regular la aspersión disminuyéndola o evitándola en días en que haya mucho viento que pudiera llevar los aerosoles a zonas habitadas cercanas al emplazamiento. Un ejemplo de un sistema de aplicación de lodos por aspersión con captación del agua por escurrimiento se muestra en la Figura 6.3

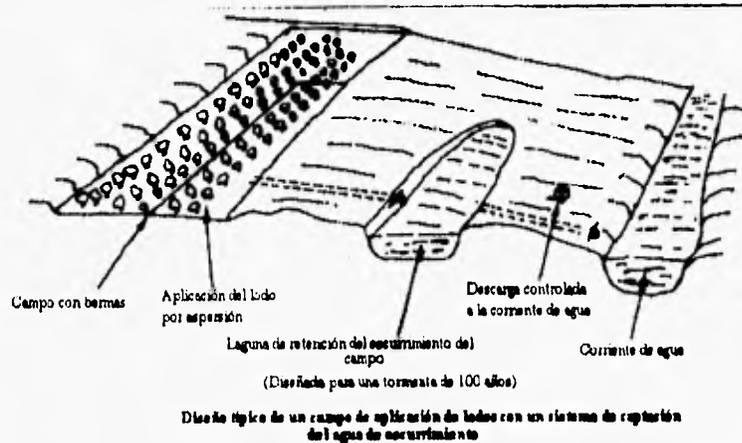


Figura 6.3 Campo de aplicación de lodos

c) **Descarga de los lodos.** El procedimiento consiste en labrar un surco, distribuir los lodos a lo largo de él y cubrirlos posteriormente, con la finalidad de evitar la propagación de malos olores; otra técnica de aplicación es la inyección del lodo, lo que se realiza por debajo de la superficie sin remover el suelo; también es posible vertir los lodos simultáneamente al arado del suelo. La descarga permite la combinación del fango con el suelo, lo que inhibe el desprendimiento de malos olores que ocurriría si se permite el estancamiento del lodo o fango.

El hecho de que la descarga solamente deba efectuarse antes del crecimiento del plantío o sobre un terreno que no se encuentre cultivado, es una limitante importante en los sistemas de aplicación de lodos así como lo es también la dificultad que representa para los camiones la poca estabilidad del suelo al encontrarse en condiciones extremas de humedad.

d) **Procedimiento de vertido por surcos.** En este método los lodos escurren por los surcos a través de los cultivos efectuando simultáneamente el riego y la fertilización del terreno; esta técnica es de las más sencillas y flexibles, pero presenta dilemas como son la sedimentación de los sólidos a la entrada de los surcos, para lo que deberá contarse con pendientes que permitan el escurrimiento del lodo líquido que ha sido dispuesto; debe evitarse el estancamiento del lodo en las zanjales o surcos pues puede ocasionar el desarrollo de un estado anaerobio.

## 6.6 Cargas de aplicación

Las características de los lodos, el tipo de suelo, el clima y la clase de sembradío determinan las cargas que deben aplicarse al terreno. Resultan de particular importancia el contenido de nutrientes en los lodos (como el nitrógeno y el fósforo), la concentración de metales pesados y de materia orgánica.

Entre las propiedades físicas del suelo más determinantes se puede mencionar la permeabilidad que determina el grado de infiltración y la capacidad de retención del agua en los intersticios del suelo. También pueden considerarse otros factores como son la precipitación pluvial que afecta las características hidráulicas del suelo y la influencia que pueden tener las condiciones climatológicas sobre el rendimiento del equipo dispuesto para la aplicación de los lodos; todos estos elementos ocasionan variaciones en las tasas de aplicación de lodos al sistema.

Vale la pena hacer hincapié en la importancia de la presencia de nutrientes como el fósforo y principalmente el nitrógeno en los lodos, dado que estos elementos son esenciales para el desarrollo y crecimiento de las plantas, aunque también pueden constituirse como contaminantes si se encuentran en concentraciones elevadas. El empleo de lodos en la agricultura se aprecia en la Figura 6.4.

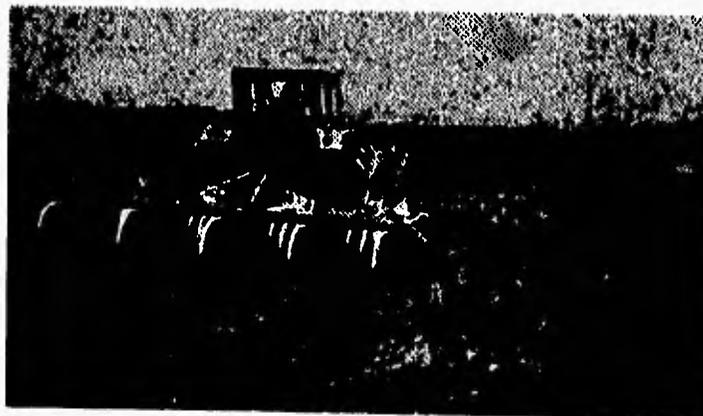


Figura 6.4 Utilización agrícola de lodos

### 6.6.1 Carga de nitrógeno.

De acuerdo con el ciclo del nitrógeno este elemento puede sufrir diferentes procesos físicos y químicos al encontrarse en el suelo como los siguientes: ser asimilado por la vegetación, adsorbido por las partículas de suelo, experimentar intercambio catiónico, volatilizarse o desnitrificarse. El nitrógeno está presente en las aguas residuales y en los lodos en la forma de nitrógeno orgánico, amoniacal y nitrato; para el caso del lodo secundario digerido aproximadamente la tercera parte del nitrógeno total es de tipo amoniacal, siendo casi todo el remanente orgánico y una pequeña cantidad de nitratos. El nitrógeno orgánico que se encuentra suspendido en el agua residual y en los lodos, se infiltra a través del suelo, descomponiéndose en nitrógeno amoniacal y cuando se encuentra en tal estado es absorbido por el suelo lo que impide la lixiviación; simultáneamente a esto, parte del nitrógeno amoniacal se evapora en forma de gas amoníaco y otra se nitrifica hasta constituirse como nitratos. Finalmente, los nitratos pueden ser asimilados por las plantas aunque el suelo los absorbe muy lentamente, el excedente se lixivia hacia el agua subterránea.

La carga de nitrógeno se determina mediante la siguiente expresión:

$$N=0.1CL$$

Ecuación en la que:

- N = Carga de nitrógeno (kg/ha.año)
- C = Contenido de nitrógeno total en el lodo (mg/l)
- L = Tasa de aplicación (cm/año)
- 0.1 = Factor de conversión

La carga de nitrógeno resultante de aplicar esta expresión matemática debe ser ligeramente mayor a la que puede captar cada cultivo (como se indica en el Cuadro 2.4), atendiendo a que parte del nitrógeno se pierde al volatilizarse y desnitrificarse.

De acuerdo con estudios se estima que del 20 al 35% del nitrógeno orgánico se transforma en amoníaco y en nitrato durante el primer año de aplicación, 5 a 15% del nitrógeno orgánico restante en el segundo año y para los siguientes años del 1 al 5% remanente; la determinación del nitrógeno disponible total debe tomar en cuenta la aplicación de lodos al terreno en los años siguientes.

La expresión que se presenta a continuación permite calcular la carga de nitrógeno para la aplicación en el primer año:

$$N_1 = \frac{U}{Dr_1} - N_0$$

En donde:

$N_1$  = Carga de nitrógeno en el lodo para el primer año (kg en estado seco/ha)

$U$  = Captación de nitrógeno por el cultivo (kg/ha)

$r_1$  = Porción de nitrógeno aplicado que se desnitrifica y se encuentra disponible para ser asimilado por las plantas, expresado en decimales

$D$  = Porcentaje del peso de nitrógeno presente en los sólidos del lodo, expresado en decimales

$N_0$  = Concentración inicial del nitrógeno en el suelo (kg/ha)

El uso de la ecuación anterior se presenta en el siguiente ejercicio:

**- Ejemplo de la determinación de la carga de nitrógeno en sistemas de aplicación de lodos.**

Calcular la tasa de aplicación de lodo seco en un cultivo que asimila o capta 225 kg/ha.año de nitrógeno. Considerar que el 35% del nitrógeno que se suministra se encuentra disponible durante el primer año para ser captado por la vegetación, el 10% del nitrógeno remanente es accesible para las plantas en el año número dos y el 5% del restante es degradado a partir del tercer año; suponer que no hay contenido inicial de nitrógeno en el suelo ( $N_0 = 0$ ) y que el lodo que se aplica al terreno contiene un 2.5% de nitrógeno en peso en la porción sólida de los lodos.

Solución:

A partir del enunciado del problema se obtienen los datos siguientes:

Datos:

$U = 225$  kg/ha.año

$r_1 = 35\% = 0.35$

$N_0 = 0$  kg/ha

$D = 2.5\% = 0.025$

Procedimiento:

**1. Cálculo de la tasa de aplicación para el primer año**

Resolviendo la ecuación:

$$N_1 = \frac{U}{Dr_1} - N_0$$

$$N_1 = (225 / 0.025 \times 0.35) - 0$$

$$N_1 = 25714 \text{ kg/ha} = 25.7 \times 10^3 \text{ kg/ha}$$

## 2. Determinación del nitrógeno realmente aplicado

El nitrógeno realmente suministrado se determina con la carga de lodo ya calculada multiplicada por el porcentaje en peso de nitrógeno de los sólidos del lodo aplicado, es decir:

$$N_{\text{real}} = N, D = 25714 \text{ kg/ha} \times 0.025$$

$$N_{\text{real}} = 642.85 \text{ kg/ha} = 643 \text{ kg/ha}$$

## 3. Cálculo del nitrógeno residual para el año 1

El nitrógeno remanente después del primer año es el que no fue utilizado por las plantas durante este año; si la vegetación asimiló el 35% del nitrógeno realmente aplicado, el residual resulta ser:

$$N_{\text{residual}} = 643 \text{ kg/ha} (1-0.35) = 643 (0.65) = 417.95 \text{ kg/ha} = 418 \text{ kg/ha}$$

El nitrógeno realmente captado por las plantas es:

$$N_{\text{asimilado por las plantas}} = 0.35(643 \text{ kg/ha}) = 225.05 \text{ kg/ha} = 225 \text{ kg/ha}$$

## 4. A continuación se procede a determinar el nitrógeno remanente en el segundo año

Dado que se sabe que el 10% del nitrógeno residual se encuentra disponible para las plantas en el segundo año, siendo la cantidad de tal nitrógeno residual de 418 kg/ha, se tiene que:

$$N_{\text{asimilado por las plantas}} = 0.1 \times 418 \text{ kg/ha} = 41.8 \text{ kg/ha} = 42 \text{ kg/ha}$$

$$N_{\text{residual}} = 418 \text{ kg/ha} - 42 \text{ kg/ha} = 376 \text{ kg/ha}$$

## 5. Determinar la aplicación para el segundo año y el residual para el tercero

La captación total de nitrógeno por las plantas es de 225 kg/ha, de los cuales ya se han utilizado 42 kg/ha por parte de la vegetación; la aplicación del segundo año debe ser de 225 kg/ha - 42 kg/ha = 183 kg/ha.

Los 183 kg/ha se descomponen en un 35% durante el primer año, por lo que el nitrógeno aplicado es de 183/0.35 kg/ha = 522.85 kg/ha = 523 kg/ha

La tasa de aplicación total del lodo seco para un contenido de un 25% de nitrógeno es de:

$$523/0.025 = 20920 \text{ kg/ha} = 20.9 \times 10^3 \text{ kg/ha}$$

Siendo el nitrógeno total:

$$523(0.65) = 339.9 \text{ kg/ha} = 340 \text{ kg/ha}$$

## 6. Cálculo de la aplicación para el tercer año

Para este año se tienen dos contenidos de nitrógeno residuales, con una tasa diferente de descomposición; tales contenidos son de 376 kg/ha y 340 kg/ha para el primer y segundo año, respectivamente.

La captación por el cultivo en el tercer año se obtiene multiplicando el remanente de la aplicación anterior por la tasa de descomposición correspondiente. En el cuadro 6.5 se presenta una tabla de cálculo del balance de nitrógeno para este ejemplo, en donde puede observarse el procedimiento descrito y se prosigue con las determinaciones hasta el cuarto año.

### 6.6.2 Metales pesados

La toxicidad de los metales pesados para las plantas, la capacidad de acumularse en el suelo, ser asimilados por los cultivos y llegar a integrarse a la cadena alimenticia humana son aspectos que delimitan la importancia de la presencia de este tipo de elementos en los lodos por disponer al terreno. Algunos elementos pueden causar más daño que otros, por ejemplo el boro es capaz de percolarse a través de los estratos de suelo y contaminar el agua subterránea. El grado de fitotoxicidad es función de los siguientes factores:

- Contenido natural de metales pesados en el suelo
- Propiedades del suelo como el pH y la capacidad de intercambio de cationes. La solubilidad de los metales pesados se inhibe cuando el pH tiende a ser neutro; es recomendable evitar la aplicación de lodos en suelos cuyo pH sea inferior a 6. El intercambio de cationes tiene gran importancia en la retención de los metales contenidos en los lodos; estos metales se intercambian con iones de elementos como el sodio, el calcio o el aluminio
- Concentración de otras sustancias en los lodos como pueden ser fosfatos y materia orgánica
- Permanencia de los elementos en el suelo

Dependerá también del tipo de cultivo el grado de alteración que puedan causarles los metales pesados a la vegetación. Aunque para la mayoría de los cultivos los metales pesados y otros elementos se acumulan principalmente en las hojas y en las raíces y en menor proporción en semillas, frutos y tubérculos; la evidencia principal de las alteraciones en las cosechas es la disminución en la producción.

Aún no se cuenta con criterios aceptados y valores cuantitativos respecto a los efectos tóxicos y daño a la salud que producen los metales pesados contenidos en los lodos, solamente se tienen algunas experiencias como las del área de Chicago, E.U.A en donde no fueron encontrados metales pesados en las plantas después de un período de irrigación con lodos; además de estudios realizados por un científico de nombre Kirkham que sirvieron para determinar que al paso de 35 años de suministrar lodos con una concentración de 800 mg/l de Cadmio, se reportan niveles normales de esta metal en el suelo. Sin embargo, es recomendable que los lodos producto de aguas residuales que se pretendan disponer al terreno tengan concentraciones bajas a moderadas de metales pesados.

Cuadro 6.5

| BALANCE DE NITROGENO PARA EL EJEMPLO ANTERIOR |  |                            |   |                             |  |                      |
|---|--|----------------------------|---|-----------------------------|--|----------------------|
| Periodo                                       | Nitrógeno (kg/ha)                            |                            |   |                             |  |                      |
|   | Lodo aplicado<br>kg/ha X 10 <sup>3</sup> 1,2 | Aplicado en<br>el lodo 1,2 | Remanente de<br>la aplicación<br>anterior 1 | Tasa de<br>descomposición 3 | Captación por el<br>cultivo<br>(kg/ha) | Remanente<br>kg/ha 1 |
|   | (1)  | (2)                        | (3)   | (4)                         | (5)                                    | (6)                  |
| 1, año  | 25.7   | 643                        | -   | 0.35                        | 225                                    | 418                  |
| 2, año  |  |                            |   |                             |  |                      |
| Residuo del primer año                        | -  | -                          | 418   | 0.10                        | 42                                     | 376                  |
| Nueva aplicación                              | 20.9   | 523                        | -   | 0.35                        | 183                                    | 340                  |
|   |  |                            |   |                             | 225                                    |                      |
| 3, año  |  |                            |   |                             |  |                      |
| Residuo del primer año                        | -  | -                          | 376   | 0.05                        | 19                                     | 357                  |
| Residuo del segundo año                       | -  | -                          | 340   | 0.10                        | 34                                     | 306                  |
| Nueva aplicación                              | 19.7   | 492                        | -   | 0.35                        | 172                                    | 320                  |
|   |  |                            |   |                             | 225                                    |                      |
| 4, año  |  |                            |   |                             |  |                      |
| Residuo del primer año                        | -  | -                          | 357   | 0.05                        | 18                                     | 339                  |
| Residuo del segundo año                       | -  | -                          | 306   | 0.05                        | 15                                     | 291                  |
| Residuo del tercer año                        | -  | -                          | 320   | 0.10                        | 32                                     | 288                  |
| Nueva aplicación                              | 18.3   | 457                        | -   | 0.35                        | 160                                    | 297                  |
|   |  |                            |   |                             | 225                                    |                      |

- 1 Valores calculados
- 2 2.5 % de nitrógeno en la parte de sólidos de los lodos
- 3 Datos

Resumen de cálculos:  
 Columna 2 = Columna 1 X 0.025 X 1000  
 Columna 5 = Columna 4 X Columna 3 o Columna 2  
 Columna 6 = Columna 3 X (1 - Columna 4)

Fuente: Ingeniería Sanitaria. Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales. Metcalf y Eddy. Barcelona, España, 1985

### 6.7 Nuevos sistemas de disposición de aguas residuales en el terreno

Los sistemas que hasta el momento han sido analizados, implican la preparación y posible adaptación del suelo para la distribución y aplicación de las aguas residuales y los lodos en el terreno. En fechas recientes se han comenzado a estudiar, principalmente en Estados Unidos de América, el empleo de algunos ecosistemas de tipo natural para la depuración y renovación de las aguas servidas; tal es el caso de los terrenos inundados (pantanos), suelos orgánicos (turberas), en la acuicultura y acuatricultura; entendiéndose como tales al cultivo y aprovechamiento de los cuerpos de agua dulce y salada. A continuación se desarrollan brevemente algunas características de este tipo de sistemas.

#### 6.7.1 Vertido en terrenos inundados

A aquellos terrenos que tienen agua en demasía para uso agrícola o para desarrollar la silvicultura, pero que no tienen la cantidad suficiente de agua para ser lagos se les puede denominar como áreas inundadas. Dentro de esta definición se encuentran las marismas, las praderas inundadas, turberas y pantanos.

Los terrenos pantanosos que pueden emplearse para el tratamiento del agua residual municipal se clasifican en: terrenos pantanosos artificiales, terrenos pantanosos naturales y turberas, es decir, suelos con altos contenidos de materia orgánica

- **Terrenos pantanosos artificiales.** Han sido desarrollados sistemas experimentales en Long Island, en el Estado de Nueva York en E.U.A en los que se han implantado un par de sistemas, como sigue: praderas húmedas, una marisma (entendiéndose como tal a terrenos bajos que son inundados por aguas de mar o bien a terrenos anegados a orillas de cuerpos de agua) y un estanque de disposición final en uno de los sistemas; en el segundo sistema solamente se emplean la marisma y el estanque, prescindiendo de las praderas húmedas.

Los suelos sobre los que se constituyeron los pantanos son de tipo arenoso, con revestimiento plástico impermeable para protección de los estratos inferiores de suelo. Cuando en el año de 1973 comenzó el funcionamiento de estos sistemas las aguas residuales aplicadas eran recirculadas; con el paso del tiempo se han mejorado los procedimientos de operación hasta efectuar una sola aplicación con una mayor carga hidráulica, para el año de 1976 llegaron a disponerse 63 cm/semana al estanque. Como un tratamiento previo se sugiere airear el agua residual ya sea por medios naturales o mediante procesos mecánicos; en el Cuadro 6.6 se muestran datos sobre el rendimiento y las eficiencias para los terrenos pantanosos de tipo artificial.

Los terrenos pantanosos a los que se hace referencia ocupan una superficie aproximadamente de 800 m<sup>2</sup> (0.08 ha) y la inundación ocurre hasta una profundidad cercana a los 15 cm, aunque es aconsejable una profundidad de al menos 30 cm con la finalidad de evitar el crecimiento excesivo de vegetación y que la lluvia intensa pueda ocasionar erosión al terreno. Las especies vegetales sembradas en el estanque son: tífáceas (*Typha*) y la lenteja de agua (*Lemna minor*).

- **Terrenos pantanosos naturales.** Se han realizado estudios acerca de la disposición de aguas residuales tratadas hasta nivel secundario en pantanos de agua salada y de agua dulce y se han empleado jacintos de agua en lagunas con el propósito de remover la materia orgánica en

términos de DBO, sólidos suspendidos y nutrientes como el nitrógeno y el fósforo. El Cuadro 6.7 expone los resultados del uso de lagunas con jacintos de agua y los compara con los valores obtenidos en lagunas en que no se cultivaron estas plantas.

Resulta conveniente cosechar los jacintos para permitir la degradación efectiva de los nutrientes que se encuentran en las aguas residuales, la recolección debe hacerse al menos cada cinco semanas durante la etapa de crecimiento del cultivo. La vegetación producto de esta cosecha puede procesarse y transformarse para obtener: alimentos de alto contenido de proteínas para los animales, abonos y fertilizantes orgánicos para el mejoramiento del suelo o gas metano.

Cuadro 6.6

| Rendimiento y eficiencias de remoción en un par de sistemas artificiales en terrenos pantanosos en Long Island, Nueva York <sup>1</sup> |                                  |  |   |
|---|----------------------------------|--|---|
| Parámetro   | Influyente (mg/l)                | Efluente de sistemas con praderas húmedas y marismas (mg/l) y eficiencia de remoción (%) | Efluente de sistemas de terrenos inundados sin praderas húmedas (mg/l) y eficiencia de remoción (%) |
| DBO   | 520                              | 15 mg/l - 97%  | 16 mg/l - 97%   |
| Sólidos suspendidos totales   | 860                              | 43 mg/l - 95%  | 57 mg/l - 93%   |
| Nitrógeno total   | 36                               | 3 mg/l - 92%   | 4 mg/l - 89%  |
| Coliformes fecales (total/100 ml)   | 3000 (total/100 ml) <sup>2</sup> | 17 - 99%   | 21 - 99%  |

<sup>1</sup> Los datos que se presentan en este Cuadro son los valores medios resultantes en la aplicación desde julio hasta septiembre de 1975 en los sistemas indicados.

<sup>2</sup> Las unidades que se reportan para coliformes fecales son el total de estos sobre 100 ml.

Fuente: Ingeniería Sanitaria. Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales. Metcalf and Eddy

El empleo de pantanos para la disposición y el tratamiento de aguas residuales es una alternativa interesante en esta materia; para ello, se precisan realizar más estudios y experimentar en sistemas de prueba buscando encontrar valores de diseño aceptables para determinar las propiedades deseables en el sitio, la degradación de nutrientes, las cargas hidráulicas, orgánicas, de nitrógeno, etc. que deban aplicarse; además del efecto del clima y los requerimientos de zonas de almacenamiento y amortiguamiento.

Cuadro 6.7

| RENOVACION DEL EFLUENTE DE LAGUNAS DE ESTABILIZACION MEDIANTE EL EMPLEO DE JACINTOS DE AGUA |                        |          |  |          |
|---|------------------------|----------|--|----------|
| Parámetro   | Estanques con jacintos |          | Estanques a los que no se les cultivó jacintos |          |
|   | Influyente             | Efluente | Influyente                                     | Efluente |
| DBO,  | 22                     | 7        | 27   | 30'      |
| Sólidos suspendidos   | 43                     | 6        | 42   | 46'      |
| Nitrógeno total Kjeldahl  | 4.4                    | 1.1      | 4.5  | 4.5      |
| Fósforo total   | 5.0                    | 3.8      | 4.8  | 4.6      |

<sup>1</sup> La mayor concentración de los parámetros en el efluente que en el influente puede deberse a la muerte de jacintos de agua o peces que se encuentren en el estanque y que se constituyen como materia contaminante o a descargas indebidas en los estanques

Fuente: Ingeniería Sanitaria. Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales. Metcalf and Eddy

- **Suelos orgánicos o turberas.** Los suelos con alto contenido de materia orgánica pueden ser eficaces para tratar las aguas residuales. Como ejemplo de ello se muestran las características de un proyecto de este tipo, desarrollado en Minnesota. El suministro del agua residual sobre el terreno se realizó por medio de aspersores, aplicando una carga de 33.8 cm/semana, con un sistema de drenaje ubicado a un metro de profundidad; en el Cuadro 6.8 se exponen los rendimientos de remoción de contaminantes en este sistema.

Cuadro 6.8

| TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN SUELOS CON ALTO CONTENIDO ORGANICO (TURBERAS), SISTEMA UBICADO EN MINNESOTA |                 |          |
|---|-----------------|----------|
| Parámetro   | Influyente      | Efluente |
| DBO   | -               | 5        |
| Sólidos suspendidos   | -               | 5        |
| Nitrógeno total   | 20-40           | 1-10     |
| Fósforo total   | 10              | 0.1      |
| Coliformes fecales<br>(total/100 ml)  | $10^3$ - $10^6$ | 0-4      |

Fuente: Ingeniería Sanitaria. Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales. Metcalf and Eddy

### 6.7.2 Otros usos de los lodos en agricultura

Además de los diferentes procedimientos para la utilización de los lodos en la agricultura resulta conveniente mencionar los procesos de aplicación de lodos en los bosques, el empleo de los mismos para el revestimiento de tierras estériles y para la alimentación de los animales.

- **Aplicación de los lodos en los bosques.** Es posible efectuar la irrigación con lodos en los bosques, tomando en consideración que éstos no son cultivos propiamente dichos y que sus productos no forman parte de la cadena alimenticia del hombre y de los mamíferos, tal es el caso de la madera y el follaje; además de que los requerimientos de agua son distintos a los de un sembradío. Hasta el momento no se tienen suficientes resultados respecto a la disposición de lodos en bosques como para poderlos estudiar como un sistema y proporcionar valores de eficiencias, rendimientos, cargas de aplicación, etc. En la Figura 6.5 se presenta la aplicación de lodos líquidos en bosques.

- **Reverdecimiento de zonas estériles.** Se pueden citar cantidad de daños al ambiente producidos por diferentes tipos de desechos, entre los que destacan los de origen industrial que contaminan ríos, mantos freáticos, mar, suelo, etc. En muchos casos se depositan directamente en el terreno, al aire libre; esto, aunado a la contaminación que ocasiona, representa también un daño al suelo y puede afectar su fertilidad, así podemos mencionar como ejemplos: las descargas de desperdicios domésticos cubiertos con una capa de arena, vertido de desperdicios minerales metálicos, productos residuales de las minas, derivados del petróleo, etc. Una alternativa para atenuar los efectos de estas descargas en el suelo es cubrirlos con una capa de humus en la que

sea posible sembrar hierbas y plantas; esta capa puede estar constituida por lodos deshidratados. De acuerdo con el tipo de vegetación que se plante en estos terrenos estériles deberá tenerse cuidado con las concentraciones de metales pesados en los lodos, con el grado de infiltración y de escurrimiento que permita el terreno dado que estos factores pueden afectar al crecimiento y desarrollo del cultivo.



**Figura 6.5 Aplicación de lodos líquidos en bosques**

---

**7. IMPACTO AMBIENTAL DEL TRATAMIENTO  
DE AGUAS RESIDUALES EN EL SUELO**

---

**CAPITULO 7****IMPACTO AMBIENTAL  
DEL TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES EN EL SUELO****7.1 Definición e importancia del Impacto Ambiental**

En los capítulos anteriores se han presentado y descrito diferentes sistemas de aplicación de aguas residuales al terreno que tienen la finalidad de conseguir su tratamiento. La puesta en marcha y el funcionamiento de alguno de estos procedimientos requiere de un estudio en el que se consideren los diferentes impactos ambientales que pueden causar tales sistemas; es decir que como toda obra de ingeniería civil, en forma paralela a la etapa de planeación del proyecto de un sistema de tratamiento de aguas en suelos debe efectuarse un estudio de impacto ambiental.

El término impacto ambiental se refiere a toda modificación benéfica o adversa que sufre el ambiente debido a acciones humanas o a fenómenos naturales. Al llevar a cabo un estudio de impacto ambiental se pretende identificar y predecir las posibles alteraciones en el ambiente y proponer alternativas para evitar o reducir los efectos adversos que puedan presentarse. El objetivo fundamental de un estudio de impacto ambiental es seleccionar de entre diferentes alternativas para realizar un proyecto, aquélla que ocasione mayores beneficios en cuanto a aspectos socioeconómicos y ambientales. La elaboración de un estudio de impacto ambiental comprende las siguientes etapas:

- **Primera etapa.** La etapa de identificación es en la que se describen las características del proyecto, además de las obras y actividades que deben llevarse a cabo para su ejecución, como son: selección del sitio y construcción, operación, mantenimiento y abandono al término de su vida útil. Posteriormente debe especificarse la situación ambiental que prevalece en la zona de influencia del proyecto, señalando los niveles posibles de alteración. Deben considerarse los aspectos generales del medio natural y socioeconómico. Finalmente, en esta fase, es necesario predecir las condiciones ambientales futuras que se presentarían en el sitio, en caso de no realizar el proyecto.

- **Segunda etapa.** En ella se llevan a cabo la identificación, predicción y evaluación de los impactos que el proyecto pueda ocasionar en sus diferentes etapas en el ambiente. Tales fases consisten en lo siguiente:

**1) Fase 1. Identificación.** Deben reconocerse, por separado, las actividades del proyecto que podrían impactar sobre el ambiente y determinar los factores ambientales que serían modificados. Esto implica el análisis de las actividades que constituyen un proyecto, como son: las etapas de selección y preparación del sitio; construcción, operación y mantenimiento; además del abandono al término de la vida útil de la obra.

**2) Fase 2. Predicción.** Consiste en vaticinar la naturaleza y extensión de los impactos ambientales potenciales de las actividades identificadas. Requiere del conocimiento exacto del significado de los impactos.

**3) Fase 3. Evaluación.** Examinar los impactos ambientales de manera cuantitativa y cualitativa. El conocimiento de la naturaleza y la dimensión de un impacto permite decidir respecto a las siguientes alternativas:

- Diseñar medidas de prevención y/o mitigación de impactos
- Buscar una nueva alternativa de ejecución del proyecto que provoque menos impactos adversos para el ambiente.

- **Tercera etapa.** En ella se formulan y plantean medidas de prevención, control y mitigación de los efectos adversos que el proyecto puede producir en el ambiente, de acuerdo con lo establecido en la segunda etapa. Las medidas de mitigación pueden ser de control, compensación y restauración.

- **Cuarta etapa.** Los resultados del estudio se comunican en la Manifestación de Impacto Ambiental que es el documento mediante el cual se da a conocer, con base en estudios, el impacto ambiental significativo y potencial que generaría una obra o actividad, así como la forma de evitarlo o atenuarlo en caso de que resulte adverso para el medio.

La Figura 7.1 muestra las etapas que integran un estudio de impacto ambiental. Un esquema explicativo respecto al impacto ambiental se presenta en la Figura 7.2

Las alteraciones en el ambiente pueden ser producto de fenómenos naturales o de actividades humanas. A manera de ejemplo de impactos debidos a causas naturales en los suelos se pueden citar los siguientes: las precipitaciones pluviales con intensidad tal que producen escurrimientos que erosionan el suelo; los fenómenos sísmicos que provocan fisuras, agrietamiento, fallas, etc., en la estructura del suelo o de la roca y que además pueden modificar propiedades como su permeabilidad y humedad.

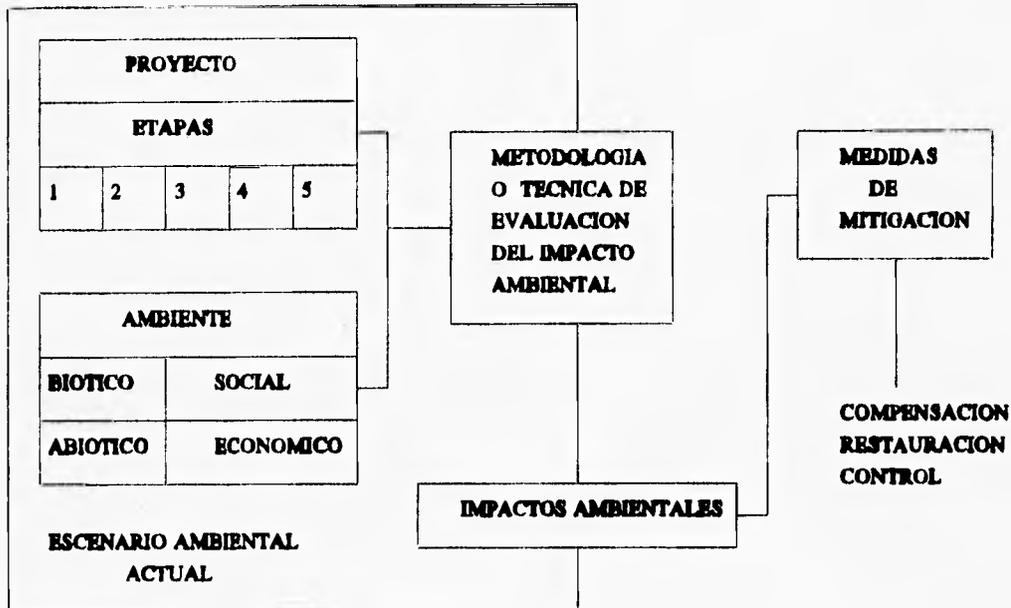


Fig. 7.1 Etapas en el desarrollo de un estudio de impacto ambiental

Los impactos provocados por el hombre se derivan de la utilización que hace de los recursos naturales, muchas veces de manera irracional; las comunidades en las que el ser humano se ha establecido requieren de grandes cantidades de agua para satisfacer diferentes necesidades y a su vez generan aguas residuales producto de la utilización del agua potable. Además debe considerarse que el intenso crecimiento que requieren los países en vías de desarrollo, como lo es México, demanda el abasto seguro y confiable de agua para tales usos y consecuentemente se producen aguas residuales de origen doméstico, industrial, agropecuario, de retorno agrícola, etc. Las aguas residuales son todas aquellas aguas potables o de primer uso a las que se han añadido elementos que modifican su composición natural y que alteran su calidad original.

La disposición de las aguas residuales se ha llevado a cabo mediante el vertido de éstas a cuerpos de agua superficiales o a terrenos en los que se pretende que ocurra la evaporación de una parte de las aguas además de la infiltración y percolación del volumen restante a través del suelo, hasta alcanzar al agua subterránea; esta disposición también se ha efectuado mediante la inyección en pozos profundos.

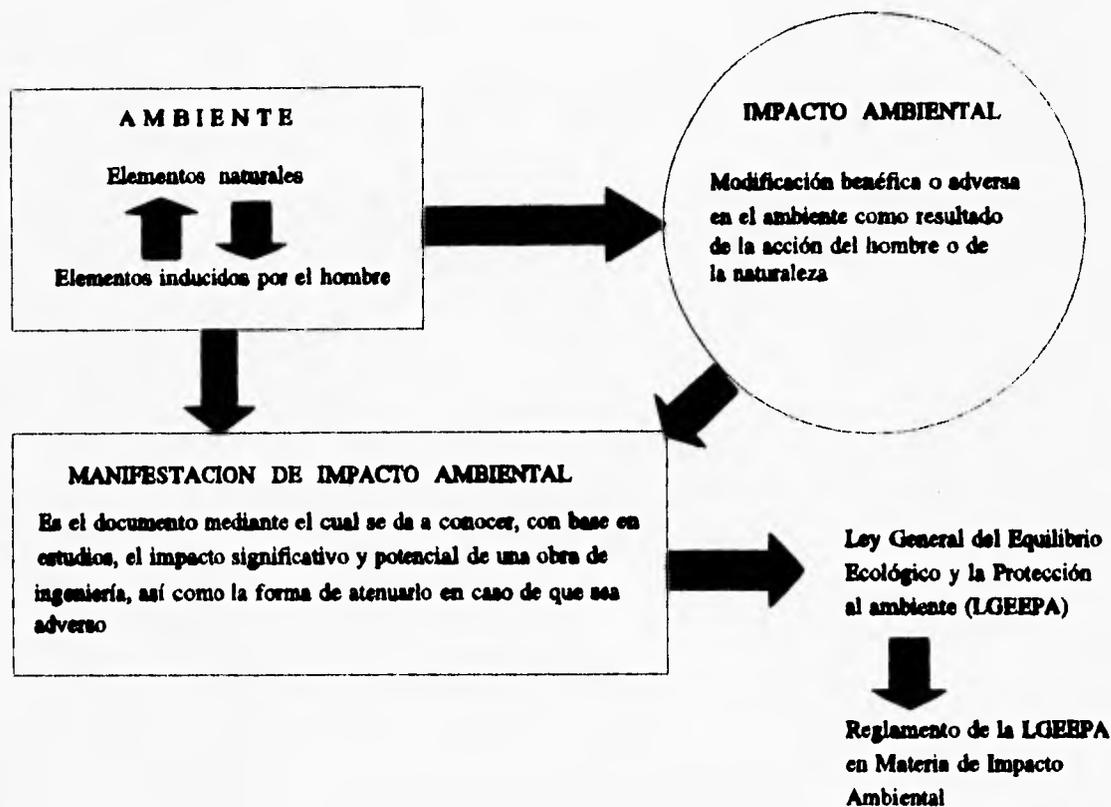


Figura 7.2 Estudio de impacto ambiental

En México, como en muchos otros países, se tienen serios problemas respecto a la obtención, aprovechamiento y uso del agua, además de las dificultades que representa su disposición después de haber sido utilizada. La falta de conciencia y el desinterés ha provocado el vertido irracional de aguas residuales en cuerpos de agua cuya capacidad de autopurificación se ha visto disminuida ante la excesiva cantidad de contaminantes depositadas en ellos; esto ha traído como consecuencia el deterioro de grandes volúmenes de aguas superficiales e incluso subterráneas. Además debe considerarse que en nuestro país es práctica común aplicar las aguas residuales crudas, es decir, sin previo tratamiento y que cuando llegan a someterse a algún tipo de tratamiento, éste resulta ser insuficiente e inadecuado para los fines que se persiguen.

Los residuos líquidos deben ser tratados antes de su disposición final en cuerpos de agua debido a que el consumo de aguas contaminadas por los humanos y los demás seres vivos implica un enorme riesgo para su salud.

Ante esta situación surge la necesidad de evitar contaminar los cuerpos de agua superficial y subterráneos; una herramienta importante de planeación para lograr este propósito es la

elaboración de un estudio de impacto ambiental y el cumplimiento de las recomendaciones que en la manifestación de impacto ambiental se propongan. Además de ello es necesario contar con diferentes procesos de depuración de aguas servidas.

## 7.2 Clasificación de metodologías para el estudio de impacto ambiental

Las técnicas de análisis de impactos ambientales tienen como finalidad cubrir las fases de identificación, predicción y evaluación, además de comunicar los resultados en una Manifestación de Impacto Ambiental.

Los principales procedimientos para realizar el estudio se enlistan a continuación:

- Procedimientos pragmáticos
- Sobreposiciones
- Listas de verificación
- Matrices
- Redes
- Modelos

**a) Procedimientos pragmáticos.** Consisten en la reunión o integración de especialistas en diferentes disciplinas para identificar impactos en cada área (flora, fauna, contaminación, sociedad, economía, etc.), buscando satisfacer los requerimientos de la legislación ambiental del sitio de estudio en cuanto a la evaluación de impactos.

**b) Sobreposiciones.** Es el empleo de una serie de mapas transparentes que se pueden sobreponer para caracterizar el ambiente regional con la distribución de las obras del proyecto. Permite localizar factores limitativos para determinados usos y conocer los factores del ambiente que pueden resultar más afectados.

**c) Listas de verificación.** Se fundamentan en la selección y evaluación de impactos que puedan presentarse al ejecutar cualquier actividad de un proyecto. Para tal fin los analistas hacen uso de una lista maestra de factores ambientales y/o impactos. Se trata de una actividad interdisciplinaria, pues en ella intervienen diferentes profesionales.

**d) Matrices.** Son listas de verificación en las que se relacionan las posibles actividades de un proyecto y los factores ambientales que pueden ser impactados. En ellas se identifican las posibles interacciones entre el proyecto y el ambiente, por lo que es posible definir las acciones que producen más de un impacto y los factores ambientales que se verán afectados por más de una acción. Cuando se sigue esta técnica es posible utilizar una escala de calificación cuantitativa o cualitativa que indique la magnitud del impacto, así por ejemplo:

Nomenclatura:

- a.- Adverso poco significativo
- A.- Adverso significativo
- b.- Benéfico poco significativo
- B.- Benéfico significativo
- \.- Mitigable

Las listas de verificación se emplean en las matrices de causa-efecto para identificar los impactos causados por las diferentes actividades de un proyecto. Cada proyecto en particular tiene una matriz específica.

e) **Redes.** En ellas se amplían las matrices al introducir una red de causa-condición-efecto lo que permite la identificación de impactos acumulativos e indirectos.

f) **Modelos.** Los modelos son representaciones matemáticas de diversos fenómenos físicos. Mediante ellos es posible conocer las concentraciones de contaminantes esperadas bajo determinadas circunstancias.

En los capítulos 3, 4, 5 y 6 de este trabajo se han descrito las características del proyecto de los diferentes sistemas de tratamiento en suelos, que corresponde a la primera etapa de un estudio de impacto ambiental.

A continuación se presentan listas de verificación en las que se identifican impactos ambientales generados por los distintos sistemas de tratamiento de aguas residuales que utilizan el suelo como medio de depuración, considerando dentro de tales listas aquellos factores ambientales susceptibles de ser impactados. Las matrices de evaluación de impactos ambientales se han desarrollado para cada sistema en particular. Más adelante, en este mismo capítulo se da una breve explicación de éstas.

### 7.3 Listas de verificación de impactos

En el Cuadro 7.1 se presenta una lista de verificación en la que se han agrupado los factores ambientales en seis conjuntos, que son: transformación del terreno, uso del suelo, hidrología, calidad del aire, condiciones biológicas y aspectos socio-económicos. Para cada sistema de tratamiento de aguas en suelos se identifican aquellos factores ambientales que pueden resultar impactados; hasta este nivel no se señalan las características de los impactos, por ejemplo si se trata de un impacto benéfico o adverso, si es temporal o permanente, mitigable o no mitigable, etc.

Como resultado de la elaboración de este listado se observa que los sistemas de aplicación de lodos registran un total de 26 impactos en los diferentes factores ambientales que se han considerado. Los sistemas de irrigación, infiltración y de escurrimiento superficial reportan 23, 22 y 20 impactos, respectivamente. Sin embargo, como aún no se ha realizado una caracterización de impactos, no es posible en esta fase del análisis establecer un juicio respecto a qué clase de sistema de depuración es más apropiado en cuanto a las modificaciones que pueden provocar en el ambiente. La utilidad de este listado es que sirve como base para la elaboración de las matrices de evaluación de impactos ambientales que se presentan más adelante, en este mismo capítulo.

Cuadro 7.1

LISTA DE VERIFICACION DE IMPACTOS AMBIENTALES

| FACTORES AMBIENTALES  | SISTEMAS DE TRATAMIENTO EN SUELOS |              |                           |                     |
|---|-----------------------------------|--------------|---------------------------|---------------------|
|   | Irrigación                        | Infiltración | Escurrimiento superficial | Aplicación de lodos |
| <b>A. TRANSFORMACION DEL TERRENO</b>                                      |                                   |              |                           |                     |
| 1. Propiedades agronómicas  |                                   |              |                           |                     |
| 2. Estabilidad de taludes (riesgo de deslizamiento de tierra)             |                                   |              |                           |                     |
| 3. Disminución de la permeabilidad del suelo por obturación en sus poros  |                                   |              |                           |                     |
| 4. Erosión  |                                   |              |                           |                     |
| 5. Sedimentación y precipitación  |                                   |              |                           |                     |
| 6. Sismos (Esfuerzo-deformación)  |                                   |              |                           |                     |
| 7. Inundación   |                                   |              |                           |                     |
| <b>B. USO DEL SUELO</b>   |                                   |              |                           |                     |
| 1. Espacio abierto  |                                   |              |                           |                     |
| 2. Agrícola   |                                   |              |                           |                     |
| 3. Forestal   |                                   |              |                           |                     |
| <b>C. HIDROLOGIA</b>  |                                   |              |                           |                     |
| 1. Calidad del agua superficial   |                                   |              |                           |                     |
| 2. Calidad del agua subterránea   |                                   |              |                           |                     |
| 3. Recarga de cuerpos y corrientes de agua subterráneas y/o superficiales |                                   |              |                           |                     |
| 4. Drenaje natural y/o artificial del terreno                             |                                   |              |                           |                     |
| <b>D. CALIDAD DEL AIRE</b>  |                                   |              |                           |                     |
| 1. Oxidos (azufre, carbono, nitrógeno)                                    |                                   |              |                           |                     |
| 2. Aerosoles  |                                   |              |                           |                     |
| 3. Partículas suspendidas   |                                   |              |                           |                     |
| 4. Olores   |                                   |              |                           |                     |
| 5. Gases  |                                   |              |                           |                     |

Cuadro 7.1 (Continuación)

LISTA DE VERIFICACION DE IMPACTOS AMBIENTALES

| FACTORES AMBIENTALES                                      | SISTEMAS DE TRATAMIENTO EN SUELOS |              |                              |                     |
|---|-----------------------------------|--------------|------------------------------|---------------------|
|   | Irrigación                        | Infiltración | Escorrentamiento superficial | Aplicación de lodos |
| <b>E. CONDICIONES BIOLÓGICAS</b>                          |                                   |              |                              |                     |
| 1. Fauna  |                                   |              |                              |                     |
| 2. Vegetación (árboles, matorrales, arbustos, pastizales) |                                   |              |                              |                     |
| 3. Sembradíos   |                                   |              |                              |                     |
| <b>F. CONDICIONES SOCIOECONÓMICAS</b>                     |                                   |              |                              |                     |
| 1. Empleo   |                                   |              |                              |                     |
| 2. Sistemas de transporte                                 |                                   |              |                              |                     |
| 3. Actitud de la comunidad hacia el proyecto              |                                   |              |                              |                     |
| 4. Efectos en la salud pública                            |                                   |              |                              |                     |

Número de impactos registrados                      19                      20                      15                      22



SIN IMPACTO



CON IMPACTO

#### 7.4 **Matriz de evaluación de impactos ambientales**

En este apartado se han elaborado una serie de matrices para cada uno de los sistemas de tratamiento en suelos en estudio y se muestran en los Cuadros 7.2 a 7.5. En estas matrices se relacionan las diferentes actividades de un proyecto con los elementos y características ambientales que pueden ser impactados por la ejecución de tales actividades. Además se determinan las características de los impactos y se da una evaluación sencilla de los mismos. A manera de explicación de estas matrices, en el Cuadro 7.2, para la estructura y propiedades físicas del suelo (que se encuentra en la columna de elementos ambientales susceptibles de ser impactados), en la columna No.1 se marca la celda correspondiente a la subcolumna A con un óvalo; esto significa que se trata de un impacto de tipo adverso según se indica en la nomenclatura inferior. Para saber qué actividades del proyecto ocasionan tal impacto, se lee en la columna 7 el número correspondiente a dichas actividades; en este caso el óvalo indicado no tiene ningún subíndice, por lo que se entiende que todas las actividades señaladas en la columna 7 generan el impacto. En el caso de los óvalos a los que se les ha colocado un subíndice, éste indica el número de la actividad que ocasiona tal modificación al ambiente; así, por ejemplo: en el Cuadro 7.2 para las propiedades agronómicas del suelo los conceptos de trabajo 1 y 2 tienen como consecuencia un impacto adverso y las actividades 3, 4, 5 y 6 provocan una alteración benéfica al medio. De esta manera se han desarrollado cada una de las matrices que se muestran en las páginas siguientes.

**TESIS SIN PAGINACION**

**COMPLETA LA INFORMACION**

Cuadro 7.2

**MATRIZ DE EVALUACION DE IMPACTOS AMBIENTALES**

| SISTEMAS DE IRRIGACION   |  | ACTIVIDADES EN EVALUACION:   |                    |                |   |   |   |   |    |               |    |                        |    |    |                                 |
|--|--|--|--------------------|----------------|---|---|---|---|----|---------------|----|------------------------|----|----|---------------------------------|
|  |  | 1. Preparación del terreno*<br>2. Construcción de la red de drenaje<br>3. Instalación de equipo de aspersión<br>4. Formación de surcos o bordos para riego superficial<br>5. Riego por aspersión<br>6. Riego superficial (por surcos o por inundación) |                    |                |   |   |   |   |    |               |    |                        |    |    |                                 |
| ELEMENTOS Y CARACTERISTICAS AMBIENTALES SUSCEPTIBLES DE SER IMPACTADOS |  | CARACTERISTICAS DE LOS IMPACTOS  |                    |                |   |   |   |   |    | DETERMINACION |    | EVALUACION EN MAGNITUD |    |    | ACTIVIDAD QUE GENERA EL IMPACTO |
|  |  | 1  |                    | 2              |   | 3 |   | 4 |    | 5             |    | 6                      |    |    | 7                               |
|  |  | B  | A                  | D              | I | T | P | R | Ir | M             | NM | Ba                     | Me | Al | NUMERO DE ACTIVIDAD             |
| F<br>I<br>S<br>I<br>C<br>O<br>S  | Estructura y propiedades físicas del suelo |  | •                  | •              |   | • |   | • |    | •             |    | •                      |    |    | 1,5,6                           |
|  | Propiedades agronómicas del suelo          | •  | • <sub>1,2,4</sub> |                | • |   | • |   | •  |               | •  |                        | •  |    | 1,2,5,6                         |
|  | Calidad del agua subterránea               | •  |                    |                | • | • |   | • |    |               |    | •                      |    |    | 5,6                             |
|  | Calidad del agua superficial               | •  |                    |                | • | • |   | • |    |               |    |                        | •  |    | 5,6                             |
|  | Drenaje del terreno                        |  | •                  |                | • | • |   | • |    | •             |    | •                      |    |    | 5,6                             |
|  | Calidad del aire                           |  | •                  | • <sub>5</sub> | • | • |   | • |    | •             |    | •                      |    |    | 1,5                             |
|  | Calidad del agua tratada                   | •  |                    | •              |   |   |   |   |    |               |    |                        |    | •  | 5,6                             |

Nomenclatura:

B = Benéfico    D = Directo    T = Temporal    R = Reversible    M = Mitigable    Ba = Bajo  
 A = Adverso    I = Indirecto    P = Permanente    Ir = Irreversible    NM = No mitigable    Me = Medio  
 Al = Alto

Notas:

\* Incluye desmonte, nivelación, excavación, relleno y reposición de capa vegetal

Cuadro 7.2 (Continuación)

**MATRIZ DE EVALUACION DE IMPACTOS AMBIENTALES**

| SISTEMAS DE IRRIGACION   |                             | ACTIVIDADES EN EVALUACION:   |   |   |   |   |   |  |    |               |    |                        |    |    |                                 |
|--|-----------------------------|--|---|---|---|---|---|--|----|---------------|----|------------------------|----|----|---------------------------------|
|  |                             | 1. Preparación del terreno*<br>2. Construcción de la red de drenaje<br>3. Instalación de equipo de aspersión |   |   |   |   |   | 4. Formación de surcos o bordos para riego superficial<br>5. Riego por aspersión<br>6. Riego superficial (por surcos o inundación) |    |               |    |                        |    |    |                                 |
| ELEMENTOS Y CARACTERISTICAS AMBIENTALES SUSCEPTIBLES DE SER IMPACTADOS |                             | CARACTERISTICAS DE LOS IMPACTOS  |   |   |   |   |   |  |    | DETERMINACION |    | EVALUACION EN MAGNITUD |    |    | ACTIVIDAD QUE GENERA EL IMPACTO |
|  |                             | 1  |   | 2 |   | 3 |   | 4  |    | 5             |    | 6                      |    |    | 7                               |
|  |                             | B  | A | D | I | T | P | R  | Ir | M             | NM | Ba                     | Me | Al | NUMERO DE ACTIVIDAD             |
| BIOLOGICOS   | Cultivos                    | •  |   | • |   | • |   |  |    |               |    |                        |    | •  | 5,6                             |
| SOCIO-ECONOMICOS   | Generación de empleos       | •  |   | • |   | • |   |  |    |               |    | •                      |    |    | 1,2,3,4,5,6                     |
|  | Efectos en la salud pública |  | • |   | • |   |   |  |    | •             |    | •                      |    |    | 5,6                             |
|  | Propagación de malos olores |  | • | • |   | • |   | •  |    | •             |    | •                      |    |    | 5,6                             |

Nomenclatura:

B = Benéfico    D = Directo    T = Temporal  
 A = Adverso    I = Indirecto    P = Permanente

R = Reversible    M = Mitigable  
 Ir = Irreversible    NM = No mitigable

Ba = Bajo  
 Me = Medio  
 Al = Alto

Notas:

\* Incluye desmonte, nivelación, excavación, relleno y reposición de capa vegetal

Cuadro 7.3

**MATRIZ DE EVALUACION DE IMPACTOS AMBIENTALES**

| SISTEMAS DE INFILTRACION   |  | ACTIVIDADES EN EVALUACION:                     |                  |   |   |   |                  |   |                         |                  |    |                        |    |    |                                 |
|--|--|--|------------------|---|---|---|------------------|---|-------------------------|------------------|----|------------------------|----|----|---------------------------------|
|  |  | 1. Preparación del terreno*                    |                  |   |   |   |                  |   | 5. Aspersión            |                  |    |                        |    |    |                                 |
|  |  | 2. Construcción de estanques de infiltración** |                  |   |   |   |                  |   | 6. Periodos de descanso |                  |    |                        |    |    |                                 |
| ELEMENTOS Y CARACTERISTICAS AMBIENTALES SUSCEPTIBLES DE SER IMPACTADOS |  | CARACTERISTICAS DE LOS IMPACTOS                |                  |   |   |   |                  |   |                         | DETERMINACION    |    | EVALUACION EN MAGNITUD |    |    | ACTIVIDAD QUE GENERA EL IMPACTO |
|  |  | 1  |                  | 2 |   | 3 |                  | 4 |                         | 5                |    | 6                      |    |    | 7                               |
|  |  | B  | A                | D | I | T | P                | R | Ir                      | M                | NM | Ba                     | Me | Al | NUMERO DE ACTIVIDAD             |
| F  | Estructura y propiedades físicas del suelo | ●  | ●                | ● | ● | ● |                  | ● |                         | ●                |    | ●                      |    |    | 1,2,3,4,6                       |
| I  | Propiedades agronómicas del suelo          |  | ●                |   | ● | ● |                  | ● |                         | ●                |    | ●                      |    |    | 1,2,3                           |
| S  | Calidad del agua subterránea               | ●  | ● <sub>4,5</sub> |   | ● | ● | ● <sub>4,5</sub> |   | ● <sub>4,5</sub>        | ● <sub>4,5</sub> |    | ●                      |    |    | 4,5,6,7                         |
| I  | Calidad del agua superficial               | ●  | ● <sub>4,5</sub> |   | ● | ● |                  | ● |                         | ●                |    | ●                      |    |    | 4,5,6,7                         |
| C  | Drenaje del terreno                        | ●  | ● <sub>4,5</sub> | ● |   | ● |                  | ● |                         | ●                |    |                        | ●  |    | 4,5,6                           |
| O  | Calidad del aire                           | ●  | ● <sub>4,5</sub> |   | ● | ● |                  | ● |                         | ●                |    | ●                      |    |    | 4,5,6                           |
| S  | Calidad del agua tratada                   | ●  |                  | ● |   |   | ●                | ● |                         |                  |    |                        |    | ●  | 4,5,6,7                         |

Nomenclatura:

- B = Benéfico    D = Directo    T = Temporal    R = Reversible    M = Mitigable    Ba = Bajo    \* Incluye desmonte, nivelación, excavación, relleno y reposición de capa vegetal  
 A = Adverso    I = Indirecto    P = Permanente    Ir = Irreversible    NM = No mitigable    Me = Medio    \*\* Comprende la remoción de la capa orgánica superficial, formación de bordos y el recubrimiento del suelo de los estanques con hierba  
 Al = Alto

Cuadro 7.3 (Continuación)

**MATRIZ DE EVALUACION DE IMPACTOS AMBIENTALES**

| SISTEMAS DE INFILTRACION |                             | ACTIVIDADES EN EVALUACION:  |   |   |   |   |   |   |  |               |   |                        |  |    |                                 |   |  |    |  |    |  |  |    |   |   |    |           |           |                     |
|--------------------------|-----------------------------|---|---|---|---|---|---|---|--|---------------|---|------------------------|--|----|---------------------------------|---|--|----|--|----|--|--|----|---|---|----|-----------|-----------|---------------------|
|                          |                             | 1. Preparación del terreno<br>2. Construcción de estanques de infiltración<br>3. Construcción de la red de drenaje<br>4. Vertido en estanques |   |   |   |   |   |   | 5. Aspersión<br>6. Periodos de descanso<br>7. Recuperación del agua renovada |               |   |                        |  |    |                                 |   |  |    |  |    |  |  |    |   |   |    |           |           |                     |
|                          |                             | CARACTERISTICAS DE LOS IMPACTOS   |   |   |   |   |   |   |  | DETERMINACION |   | EVALUACION EN MAGNITUD |  |    | ACTIVIDAD QUE GENERA EL IMPACTO |   |  |    |  |    |  |  |    |   |   |    |           |           |                     |
|                          |                             | 1   |   | 2 |   | 3 |   | 4 |  | 5             |   | 6                      |  |    | 7                               |   |  |    |  |    |  |  |    |   |   |    |           |           |                     |
| B                        |                             | A   |   | D |   | I |   | T |  | P             |   | R                      |  | Ir |                                 | M |  | NM |  | Ba |  |  | Me |   |   | Al |           |           | NUMERO DE ACTIVIDAD |
| BIOLOGICOS               | Fauna                       |   | • |   |   | • | • |   |  |               |   |                        |  | •  |                                 |   |  |    |  | •  |  |  |    |   |   |    | 1,2,3,4,5 |           |                     |
|                          | Cultivos                    | •   |   |   |   | • |   |   |  | •             | • |                        |  |    |                                 |   |  |    |  |    |  |  |    |   | • |    |           | 7         |                     |
| SOCIO-ECONOMICOS         | Generación de empleos       | •   |   |   | • |   |   | • |  |               |   |                        |  |    |                                 |   |  |    |  |    |  |  |    | • |   |    |           | 1,2,3,4,5 |                     |
|                          | Efectos en la salud pública |   |   | • |   |   |   | • | •  |               |   |                        |  |    | •                               |   |  |    |  |    |  |  |    | • |   |    |           | 4,5       |                     |
|                          | Propagación de malos olores |   |   | • |   | • |   |   | •  |               |   |                        |  |    | •                               |   |  |    |  |    |  |  |    | • |   |    |           | 4,5       |                     |

Nomenclatura:

B = Benéfico    D = Directo    T = Temporal    R = Reversible    M = Mitigable    Ba = Bajo  
 A = Adverso    I = Indirecto    P = Permanente    Ir = Irreversible    NM = No mitigable    Me = Medio  
 Al = Alto

Notas:

\* Incluye desmonte, nivelación, excavación, relleno y reposición de capa vegetal  
 \*\* Comprende la remoción de la capa orgánica superficial, formación de bordos y el recubrimiento del suelo de los estanques con hierba.



Cuadro 7.4 (Continuación)

**MATRIZ DE EVALUACION DE IMPACTOS AMBIENTALES**

| SISTEMAS DE ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL                                  |                             | ACTIVIDADES EN EVALUACION:  |   |   |   |   |   |   |    |               |    |                        |    |    |                                 |
|--|-----------------------------|---|---|---|---|---|---|---|----|---------------|----|------------------------|----|----|---------------------------------|
|  |                             | 1. Preparación del terreno*      4. Aplicación por aspersión<br>2. Construcción de zanjas de recolección**      5. Recolección del efluente<br>3. Aplicación superficial*** |   |   |   |   |   |   |    |               |    |                        |    |    |                                 |
|  |                             | CARACTERISTICAS DE LOS IMPACTOS   |   |   |   |   |   |   |    | DETERMINACION |    | EVALUACION EN MAGNITUD |    |    | ACTIVIDAD QUE GENERA EL IMPACTO |
| ELEMENTOS Y CARACTERISTICAS AMBIENTALES SUSCEPTIBLES DE SER IMPACTADOS |                             | 1   |   | 2 |   | 3 |   | 4 |    | 5             |    | 6                      |    |    | 7                               |
|  |                             | B   | A | D | I | T | P | R | Ir | M             | NM | Ba                     | Me | Al | NUMERO DE ACTIVIDAD             |
| BIOLOGICOS   | Fauna                       |   | ● |   | ● | ● |   | ● |    | ●             |    | ●                      |    |    | 1,2,3,4                         |
|  | Cultivos                    | ●   |   |   | ● |   | ● | ● |    |               |    |                        |    | ●  | 5                               |
| SOCIO-ECONOMICOS   | Generación de empleos       | ●   |   | ● |   | ● |   | ● |    |               |    |                        | ●  |    | 1,2,3,4                         |
|  | Efectos en la salud pública |   | ● |   | ● | ● |   | ● |    | ●             |    | ●                      |    |    | 4                               |
|  | Propagación de malos olores |   | ● | ● |   | ● |   | ● |    | ●             |    | ●                      |    |    | 3,4                             |

Nomenclatura:

B = Benéfico      D = Directo      T = Temporal      R = Reversible      M = Mitigable      Ba = Bajo  
 A = Adverso      I = Indirecto      P = Permanente      Ir = Irreversible      NM = No mitigable      Me = Medio  
 Al = Alto

Notas:

\* Incluye la cobertura del terreno con árboles o plantas, nivelación e igualación, formación de terrazas  
 \*\* Ubicadas en la parte baja de las terrazas  
 \*\*\* Mediante el uso de canales con compuertas o de tuberías con orificios o válvulas. Comprende el escurrimiento del agua residual por las terrazas





Mediante el estudio de los capítulos anteriores de este trabajo, se ha enfatizado que puede conseguirse la depuración de las aguas residuales al aplicarlas en el terreno; además de los beneficios que este tipo de disposición proporciona cuando se realiza de manera controlada para riego de los cultivos; sin embargo su uso inadecuado o sin respetar las tasas de aplicación sugeridas y las concentraciones de contaminantes permitidas puede ocasionar severos daños a la salud humana y animal, a la capacidad productiva del suelo, a las propiedades físicas y características generales de este medio; a los cultivos y a la calidad de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

De acuerdo a lo anterior resulta necesario analizar los efectos que causa la aplicación de las aguas residuales al sistema suelo-planta-animal-hombre. Este análisis se muestra en las matrices de evaluación de impactos ambientales anteriormente presentadas.

#### 7.4.1 Impactos ocasionados por los sistemas de irrigación

El riego con aguas residuales es una actividad que puede resultar benéfica para mejorar la productividad de los cultivos y darle un reuso a las aguas negras; la construcción, puesta en marcha y operación de un sistema de irrigación genera empleos de manera temporal (durante la construcción) y permanente (a lo largo de la vida útil de la obra), lo que significa un impacto socio-económico benéfico. Sin embargo, puede ocasionar también daños a distintos factores del ambiente, entre los que es posible mencionar a: la estructura, propiedades físicas y agronómicas del suelo; la calidad de los depósitos y corrientes de agua superficial y subterránea; el drenaje del terreno, la calidad del aire, etc. Pueden tener lugar afectaciones en la fauna y en la flora, además de las implicaciones en el aspecto socio-económico, entre las que se puede citar la generación de empleos, perjuicios en la salud pública, en aspectos estéticos, propagación de malos olores, etc. En la matriz de evaluación de impactos ambientales correspondiente al sistema de irrigación (Cuadro 7.2) se presenta un análisis de las alteraciones en el ambiente provocadas por las diferentes actividades que comprende la construcción, operación y mantenimiento de un sistema de depuración de aguas negras a través del suelo por medio de irrigación.

Con la finalidad de profundizar sobre los efectos que la irrigación con aguas residuales puede provocar en el ambiente, se estudia a continuación la importancia de la presencia de algunos de los constituyentes más importantes de este tipo de líquidos.

**Sales Disueltas.** Generalmente las aguas residuales presentan elevadas concentraciones de sales. La presencia de éstas en las aguas negras se debe principalmente a su uso municipal e industrial, además de la aportación de sales minerales que proporcionan los suelos al agua. La concentración de sales se ve incrementada por los niveles bajos de remoción de este contaminante en los sistemas de tratamiento. Las sales se acumulan en los primeros centímetros de suelo cuando el contenido de sales en el agua residual es alto y hay poco sodio (Na). Atendiendo al contenido de sales (como sulfatos y cloruros) y de álcalis (carbonato o bicarbonato de sodio) se puede clasificar a los suelos salinos de la siguiente manera:

- Suelos salinos. Contienen sales neutras (como los iones  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ) o ligeramente ácidas (ion  $\text{Mg}^{++}$ )
- Suelos salino-alcálicos. La salinidad se debe a una mezcla de sales neutras con

bicarbonatos de sodio (iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{HCO}_3^-$ ). El pH de estas sales es generalmente menor de 8.5. En caso de que las sales neutras se infiltren se incrementa la toxicidad del sodio en relación con las plantas lo que resulta perjudicial para el suelo

- Suelos alcalinos. Contienen carbonatos de sodio (iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{CO}_3^{2-}$ ), los que constituyen la fuente principal de álcali. Presentan pH mayores a 8.5, hasta 10 unidades. Estos suelos se caracterizan por ser arcillosos y presentan problemas ya que con una gran cantidad de sales la arcilla se hincha y se hace aún más impermeable. La alcalinidad de un suelo provoca que exista en él un drenaje pobre; es posible cubrirlo con una capa de yeso (sulfato de calcio) para disminuir la alcalinidad, pero el contenido de sodio ( $\text{Na}^+$ ) se conservará en concentraciones excesivas para las plantas.

El exceso de sales afecta a los cultivos debido a que disminuye la cantidad de agua disponible al incrementar la presión osmótica de los suelos; la presión osmótica es la tendencia de una solución a retener agua o a absorberla de otra solución menos concentrada. Pueden presentarse problemas de toxicidad en las plantas dependiendo de los tipos de sales que se encuentren presentes, lo que ocurre principalmente en sales que contienen sodio ( $\text{Na}^+$ ) y cloro ( $\text{Cl}^-$ ). La acumulación desmedida de sales en el agua de irrigación o en el suelo puede provocar grave deterioro a las plantas como el que su follaje adquiere una tonalidad verde azulado y no el verde brillante que caracteriza a la vegetación sana; los cultivos pueden sobrevivir a las sales en demasía, pero disminuye su productividad.

Los efectos adversos dependen del tipo de sal de que se trate y de su concentración en las películas del líquido que moja las partículas de suelo que están en contacto con las raíces de las plantas. La distribución de las sales en la superficie comprendida por el terreno es irregular, por lo que en los sitios con drenaje pobre, el álcali se acumula en grandes cantidades y llega a formar una capa de color blanco o negro; algunas plantas mueren y en su lugar se desarrollan malezas resistentes a las sales.

Los dos iones que constituyen la sal común son tóxicos (es decir que deterioran en forma visible a las plantas y pueden afectar a los animales), al tener una concentración mayor a valores determinados; de esta manera, si después de secar una muestra de suelo en un horno a  $105^\circ\text{C}$  se determina un contenido mayor al 5% de  $\text{Na}^+$  o  $\text{Cl}^-$  se presentarán efectos indeseables en la vegetación debidos al exceso de sales, como por ejemplo: presencia de un borde pardo en las hojas, lo que es indicativo de tal alteración, así como una reducción hasta del 50% en la productividad de los sembradíos. Un suelo que contenga este tipo de compuestos en demasía debe ser drenado de manera artificial, mediante el lavado del mismo, intentando con ello atenuar los efectos adversos provocados por esa circunstancia.

El álcali es un agente tóxico que provoca serios males a los sembradíos al encontrarse contenido en el suelo; el álcali negro está compuesto por carbonato de calcio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Al encontrarse en estado puro el color del álcali es blanco y si contiene materia orgánica adquiere un color negro, es por ello que en los suelos que no tienen un buen drenaje se forma una película de color blanco o negro. El álcali deteriora los cultivos e impide que éstos asimilen calcio.

La manera en que un suelo arcilloso se deteriora por la acción de la sal es mediante el desplazamiento del calcio; el sodio de la sal común penetra en la arcilla y el calcio se separa y se

filtra con el agua. Los suelos afectados por el sodio se constituyen en lodos al estar mojados y se vuelven muy duros en estado seco. El agua de lluvia no penetra en este tipo de suelos, tanto por la naturaleza impermeable de la arcilla como por el exceso de sodio; entonces las plantas mueren por no contar con la humedad suficiente y por un débil crecimiento de las raíces. A este tipo de suelos puede aplicárselos calcio en forma de yeso, piedra caliza o cloruro de calcio.

Por otra parte, cuando en las aguas residuales se tiene una concentración de sales relativamente baja y un contenido excesivo de sodio ( $\text{Na}^+$ ), de carbonatos ( $\text{CO}_3$ ) o de bicarbonatos ( $\text{HCO}_3$ ), tiene lugar una excesiva acumulación de sodio en el suelo, el que ocupa el lugar de concentraciones de calcio (Ca) y de magnesio (Mg) lo que provoca la dispersión o defloculación del suelo. Al dispersarse el suelo, su estructura resulta dañada y disminuye la permeabilidad al aire y al agua. Esto a su vez, conduce a problemas de inundación, daños a las raíces de las plantas, compactación y formación de costras en la superficie del terreno, lo que impide el crecimiento de cultivos.

**Metales pesados en forma de elementos traza.** Los elementos a nivel de trazas son aquellos que normalmente se encuentran en las aguas residuales y en el suelo en concentraciones de unos cuantos miligramos por litro (mg/l). La principal fuente de aportación de estos elementos son las industrias; sin embargo, en México no se cuenta con sistemas de alcantarillado separados para las aguas residuales de origen doméstico y las industriales, sino que la colección y conducción de aguas residuales municipales e industriales se efectúa de manera conjunta, es por ello que las aguas efluentes del sistema de alcantarillado tienen incrementos considerables en las concentraciones de metales pesados. Los metales pesados se encuentran en cantidades elevadas en los lodos producto de las plantas de tratamiento de aguas residuales; la mayoría de las plantas de depuración de aguas negras en la Cd. de México descargan sus lodos residuales al alcantarillado municipal, esto provoca aún más problemas respecto a la concentración de metales pesados en las aguas residuales. Vale la pena comentar que la Norma Oficial Mexicana NOM-CCA-031-ECOL/1993 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales provenientes de la industria, actividades agroindustriales, de servicios y el tratamiento de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal; mediante esta norma se determinan las concentraciones máximas de contaminantes con las que deberán cumplir todas las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado; en la actualidad no todas las industrias y demás fuentes de descargas cumplen con estos valores, por lo que deben de pagar una multa cuya cantidad depende de qué tanto sobrepasan los niveles máximos permisibles y en un futuro cercano deben cumplir con los valores señalados en esta norma para continuar descargando sus aguas residuales. En caso de que el agua residual se vierta al terreno estando cruda, es decir sin haber recibido ningún tipo de tratamiento, aumenta también el contenido de metales pesados en el suelo.

La relación entre la disposición de metales pesados al suelo y su acumulación es directamente proporcional, esto implica que a mayor concentración de metales pesados es también mayor la acumulación de los mismos en el suelo. Por lo general, se concentran en los primeros 20 cm; ocurre una remoción de estos metales en el suelo, pero difícilmente llegan a removerse totalmente.

La importancia de la presencia de metales pesados en las aguas residuales se debe a los siguientes factores: posible acumulación en el suelo, fitotoxicidad y la capacidad de introducirse en

la cadena alimenticia y concentrarse (fenómeno de intensificación) hasta llegar al hombre, lo que puede ocurrir por el consumo de cultivos contaminados o de animales que se hayan alimentado de tales cultivos, o por la contaminación de acuíferos.

Entre los elementos que representan un mayor peligro para la salud del hombre y de los animales por su fitotoxicidad se encuentran: Cadmio (Cd), Pb (Plomo), Mercurio (Hg), As (Arsénico), Celio (Ce), Zinc (Zn), Cobalto (Co) y Níquel (Ni). Se distinguen el Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Níquel (Ni), Zinc (Zn) y Molibdeno (Mo). Estos elementos se incorporan con facilidad a las plantas representando un peligro para las cadenas alimenticias humana y animal; algunos elementos no llegan a integrarse en ellas, aunque sí ocasionan efectos nocivos debido a su fitotoxicidad, tal es el caso de: Cromo (Cr), Boro (B), Aluminio (Al), Manganeso (Mn), Arsénico (As), etc. En el Cuadro 7.6 se muestran algunos efectos y observaciones del consumo de agua que contenga metales pesados o diferentes compuestos.

Vale la pena mencionar que el boro en los suelos y en el agua de irrigación es tóxico para muchos cultivos, especialmente para los cítricos y los nogales. Una tonalidad castaña en las hojas de las plantas es indicativa de la presencia de este elemento en el agua residual con la que se irriga.

Gracias a diversos estudios se ha podido determinar que las aplicaciones de aguas residuales en el riego agrícola causan un incremento considerable en el contenido de metales pesados en el suelo y en la vegetación, aunque no se ha comprobado que influya en la acumulación o toxicidad en organismos superiores de la cadena alimenticia.

**Microorganismos patógenos.** El agua residual que se aplica al terreno, normalmente contiene una gran cantidad de microorganismos patógenos, tales como: virus, bacterias, protozoarios, hongos y huevecillos de helmintos. Existe el riesgo de transmisión de enfermedades infecciosas por el consumo de cultivos regados con aguas contaminadas; entre las enfermedades más comunes debidas a estas causas se cuentan la disentería bacilar y amibial, fiebre tifoidea, gastroenteritis, salmonelosis, cólera, hepatitis, ascariasis, etc. La reutilización de agua residual para el riego de cultivos, sin ninguna clase de tratamiento ha provocado diferentes enfermedades, e incluso estos organismos pueden sobrevivir al tratamiento, a la aplicación en el suelo y llegar a incorporarse a las cadenas alimenticias.

Los microorganismos que se remueven con relativa facilidad son las bacterias, que generalmente se depuran en gran cantidad en las plantas de tratamiento, además de que otros factores intervienen en su degradación como son: la luz del sol, secado del terreno, composición del suelo. El tiempo de sobrevivencia de las bacterias flúctua entre una y dos semanas. Los virus permanecen en el suelo y en la vegetación durante varias semanas o por meses; la luz solar y el secado del terreno contribuyen a su inactivación y eliminación. Los helmintos reportan tiempos de sobrevivencia más prolongados, que pueden alcanzar hasta tres años.

Cuadro 7.6

| <b>RIESGO DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS Y OTROS COMPUESTOS EN AGUA QUE PUEDA SER CONSUMIDA POR EL HOMBRE</b> |   |   |   |
|---|---|---|---|
| PARAMETRO   | GENERALIDADES   |   |   |
|   | Provenencia   | Efectos   | Observaciones   |
| Zinc  | Minas de zinc. Algunas veces en aguas superficiales, ya que se adhiere a los lodos.   | Ligero envenenamiento para 675-2000 mg/l. En concentraciones menores que 30 mg/l produce coloración de las aguas al calentarlas. Entre 6 y 20 mg/l cambia el sabor del agua; se forma una película ligera a partir de 5 mg/l.   | En caso de comprobarse que es sustancia cancerígena deberá restringirse su uso.                                   |
| Magnesio  |   | Influye en el sabor y la dureza   |   |
| Fenoles   | Productos de la industria del gas, petróleo y desinfectantes, hospitales.   | Para 0.05 mg/l se afecta el sabor. A partir de 0.002 mg/l producen olores fétidos. Provocan molestias al estómago e intestinos.   | La concentración límite no puede determinarse con exactitud, ya que en los análisis se usan sustancias fenólicas. |
| Hierro  | Aguas subterráneas, aguas residuales, tuberías.   | No hay daños graves al organismo. Provoca sabor y coloración de las aguas de pozos y filtros. Daños a las industrias de fabricación de papel y lechera.   | Concentraciones mayores de 0.1 mg/l producen incrustaciones en tuberías.  |
| Manganeso   | Aguas subterráneas, aguas residuales.   | Proporciona sabor y color; además de daños a la industria del vidrio y la celulosa.   | Menor que 0.05 mg/l.  |
| Cobre   | Planta de tratamiento de aguas residuales. Formaciones geológicas.  | No provoca problemas graves para la salud, 3 mg/día como máximo en los jóvenes, en mayores concentraciones ocasiona trastornos en la formación de la sangre. De 5-7 mg/l son los rangos para que afecten el sabor. 1 mg/l de sulfato de cobre (CuSO <sub>4</sub> ) evita la formación de algas en las albercas. |   |
| Plomo   | Aguas sin circulación (almacenada) en tanques y conductos.  | > eneno acumulativo. Ataca los huesos. Peligro de anemia en grandes concentraciones.  | No deben emplearse tuberías de plomo.   |
| Arsénico  | Aguas naturales estancadas, aguas residuales de industrias de fibras, insecticidas, celulosas.uede estar presente en peces. | Sustancia cancerígenas, concentraciones de 0.12 mg/l son mortales. Causa agrietamiento en manos y pies, pigmentación de la piel, alta tensión nerviosa y disturbios circulatorios.  | El arsénico no es asimilado por el intestino. Las estadísticas muestran intoxicaciones crecientes.                |
| Cromo hexavalente   | Industria siderúrgica, de celulosa, desperdicios del curtido de piel.   | 1 mg/l imparte sabor y color. En grandes concentraciones afecta a los riñones y los intestinos.   |   |

Fuente: Apuntes del Curso Proyectos de Sistemas de Abastecimiento de Aguas. División de Educación Continua. Facultad de Ingeniería, UNAM, 1986.

El riesgo de contaminación de los cultivos por el empleo de aguas residuales para el riego agrícola, es mayor cuando la superficie de las frutas y de los vegetales está en contacto con las aguas negras sin desinfectar, cuando las partes comestibles de las plantas se encuentran en contacto con el suelo o con el agua contaminada, cuando se utilizan cultivos con follaje denso en los que los microorganismos sobreviven más tiempo o en el caso en que se dañen las partes comestibles, es decir si la fruta o verdura ha sido golpeada y presenta rajaduras. El suelo también puede aportar microorganismos a los cultivos, por lo que debe estudiarse la concentración de patógenos en el suelo.

Deben considerarse también los impactos provocados por los aerosoles generados en los sistemas de riego por aspersión, que pueden transportar microorganismos a grandes distancias.

**Detergentes.** Los detergentes son sustancias que reducen la tensión superficial del agua en que se disuelven y que se encuentran en las aguas residuales en altas concentraciones, con valores mayores a 20 ppm (partes por millón).

Los detergentes del tipo aniónico son los más utilizados, de entre ellos es común el empleo del Alkil Bencil Sulfonato (ABS). Esta sustancia no es biodegradable, es por ello que en algunos países se prohíbe su uso, sin embargo en México se continúan utilizando.

Los detergentes afectan la permeabilidad del suelo y originan la dispersión de las partículas del mismo. Además hacen que el agua se infiltre hasta mayores profundidades, en donde ya no pueden ser utilizadas por las plantas. Los detergentes de tipo aniónico contribuyen a la permanencia de los plaguicidas y otros compuestos en el suelo, lo que ocasiona daños a los cultivos; reducen el contenido de nitrógeno en el suelo, que es un nutriente para los vegetales y pueden llegar hasta las aguas subterráneas y contaminarlas.

A pesar de todos los perjuicios citados, algunos autores consideran que los detergentes en bajas concentraciones estimulan el desarrollo y crecimiento de los cultivos, pero esto no ha sido comprobado ya que intervienen diversos factores como son: las características fisicoquímicas y la composición de los suelos, las propiedades de la especie cultivada, además de otros factores ambientales.

**Materia orgánica.** El contenido de materia orgánica en las aguas residuales es normalmente alto; en la mayoría de los casos se expresa como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), aunque puede también hacerse referencia a ella como Demanda Química de Oxígeno (DQO) o como Contenido de Carbono Orgánico Total (COT).

Las condiciones aerobias en el suelo prevalecen cuando la demanda de oxígeno total (compuesta por la DBO, DQO y COT) del agua residual se encuentre en equilibrio con el contenido de oxígeno en el suelo. Sin embargo, en el caso de que el suelo reciba altas cargas de materia orgánica este equilibrio se pierde y puede presentarse un estado anaerobio; entonces existe una acumulación de sólidos provenientes del agua residual y de los que se forman debido a la actividad bacteriana. Un estado anaerobio en el suelo provoca el desprendimiento de malos olores y todos los efectos que esto acarrea para el ambiente como la propagación de insectos y fauna nociva; los sólidos en exceso provocan disminución en la permeabilidad de los suelos reduciendo a su vez las

tasas de infiltración del agua residual en el terreno y ocasionan que la biodegradación de la materia orgánica a través del suelo resulte más lenta.

El proceso de descomposición de la materia orgánica requiere de oxígeno, por lo que al aplicar cargas de aguas residuales con elevadas concentraciones de materia orgánica se origina la disminución del oxígeno contenido en el suelo; esto provoca efectos adversos en la vegetación y en los cultivos al disminuir el crecimiento de las plantas y la productividad de los sembradíos. Otro efecto de la excesiva aplicación de carga orgánica en el suelo es la reducción de elementos como el Hierro (Fe) y el Manganeseo (Mn) a compuestos divalentes que tienen mayor solubilidad y que pueden ocasionar situaciones de toxicidad para la vegetación.

**Nutrientes.** Entre los principales elementos que son nutrientes para las plantas se encuentran el Nitrógeno (N), el Fósforo (P) y el Potasio (K). Las aplicaciones de estos elementos en los suelos son benéficas, pues son asimilados por las plantas y producen mayor crecimiento del cultivo obteniendo muy buenas cosechas. Sin embargo, debe evitarse aplicar nutrientes de manera excesiva pues esto puede provocar problemas para el tratamiento de las aguas y efectos perjudiciales al sistema suelo-planta-animal-hombre. De esta manera, si se aplican cargas de nitrógeno excesivas se pueden presentar los siguientes efectos adversos:

- Crecimiento excesivo de la vegetación
- Reducción en el tamaño de los frutos cosechados y deterioro en la calidad del producto de la cosecha
- Retardo en la madurez de los frutos o en el tiempo en que deberá realizarse la cosecha
- Disminución en el contenido de azúcar o de almidón de los frutos cosechados
- Alteración en el sabor, color, olor y textura de los frutos y de los vegetales
- Posibles daños a la salud humana debido a la acumulación de nitratos hasta niveles tóxicos
- Existe el riesgo de contaminación de acuíferos por elevadas concentraciones de nitrógeno en forma de nitratos ( $\text{NO}_3$ ), lo que ya ha ocurrido en México en el Valle del Mezquital, en el Estado de Hidalgo.

La acumulación excesiva de fósforo en las aguas residuales no es tan perjudicial para el suelo como las altas cargas de nitrógeno, pues no afecta directamente a los cultivos. Este elemento normalmente es adsorbido o experimenta precipitación química al ser vertido en el terreno; lo que disminuye las cantidades que se encuentran remanentes en el suelo y que pudieran afectar a los sembradíos o a la vegetación de la zona.

Se permiten concentraciones de fósforo inferiores a los 60 mg/l; respecto al potasio se considera que el contenido de éste elemento en las aguas negras no altera las características de los cultivos.

**Sólidos suspendidos.** Los sólidos suspendidos que se encuentran en el suelo debido a la aplicación del agua residual sobre el terreno suelen ser partículas finas generalmente en forma orgánica. Su acumulación provoca la formación de una capa que impide el flujo hidráulico, lo que reduce la infiltración y la velocidad de descomposición de la materia orgánica, provocando la disminución del oxígeno contenido en el suelo; lo que a su vez puede generar la pérdida de vegetación.

La existencia de sólidos suspendidos en los estratos de suelo superficiales, puede obstruir sus poros y a medida que la obstrucción ocurre a mayor profundidad, resulta más complicado solucionar el problema. La oclusión de los intersticios produce un descenso en las tasas de infiltración y propicia el desarrollo de estados anaerobios lo que ocasiona una disminución en la descomposición de la materia orgánica.

**Grasas y aceites.** Se consideran como grasas a los ácidos grasos, ceras, ésteres simples; dentro de los aceites se encuentran a los hidrocarburos de origen mineral con bajo peso molecular, tales como la gasolina, combustibles y lubricantes.

En virtud de que la degradación de las grasas y aceites de origen animal y vegetal es relativamente sencilla, la atención se centra en poder descomponer los aceites de origen mineral o sintético cuya degradación es complicada y tardada.

Las grasas y los aceites se encuentran presentes en el agua servida en dos diferentes maneras, a saber: dispersas en forma de emulsiones y no dispersas a manera de películas; las emulsiones presentan serias dificultades para su remoción, lo que no ocurre con las películas no dispersas; provocan deterioros a las plantas dado que forman un recubrimiento para las partículas del suelo y para las raíces de las plantas, lo que interfiere en la absorción del agua que requieren los sembradíos y los vegetales. Al formarse una película en la capa superficial del terreno se obstruyen los intersticios o poros del medio (en este caso el suelo) y se inhibe la actividad de los microorganismos, se constituye una especie de impermeabilización del suelo pues se deteriora la permeabilidad del mismo; pueden desarrollarse condiciones anaerobias y elevarse la temperatura en los estratos de suelo. Cada uno de estos fenómenos modifica la productividad de las plantaciones y la fertilidad del suelo. Asimismo debe tomarse en cuenta el riesgo por el contenido de elementos tóxicos que son constituyentes de los aceites de origen mineral, tal como ha ocurrido en el Distrito de Riego 011 en Celaya, Guanajuato.

**Potencial de hidrógeno (pH).** Aparentemente el pH no tiene efectos directos sobre el suelo y los cultivos, sino que éstos son indirectos, de tal manera que cuando las aguas residuales tienen pH del orden de 8.3 o mayores son indicativos de elevadas concentraciones de sodio, carbonatos y/o bicarbonatos; en el caso de que las aguas negras reporten pH menores a 4.8 unidades y se apliquen a suelos ácidos con ello se permite la solubilización de algunos metales que pueden ser fitotóxicos.

**Otros compuestos.** Además de los contaminantes citados anteriormente deben considerarse los resultados de compuestos orgánicos como son los plaguicidas, policlorobifenilos (PCB<sub>s</sub>), hidrocarburos clorados y fenoles, además de sulfatos (SO<sub>4</sub>). Los plaguicidas, los hidrocarburos clorados y los policlorobifenilos pueden provocar cáncer y mutaciones en el ser humano; en realidad no se cuenta con suficiente información para determinar en que concentraciones pueden

provocar daños a las plantas y alteraciones en el ser humano y los animales.

El cloro se emplea en la desinfección de las aguas, ya sea para su uso primario o como un tratamiento final de las aguas residuales y es un agente eficiente de desinfección. Sin embargo deben limitarse las concentraciones de este elemento en las aguas a valores menores a 0.5 mg/l, con ello se pretende evitar la formación de compuestos clorados que puedan traer resultados adversos para el agua y el suelo; algunos plaguicidas son absorbidos por las plantas lo que afecta el crecimiento de las mismas. Los policlorobifenilos que se disponen al suelo no son captados por las plantas, sin embargo son adsorbidos por las partículas del suelo, se volatilizan o se degradan por acción de microorganismos.

Los fenoles son compuestos orgánicos en los que el radical hidroxilo OH remplaza a uno o más átomos de hidrógeno en un hidrocarburo, son fuertemente adsorbidos por el suelo, los cultivos son relativamente resistentes a estos compuestos. A pesar de esto causan perjuicios en el suelo pues alteran algunos procesos microbianos tales como la nitrificación. Se permiten concentraciones de fenoles del orden de 50 mg/l

Acerca de los sulfatos ( $SO_4$ ) se sabe que la asimilación de este compuesto por los cultivos es muy variable de acuerdo con la especie de la que se trate y que pueden admitirse en concentraciones relativamente altas de sulfatos, en el intervalo de 150 y 320 mg/l.

#### **7.4.2 Impactos debidos a la infiltración de las aguas residuales**

Los principales impactos causados por los sistemas de infiltración de aguas residuales están relacionados con la posibilidad de que alcancen los niveles del agua freática y recarguen los acuíferos. El impacto puede ser benéfico cuando el agua que se aplica en los terrenos de infiltración ha sido previamente tratada (cuando menos hasta un nivel secundario), y con ello pueden obtenerse beneficios como la reposición de las aguas subterráneas con agua depurada, pues al percolarse a través del suelo adquiere un nivel mayor de tratamiento, por lo que el acuífero puede ser utilizado sin mayores riesgos. Sin embargo, el impacto puede ser adverso cuando las aguas infiltradas no hayan sido sometidas a un tratamiento hasta un nivel aceptable, e incluso puede darse el caso de que se apliquen estando crudas, es decir, sin ningún tipo de tratamiento previo.

Es conveniente considerar también que la restauración de un acuífero que se ha explotado en demasía, prolonga su vida útil y puede aprovecharse hasta que se cuente con algún otro sistema de abastecimiento de agua para la región; además la renovación de las aguas subterráneas puede ayudar a disminuir la intrusión salina en mantos acuíferos próximos a zonas costeras, debido a que puede formar barreras hidráulicas que impiden el paso de las sales hacia el acuífero. Asimismo y como principal propósito para fines de este estudio, se logra la depuración del agua residual aplicada en los campos de infiltración mediante el contacto con el suelo; este puede resultar un tratamiento a nivel terciario, si el agua que se aplica ha sido previamente depurada hasta un grado secundario de tratamiento. De igual forma la recarga de acuíferos detiene el hundimiento del suelo ocasionado por el bombeo desmedido de las aguas freáticas, pero no permite alcanzar los niveles originales, solamente evita que continúe el asentamiento. También es posible el empleo del agua residual en yacimientos petrolíferos, inyectarla provocando el ascenso del petróleo hasta la superficie por diferencia de densidades entre ambos líquidos.

La renovación de las aguas subterráneas es, desde el punto de vista anteriormente analizado, un impacto ambiental benéfico de los sistemas de tratamiento en suelos que también tienen como objetivo dicha recarga; tal es el caso de los sistemas de infiltración lenta o rápida.

Sin embargo, no sólo pueden obtenerse impactos favorables sino que también existe el riesgo de contaminación al acuífero o a otros mantos acuíferos o pozos de abastecimiento de agua para uso doméstico, industrial o agrícola; esto puede ocurrir si la depuración de las aguas residuales después de infiltrarse y percolarse a través del suelo no resulta ser la esperada o si las aguas influentes al sistema tienen concentraciones mayores a las recomendadas o incluso sean crudas, es decir sin ningún tipo de tratamiento. De igual modo cabe la posibilidad de la colmatación y obstrucción de los poros del suelo por la materia orgánica y los sólidos que se han aplicado al terreno en el agua residual; esto disminuye la permeabilidad del acuífero y el volumen de agua que se conduce a través del subsuelo disminuye; por lo anterior, es necesario controlar las cantidades de sólidos suspendidos y de materia orgánica de las aguas por aplicar, por lo que se recomienda un tratamiento anterior a la aplicación hasta un nivel primario e incluso secundario, con sedimentadores. Debe tenerse cuidado también con las cargas de nitrógeno como nitratos que si persisten en el agua renovada y recuperada de los acuíferos restituidos, pueden causar daños a la salud humana y animal, específicamente en la sangre de los niños (cianosis o metemoglobinemia); concentraciones superiores a 45 mg/l de nitratos en el agua por ingerir<sup>1</sup>, son altamente peligrosas y ocasionan también la eutroficación en lagos y cuerpos de agua superficiales que reciben aguas subterráneas. Los sistemas de tratamiento de aguas residuales mediante infiltración a través del suelo presentan la dificultad de requerir de amplias extensiones de terreno.

Por otra parte, estudios científicos han comprobado que la recarga artificial de acuíferos en pozos profundos puede provocar sismos de pequeña magnitud por el incremento en las presiones en el subsuelo, pero esta posibilidad es remota; por el contrario, el abastecimiento del agua a partir de pozos puede indicar la proximidad de un movimiento telúrico debido a que el contenido de radón en el agua se incrementa súbitamente, lo cual se ha investigado y determinado que ocurre porque las oscilaciones ultrasónicas que se presentan con un sismo, aumentan hasta que desprende el elemento radón de las rocas, añadiéndose éste a las aguas subterráneas. Por lo tanto, la composición de las aguas subterráneas puede ayudar a pronosticar la proximidad de un sismo si el contenido de radón se incrementa de repente. En el Capítulo 9 de este trabajo se hace mención de la importancia que tiene la recarga de acuíferos en nuestro país, por la explotación desmedida que se ha hecho de los mismos.

#### **7.4.3 Impactos producidos por los sistemas de escurrimiento superficial**

En los sistemas de escurrimiento superficial en lámina existe el peligro de provocar erosión a las laderas por las cuales circula el agua residual; esto ocurre si la velocidad del flujo es demasiado alta (superior a 3 m/s) lo cual puede evitarse con el diseño correcto de las pendientes y con procesos adecuados de operación y mantenimiento. En caso de que el agua vertida sobre las terrazas se almacene, se provocarán estados anaerobios con desprendimiento de malos olores, un correcto diseño del sistema debe evitar este tipo de problemas, es decir que debe existir un equilibrio en la pendiente de la terraza y la velocidad del flujo, de manera tal que no haya erosión

---

<sup>1</sup> La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA 1-1994 referente al agua para uso y consumo humano, limita el contenido de Nitratos (como N) a 10.0 mg/l

excesiva ni almacenamiento del escurrimiento. El impacto que pudiera causarse a los acuíferos en este tipo de sistemas es prácticamente nulo, debido a que se utilizan suelos poco permeables (arcillosos); pueden acarrear minerales y sales provenientes de la capa superficial del suelo en el agua vertida lo que implica la posible necesidad de un tratamiento posterior con objeto de separar tales constituyentes.

Analizando la matriz de evaluación correspondiente a este tipo de sistemas (Cuadro 7.4) se aprecia que de los sistemas de tratamiento en suelos el que origina un menor número de impactos adversos, tanto para la estructura y propiedades físicas del suelo como para la calidad de las aguas subterráneas, es el de los sistemas de escurrimiento superficial; éstos representan una fuente de empleos importante durante su construcción, aunque se reduce como tal, cuando se lleva a cabo sólo la operación del sistema. El diseño adecuado de un sistema de escurrimiento superficial, con las características requeridas en el tipo de suelo (prácticamente impermeable) y en la calidad del agua residual aplicada, permite una excelente renovación de las aguas residuales, con el mínimo de impactos adversos posible.

#### **7.4.4 Impactos provocados por la aplicación de lodos en el terreno**

La aplicación de lodos en el terreno puede incorporar metales pesados, sustancias tóxicas y microorganismos patógenos al suelo. Los metales pesados son riesgosos en suelos ácidos y/o con bajos contenidos de materia orgánica o baja capacidad de intercambio catiónico; esto provoca que cada vez con mayor frecuencia se obtengan cosechas con altos contenidos de cadmio y otros metales. Es aplicable a este tipo de sistemas lo expuesto en el punto 7.4.1 para los sistemas de irrigación, e incluso en el caso de la disposición de lodos es aún más crítico, debido a que el contenido de los contaminantes citados en los lodos resulta generalmente mayor a las concentraciones de tales parámetros en las aguas residuales

Los dos métodos de aplicación de lodos en el terreno, como se indica en el Capítulo 6, son los siguientes:

- Utilización de lodos con alto contenido de agua para aplicarse como una lámina de riego por inundación, inyección superficial y riego por aspersión.
- Empleo de lodos deshidratados para ser aplicados de manera directa o en forma de mezcla con materia orgánica, o como fertilizante.

Para efectuar ambos tipos de disposición se requieren lodos digeridos y preferentemente desinfectados, mediante algunos de los métodos siguientes: pasteurización, empleo de ondas sónicas, ondas supersónicas, rayos catódicos, rayos ultravioleta, rayos X o agentes químicos convencionales, como ozono, gas cloro o hidróxido de calcio. A pesar de que la digestión de lodos permite una gran mortandad de microorganismos, gran cantidad de éstos pueden incorporarse al terreno agrícola con graves riesgos a la salud, pues algunas especies perduran en la superficie del suelo y en los cultivos; es por ello que se sugiere, en caso de ser posible, emplear alguno de los procesos citados.

Por lo anterior y de acuerdo con la matriz de evaluación que se ha elaborado para los sistemas de aplicación de lodos, puede afirmarse que es este el procedimiento con mayores

impactos ambientales adversos de los analizados. La matriz correspondiente se muestra en el Cuadro 7.5.

## 7.5 Medidas de mitigación

Todo estudio de impacto ambiental se complementa con una serie de medidas de mitigación encaminadas a atenuar los efectos en el ambiente que producen las actividades del proyecto analizado. A continuación se presentan algunas de estas medidas para mitigar los impactos ocasionados por la presencia de algunos contaminantes en los sistemas de tratamiento de aguas en suelos.

### 7.5.1 Salinidad

La salinidad excesiva puede ser controlada mediante la aplicación de una cantidad extra de agua, denominada como lámina de sobrerriego o fracción de lavado con esto se consigue disminuir el contenido de sales que se encuentran acumuladas alrededor de la zona radicular. También es recomendable seleccionar los cultivos que sean más tolerantes a la salinidad, con el fin de reducir los efectos de éstas sobre las plantas; en el Cuadro 7.7 se presenta una relación de cultivos de acuerdo con su tolerancia a las sales. Se sabe que las plantas son mucho más sensibles a las sales en sus primeras etapas de crecimiento. Otras medidas para la prevención de daños debidos a salinidad son el efectuar diferentes prácticas agrícolas, como: nivelación del terreno, mejoramiento del drenaje superficial, adecuada colocación de la semilla, adición de materia orgánica, etc.

En los sistemas de infiltración es recomendable tratar el agua residual antes de disponerla sobre el suelo y diluirla con agua de mejor calidad; en la medida de lo posible se recomienda analizar el terreno y utilizar los suelos con relativamente poco contenido de sales.

Las concentraciones permisibles de sales en el agua residual se evalúan por medio de la conductividad eléctrica, en micromhos/cm o en mmhos/cm a través del contenido de sólidos disueltos, expresados en mg/l. Las concentraciones no deberán exceder los siguientes valores:

|                           |                    |
|---------------------------|--------------------|
| Conductividad eléctrica   | 0.7 a 3.0 mmhos/cm |
| Sólidos disueltos totales | 450 a 2000 mg/l    |

Las sales de sodio (Na) y/o cloro (Cl) son especialmente tóxicas para los cultivos

Las concentraciones en las que se presentan daños a los cultivos, son:

|  |       |
|--|-------|
| Na <sup>+</sup> (evaluado por la relación de absorción de Sodio (RAS)) | 3     |
| Cl <sup>-</sup>  | 147.5 |

Para el caso de riego por aspersión:

|                        |     |
|------------------------|-----|
| Na <sup>+</sup> (mg/l) | 69  |
| CSR                    | 106 |

La relación de adsorción de sodio (RAS) y el contenido de carbonato de sodio residual (CSR) permiten evaluar el grado de sodificación de un suelo. El CSR comúnmente se mide en miliequivalentes por litro (meq/l). Los valores máximos permisibles para ambos parámetros son:

|            |                   |
|------------|-------------------|
| <b>RAS</b> | <b>de 3 a 9</b>   |
| <b>CSR</b> | <b>1.25 meq/l</b> |

#### 7.5.2 Metales pesados

Pueden seguirse recomendaciones con la finalidad de disminuir el riesgo de acumulación de metales pesados en las aguas residuales y en los suelos, como se explica a continuación: control de fuentes de aportación de metales pesados a las aguas residuales principalmente de las industrias, dilución o mezcla de las aguas negras con aguas de mejor calidad, además del aprovechamiento de las características fisicoquímicas del suelo, así como la selección de cultivos que no acumulen en demasía los metales pesados. Los suelos franco arcilloso o arcillosos, con un alto contenido de materia orgánica, de óxidos de hierro y aluminio, de fosfatos, con alta capacidad de intercambio catiónico y con un pH neutral o tendiente a alcalino, disminuyen los riesgos de absorción de metales pesados por parte de las plantas. Respecto a los cultivos, deben seleccionarse aquellos que no sean consumidos por los animales o por el ser humano. Para evitar el riesgo de contaminación por Cadmio deben elegirse sembradíos que no tengan demasiado follaje. En los cultivos sensibles al boro debe evitarse la presencia de este elemento en una concentración mayor a 0.67 mg/l; para cultivos que no son extremadamente sensibles al boro la concentración no debe exceder a 2 ó 3 mg/l. Una clasificación de cultivos en cuanto a su tolerancia al boro se muestra en el Cuadro 7.8; el Cuadro 7.9 expone concentraciones permisibles de metales pesados en las aguas residuales para riego considerando la fitotoxicidad, acumulación a largo plazo en el suelo y el peligro que representa su posible integración a las cadenas alimenticias.

Cuadro 7.7

| <b>TOLERANCIA RELATIVA DE LOS CULTIVOS A LAS SALES</b>  |   |   |
|---|---|---|
| <b>Frutales</b>   |   |   |
| <b>Muy tolerantes</b>   | <b>Medianamente tolerantes</b>  | <b>Poco tolerantes</b>  |
| Palma datilera  | Granada<br>Higuera<br>Olivo<br>Vid<br>Melón   | Peral<br>Albaricoque<br>Manzano<br>Melocotón<br>Naranja<br>Fresa<br>Toronja<br>Limonero<br>Ciruelos<br>Aguacate<br>Almendro |
| <b>Hortalizas</b>   |   |   |
| Remolacha<br>Bretón o col rosada<br>Espárragos<br>Espinacas   | Jitomate<br>Brécol<br>Col<br>Pimiento<br>Coliflor<br>Lechuga<br>Maíz dulce  | Chicharos<br>Calabaza<br>Pepinos<br>Cebolla<br>Zanahoria<br>Papas   |
|   |   | Rábano<br>Apio<br>Ejotes  |
| <b>Plantas forrajeras</b>   |   |   |
| Zacatón alcalino<br>Zacate salado<br>Gramma o Bermuda<br>Hierba Rodhes<br>Cebadilla Criolla<br>Centeno silvestre de Canadá<br>Gramma de trigo occidental<br>Cebada (para heno)<br>Cuernecillo | Trébol blanco<br>Trébol amarillo<br>Zacate Inglés perenne<br>Trébol fresa<br>Zacate Dallis<br>Alfalfa<br>Festuca alta<br>Centeno (para heno)<br>Trigo (para heno)<br>Avena (para heno)<br>Gramma azul<br>Trébol grande<br>Bromo suave<br>Veza lechosa (hoz) | Trébol blanco holandés<br>Alopécuro<br>Trébol Alsike<br>Trébol rojo<br>Trébol ladino<br>Pimpinela                           |
| <b>Cultivos comunes</b>   |   |   |
| Cebada (grano)<br>Remolacha azucarera<br>Colza<br>Algodón   | Centeno (grano) Maíz<br>Trigo (grano) Linaza<br>Avena (grano) Girasol<br>Arroz<br>Sorgo (grano) Higuierilla   | Alubias   |

Fuente: Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Laboratorio de Salinidad E.U.A

**Cuadro 7.8**

| <b>TOLERANCIA DE LAS PLANTAS AL BORO</b> |                                 |                  |
|--|---------------------------------|------------------|
| <b>Tolerantes</b>                        | <b>Moderadamente tolerantes</b> | <b>Sensibles</b> |
| Añel                                     | Girasol                         | Nuez             |
| Espárragos                               | Papa                            | Nogal negro      |
| Palma                                    | Algodón scala                   | Nogal para       |
| Palma datilera                           | Algodón pima                    | Chuffa           |
| Remolacha azucarera                      | Jitomate                        | Olmo americano   |
| Remolacha forrajera                      | Chicharo dulce                  | Ciruelo          |
| Remolacha colorada                       | Rábano                          | Peral            |
| Alfalfa                                  | Olivo                           | Manzano          |
| Gladola                                  | Cebada                          | Uva              |
| Haba                                     | Trigo                           | Higo             |
| Cebolla                                  | Maiz                            | Nipero           |
| Nabo                                     | Sorgo                           | Cereza           |
| Col                                      | Avena                           | Albericoque      |
| Lechuga                                  | Calabita                        | Melocotón        |
| Zanahoria                                | Pimiento "Bell"                 | Zarzamora        |
|  | Camote                          | Naranja          |
|  | Frijol Lima                     | Agucate          |
|  |                                 | Toronja          |
|  |                                 | Limonero         |

Fuente: Diagnóstico y Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos. Laboratorio de Salinidad de los E.U.A

**Cuadro 7.9**

| <b>CONCENTRACIONES MAXIMAS PERMISIBLES DE ELEMENTOS A NIVEL DE TRAZA EN EL AGUA RESIDUAL PARA RIEGO</b> |  |
|---|--|
| <b>Elemento</b>   | <b>Límite máximo permisible (mg/l)<sup>1</sup></b> |
| Boro (B)  | 0.7  |
| Aluminio (Al)   | 5.0  |
| Arsénico (As)   | 0.10   |
| Berilio (Be)  | 0.10   |
| Cadmio (Cd)   | 0.01   |
| Cobalto (Co)  | 0.05   |
| Cromo (Cr)  | 0.10   |
| Cobre (Cu)  | 0.20   |
| Fe (Hierro)   | 5.0  |
| Mn (Manganeso)  | 0.20   |
| Mo (Molibdeno)  | 0.01   |
| Ni (Niquel)   | 0.20   |
| Plomo (Pb)  | 5.0  |
| Selenio (Se)  | 0.02   |
| Zinc (Zn)   | 2.0  |

<sup>1</sup> La tasa máxima de aplicación se basa en una carga de aplicación de agua residual de 10 000 m<sup>3</sup>/ha.año.

Fuente: Alvarez Rosas, José. Criterios propuestos para el manejo de las aguas residuales en la agricultura. SEDUE

### 7.5.3 Riego agrícola y efectos en la salud

El reúso de las aguas residuales en las prácticas de riego agrícola, requiere un estudio de las características fisicoquímicas del agua y del suelo utilizados, un estudio microbiológico de los mismos y de los vegetales que son regados con las aguas residuales, además de un estudio epidemiológico con objeto de precisar con exactitud las implicaciones sanitarias que causa su uso en la agricultura.

Dos factores de importancia que deben considerarse en la reutilización del agua residual en la agricultura, son:

- a) Método de irrigación utilizado, que debe evitar que las partes comestibles de los cultivos irrigados con estas aguas estén en contacto directo con las mismas para evitar su contaminación.
- b) Determinación del tiempo de supervivencia y mortandad de los microorganismos, en función del tipo de agua de riego, de las características del suelo, del clima y de la población microbiana existente en el agua y en el suelo.

Como una medida de mitigación para la generación de aerosoles por el riego por aspersión, se pueden disponer de zonas de amortiguamiento consistentes en barreras vegetales de arbustos o árboles, que eviten la propagación de los aerosoles además de que los terrenos que sean irrigados mediante aspersión y desprendan aerosoles deben encontrarse suficientemente retirados de las poblaciones.

Para poder evaluar los riesgos a la salud que implica el riego con aguas residuales deben considerarse la clase de microorganismos patógenos, el tiempo de sobrevivencia en el agua, en el suelo y en la planta; la dosis infectiva para el ser humano, el proceso o transformación que recibe el cultivo antes de ser consumido, el procedimiento y la frecuencia de aplicación de agua residual al cultivo.

Las actividades sugeridas para disminuir los riesgos a la salud pública por el uso de aguas residuales en la agricultura, son:

- Aplicar al menos tratamiento primario con desinfección a las aguas residuales antes de ser dispuestas al terreno.
- No regar con aguas residuales aquellos cultivos que se consuman crudos
- Suspender el riego entre 2 y 4 semanas antes de la cosecha
- Evitar el libre pastoreo del ganado al menos 2 semanas después del último riego
- Es recomendable utilizar sistemas de irrigación superficial
- Impedir el contacto de las cosechas con el agua residual o el suelo irrigado

En cuanto a las concentraciones permisibles de microorganismos patógenos en las aguas residuales para riego, se tiene:

Nemátodos intestinales (Media geométrica):

Número de huevos viables por litro  $\leq 1$

Coliformes fecales (Media geométrica)

Número más probable (NMP) por 100 ml  $\leq 1000$

#### 7.5.4 Detergentes

Respecto a las medidas de mitigación de impactos ambientales producidos por la presencia de detergentes en altas concentraciones en las aguas residuales se pueden citar las siguientes: dilución o mezcla de las aguas residuales con aguas de mejor calidad, selección de suelos con alta capacidad de adsorción de detergentes; los suelos que cumplen con esta propiedad son los que tienen un alto contenido de materia orgánica, alta capacidad de intercambio catiónico, contenido elevado de óxidos de hierro y de aluminio; ser relativamente arcilloso y contar con suficiente aereación. Para poder llevar a cabo un adecuado manejo de los cultivos se requiere el conocimiento de las características fisicoquímicas del suelo y las propiedades de desarrollo, crecimiento y productividad de la planta.

Las concentraciones permisibles de detergentes en las aguas negras destinadas a riego son muy variables dependiendo de cada tipo de cultivo; un rango que puede sugerirse como una simple recomendación es de 2 a 4 mg/l.

#### 7.5.5 Materia orgánica

En cuanto a los procedimientos de disposición encaminados a atenuar los efectos adversos que produce la aplicación de altas cargas orgánicas en los terrenos de cultivo y en los suelos en general se recomienda llevar a cabo las siguientes actividades:

- Efectuar aplicaciones intermitentes, proporcionando períodos de descanso al suelo, en los que no se dispongan aguas residuales y se permita la aereación del terreno; con esta medida se pretende permitir la descomposición de los contaminantes de origen orgánico.
- Cuando las cargas orgánicas sean muy elevadas se sugiere diluir el agua por aplicar con aguas de mejor calidad.

Si se siguen las recomendaciones anteriormente expuestas se obtendrán beneficios de la materia orgánica aplicada al terreno, pues se sabe de los efectos fertilizantes que ésta presenta.

Un efluente de agua residual de buena calidad deberá tener una DBO de 10 a 20 mg/l, una DQO en un rango de 30-60 mg/l y un contenido de Carbono Orgánico Total (COT) de 10-30 mg/l. La carga de DBO en ton/(ha.año) no deberá sobrepasar el intervalo de 134 a 224 ton/(ha.año).

### **7.5.6 Nitrógeno**

El manejo con el propósito de atenuar los impactos por tasas de nitrógeno abundantes, comprende las siguientes acciones: mezclar el agua residual con agua de mejor calidad, efectuar un tratamiento previo al agua residual. También es recomendable utilizar cultivos con altas capacidades de remoción de nitrógeno, pero debe limitarse para aquellos que se destinen al consumo humano y/o animal.

Concentraciones de nitrógeno del orden de 5 mg/l o menores, son aceptables, ya sea como nitrógeno amoniacal o como nitrato.

### **7.5.7 Sólidos suspendidos**

Para disminuir los efectos adversos que causan los sólidos suspendidos en las aguas residuales se deben tratar las aguas al menos hasta un nivel primario con la finalidad de reducir la concentración de sólidos suspendidos en el agua por aplicar. En caso de que la acumulación de sólidos suspendidos haya provocado la formación de una costra en la superficie del terreno, ésta puede ser fracturada al arar la capa de suelo.

Concentraciones menores a 100 mg/l de sólidos suspendidos resultan ser aceptables.

### **7.5.8 Grasas y aceites**

Como medidas de atenuación encaminadas a reducir los efectos adversos de las grasas y aceites deben tratarse por lo menos hasta un nivel primario las aguas por disponer, además de ejercer un control de las fuentes de las aguas que se pretende aprovechar para riego con el objeto de limitar las descargas de grasas y aceites. La labranza del terreno debe realizarse a diferentes profundidades, logrando con ello mejoras en la permeabilidad y en la aereación del suelo.

A manera de recomendación se limitan las concentraciones de grasas y aceites a menos de 30 mg/l en las aguas servidas.

### **7.5.9 Potencial de hidrógeno**

Para controlar los valores de potencial de hidrógeno tanto en el agua residual como en el suelo puede agregarse cal; es recomendable que el pH del agua residual tienda a encontrarse en un estado neutro, un intervalo aceptable es el comprendido entre 6.5 y 8.4.

### **7.5.10 Otros compuestos**

Hasta ahora no se han determinado límites permisibles en las cantidades de compuestos como plaguicidas, fenoles, sulfatos, etc. en las aguas destinadas a riego agrícola, sin embargo es indispensable llevar un control de las concentraciones de este tipo de compuestos en el agua, en el suelo y en las plantas, pues como anteriormente se citó, pueden provocar graves males a las plantas y la salud animal y humana.

### **7.6 Consideraciones respecto a los impactos ambientales provocados por la disposición de aguas residuales en el terreno**

De acuerdo con lo expuesto en este capítulo, se concluye que el empleo de aguas residuales para el riego de los cultivos y su aplicación con objeto de obtener un tratamiento de las aguas servidas, es una práctica que requiere de un manejo adecuado y cuidadoso, tendiente a controlar los problemas que pudieran ocurrir si no se cumple con las medidas de mitigación anteriormente descritas. En México, como en otros países es menester llevar a cabo más investigaciones a lo largo de todo el territorio nacional, en las que se determinen las características de las aguas residuales, las concentraciones de los diversos parámetros de interés, se analicen tipos y propiedades de los suelos.

La prevención y el control de los efectos adversos causados por la utilización de aguas residuales en el riego agrícola y su disposición en el terreno como un método de tratamiento se basa en los siguientes aspectos: el conocimiento de las consecuencias que estos procedimientos tienen sobre el sistema agua-suelo-planta-animal-hombre, aplicación de diversas prácticas de manejo que actúan como medidas de mitigación y/o prevención de los impactos ambientales provocados por las actividades de irrigación y disposición de aguas residuales y de lodos al terreno; además del estricto cumplimiento de las concentraciones permisibles para diversos parámetros constituyentes de las aguas servidas. Es recomendable revisar y adaptar los criterios sugeridos para las condiciones particulares de la región de interés.

La aplicación de lodos sobre el terreno agrícola aporta beneficios con base en la incorporación de nutrientes para los cultivos, pero a la vez representa un riesgo por la incorporación simultánea de metales pesados y de microorganismos patógenos, principalmente, cuya influencia negativa debe prevenirse y controlarse aplicando técnicas adecuadas.

Por otra parte, debe considerarse como una alternativa para atenuar las deficiencias en abasto de agua, la recarga artificial de acuíferos con aguas residuales; con el objeto no sólo de la restauración de los mantos subterráneos, sino de permitir el empleo de aguas potables o de primer uso para otros fines como pueden ser el consumo directo. Esta recarga deberá hacerse con las medidas indicadas para evitar cualquier efecto perjudicial en la salud de los consumidores.

Un diseño que cumpla con la calidad del agua residual y las propiedades requeridas del suelo para cada caso en particular y que se apegue a las cargas hidráulicas de aplicación recomendadas; además de que la operación y el mantenimiento se efectúen de manera eficaz y constante, previniendo los posibles efectos adversos y llevando a cabo las medidas de mitigación pertinentes se reflejará en la obtención de resultados óptimos tanto en la calidad del agua renovada, como en las características y propiedades del suelo después de la aplicación.

Como ha sido mencionado, los sistemas de aplicación de lodos son en los que se identifican mayor cantidad de impactos, principalmente por las características de dichos lodos, además el objetivo principal es utilizarlos como un fertilizante en los campos agrícolas y este es el único sistema de los que se han estudiado que no está encaminado a obtener un agua residual tratada, sino a darle un aprovechamiento por medio del reúso de los lodos. Por otra parte, los sistemas de escurrimiento superficial reportan el menor número de impactos adversos, aunque siempre

dependerá del diseño y funcionamiento del mismo. En cuanto a los sistemas de irrigación e infiltración, los principales daños que pueden provocar son la contaminación de cultivos que pueden ser consumidos por los seres humanos y los animales y la contaminación de acuíferos, respectivamente. Sin embargo, siguiendo las sugerencias expuestas anteriormente, los riesgos se reducen significativamente.

Finalmente debe elaborarse un documento denominado **Manifestación de Impacto Ambiental** en el que se informe con base en los estudios previamente realizados, los impactos ambientales significativos y potenciales provocados por la ejecución del proyecto, así como las medidas de mitigación tendientes a atenuarlos. Tal documento debe presentarse para cada proyecto en particular.

---

**8.LEGISLACION NACIONAL RELATIVA A LA PREVENCION  
Y CONTROL DE LA CONTAMINACION ORIGINADA POR LA  
INFILTRACION DE AGUAS RESIDUALES EN LOS SUELOS**

---

**CAPITULO 8****LEGISLACION NACIONAL RELATIVA  
A LA PREVENCION Y CONTROL DE LA  
CONTAMINACION ORIGINADA POR LA  
INFILTRACION DE AGUAS RESIDUALES  
EN LOS SUELOS****8.1 Antecedentes**

El ser humano, con el afán de satisfacer sus necesidades ha hecho uso de los recursos naturales desde que se encuentra sobre la faz de la tierra. Ante el inmenso crecimiento poblacional y la concentración de la población en grandes ciudades, se ha provocado la explotación irracional de los recursos naturales, lo que se observa en los ríos y estanques de agua contaminados, en los terrenos erosionados y estériles; en la pérdida de bosques, tierras de cultivo y toda clase de áreas verdes que son sustituidos por las selvas de concreto que constituyen los grandes centros urbanos. Durante la segunda mitad de este siglo, se ha despertado el interés y la preocupación por el deterioro ambiental que está ocurriendo en nuestro planeta; es por ello que en diferentes países se han establecido legislaciones y lineamientos con el objeto de atenuar dicho deterioro, México no ha sido la excepción por lo que se han promulgado diversas leyes reglamentadas por la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos y encaminadas al fin señalado; entre ellas se encuentran la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y sus reglamentos; La Ley de Aguas Nacionales y su reglamento; y las Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Protección al Ambiente.

Este Capítulo trata acerca de la legislación nacional relativa al proceso de infiltración de aguas residuales en el suelo, fenómeno que tiene lugar en diferente medida en cada uno de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en el suelo que han sido estudiados.

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos define como aguas nacionales a todos aquellos cuerpos o corrientes de agua que se encuentran dentro de los límites del territorio nacional de acuerdo con el derecho internacional, comprendiendo en ellas a las aguas superficiales, subterráneas y marinas. En el artículo 27 de la Carta Magna se establece la facultad que tiene la nación para regular el aprovechamiento de los recursos naturales, además de vigilar la conservación y el mejoramiento de tales recursos, preservando y restaurando el equilibrio ecológico. El art. 73 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en su apartado

XXIX-G, establece que el Congreso de la Unión tiene la facultad de expedir leyes que establezcan la concurrencia del Gobierno Federal, de los gobiernos de los estados y de los municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias, en materia de protección al ambiente y de preservación y restauración del equilibrio ecológico. Los artículos 27 y 73 Constitucionales son fundamento de la Ley de Aguas Nacionales y de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, respectivamente.

Con base en lo anterior, se establece que la construcción, operación y mantenimiento de obras destinadas al tratamiento de aguas residuales por disposición en el suelo debe cumplir con las normas y lineamientos referentes a la prevención de la contaminación de aguas y suelos que al respecto se dictan. En México, la utilización del suelo como medio de depuración de aguas servidas es prácticamente nulo, es por ello que las normas y lineamientos existentes se limitan a determinar los valores que deben satisfacer las aguas residuales respecto a las concentraciones de contaminantes, para su utilización en riego agrícola; este empleo es común en el Valle del Mezquital, en el Estado de Hidalgo, como se explica en el Capítulo 9.

A partir del año de 1926 fue creado un documento denominado Ley sobre Irrigación con el propósito de reglamentar el uso de los recursos hidráulicos en México. La Ley Federal de Aguas sustituyó a la antigua Ley sobre Irrigación en el año de 1972 teniendo vigencia durante veinte años hasta su derogación; posteriormente se instituyó la Ley de Aguas Nacionales en diciembre de 1992. En 1971 fue promulgada la Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental, estando vigente durante 10 años, hasta que el 30 de diciembre de 1981 se expidió la Ley Federal de Protección al Ambiente, que fue reformada en 1983. En marzo de 1988 entró en vigor la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente cuyo objetivo es regular la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente, de donde se deriva la denominación de la propia Ley.

La Ley General de Salud derogó al Código Sanitario de los Estados Unidos Mexicanas; fue emitida el 30 de diciembre de 1983 y publicada en el Diario Oficial de la Federación, el día 7 de febrero de 1984 y modificada por última vez el 14 de junio de 1991. En ella se establece el derecho a la protección a la salud que todo ciudadano tiene y se dictan los lineamientos necesarios para garantizar este derecho, señalando como autoridad máxima para ello a la Secretaría de Salud (SSa).

La Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), antes Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) es la institución encargada de vigilar el cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Protección Ambiental que son publicadas en el Diario Oficial de la Federación. De igual manera se debe cumplir con las disposiciones expuestas en la Ley de Aguas Nacionales que es un documento que compete a la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) a través de la Comisión Nacional del Agua (CNA).

La Figura 8.1 presenta un panorama general de la legislación Nacional relativa a la prevención y el control de la contaminación ambiental

**PANORAMA GENERAL DE LA LEGISLACION NACIONAL  
PARA LA PREVENCION Y CONTROL DE LA CONTAMINACION  
AMBIENTAL**

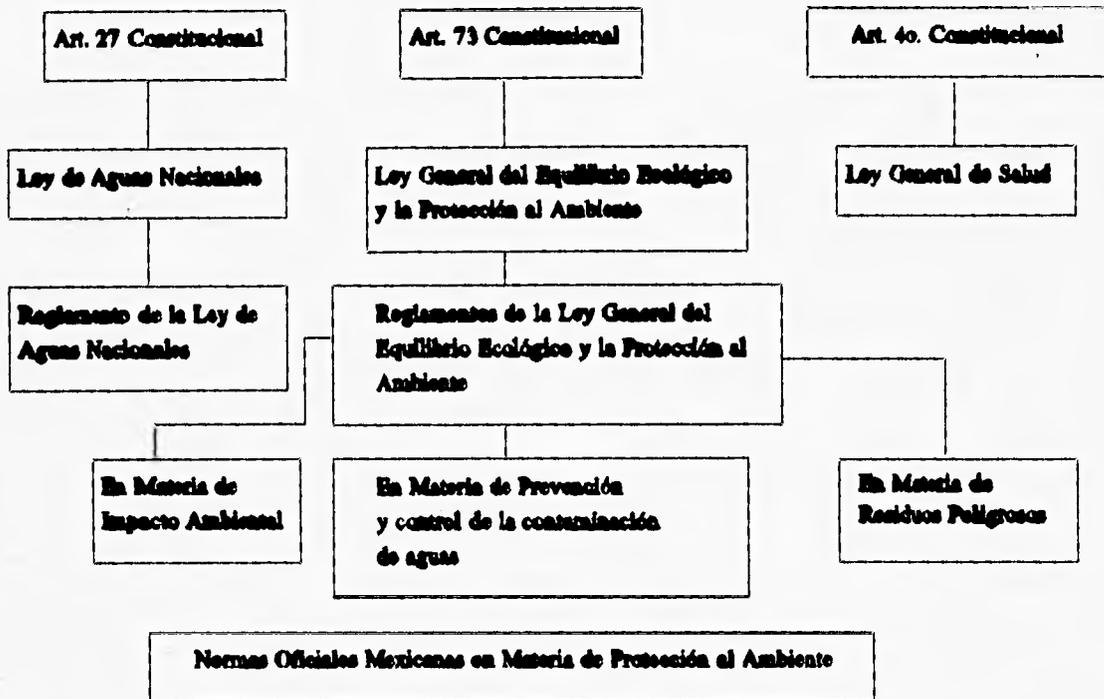


Fig. 8.1 Panorama general de la legislación nacional para la prevención y control de la contaminación

**8.2 Ley de Aguas Nacionales**

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) se encuentra reglamentada por el art. 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos y debe ser acatada en todo el territorio nacional y sus disposiciones son de orden público y de interés social. El objetivo de esta reglamentación es regular la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales; la distribución y el control de las mismas, así como la preservación de su cantidad y calidad. Lo que en ella se establece es válido para las aguas superficiales y para las del subsuelo.

El Título séptimo de la Ley de Aguas Nacionales se refiere a la prevención y control de la Contaminación de las aguas, entre las principales disposiciones se encuentran las que se indican a continuación:

De acuerdo con el art. 86 la Comisión Nacional del Agua (CNA) es la encargada de:

- I. Promover, ejecutar y operar la infraestructura y los servicios necesarios para la preservación, conservación y mejoramiento de la calidad del agua en las cuencas hidrológicas y en los acuíferos.

II. Planear y diseñar programas para la protección de los recursos hidráulicos, teniendo en consideración las relaciones entre los usos del suelo y la cantidad y calidad del agua

III. Determinar las condiciones particulares de descarga de aguas residuales y vigilar el cumplimiento de dichas condiciones; sean vertidas en cuerpos y corrientes de agua nacionales y/o en terrenos en los que puedan resultar contaminados el subsuelo y los acuíferos.

IV. Dar autorización para vertir aguas residuales en el mar

V. Supervisar que el agua para consumo humano cumpla con las normas de calidad correspondientes, así como el reúso de las aguas residuales.

VI. Llevar a cabo o coordinar las actividades necesarias para evitar que residuos como la basura, desechos, materiales, sustancias tóxicas y lodos producto del tratamiento de aguas residuales, contaminen las aguas superficiales o del subsuelo.

VII. Se otorga a la CNA la facultad de sancionar a los individuos, ejidos, comunidades, asociaciones, sociedades o instituciones que no cumplan con los lineamientos tendientes a prevenir y controlar la contaminación de los cuerpos y corrientes de agua.

Conforme a lo indicado en el art. 88 de la LAN se establece que todas las personas físicas o morales (individuos, comunidades, asociaciones, sociedades e instituciones) deben contar con un permiso para descargar aguas residuales a cuerpos de agua y/o infiltrarlas en terrenos propiedad de la nación y en los que puedan resultar contaminados el subsuelo y/o los acuíferos; además la CNA puede derogar tal permiso, en caso de que así resulte conveniente. Los Municipios deben controlar las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado, con el fin de evitar que se efectúen descargas no permitidas. En el caso de que la descarga de aguas residuales afecte fuentes de abastecimiento de agua potable (como puede ser el caso de un acuífero) o dañe a la salud pública, la CNA debe negar o revocar el permiso de descarga e informar sobre el caso a la autoridad competente; en un caso extremo, tiene la autoridad de suspender el suministro de agua hasta que no exista ningún peligro.

Respecto a la infiltración de aguas residuales para recarga de acuíferos, la LAN, por medio del art. 91 establece que para realizar tal proceso, debe contarse con permiso expedido por la Comisión Nacional del Agua y cumplir con las Normas Oficiales Mexicanas que para tal efecto sean emitidas.

La Comisión Nacional del Agua puede suspender las actividades que originen descargas de aguas residuales (según se determina en el art. 92), en los siguientes casos:

- Al no contar con la autorización de descarga de aguas residuales.
- Cuando la calidad de las aguas descargadas no satisfaga las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes, las condiciones particulares de descarga y/o lo dispuesto en la Ley de Aguas Nacionales.

- Si se deja de pagar el derecho por el uso o aprovechamiento de bienes del dominio público de la Nación, como son los cuerpos y corrientes de agua y los terrenos.
- En el caso en que el responsable de la descarga de aguas residuales, diluya éstas para cumplir con los parámetros establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas y/o las condiciones particulares de descarga.

El artículo 96 de la Ley de Aguas Nacionales establece que en zonas de riego y en las que haya una contaminación extendida o dispersa, el manejo y aplicación de sustancias que puedan contaminar las aguas nacionales superficiales o del subsuelo, deben cumplir con los lineamientos y disposiciones correspondientes. Además, es responsabilidad de la CNA promover los reglamentos que se requieran para que exista compatibilidad entre el uso de los suelos con el de las aguas, buscando preservar la calidad de ambos elementos ambientales.

Las disposiciones generales respecto al uso agrícola de las aguas nacionales se encuentran determinadas en el capítulo II de la LAN. En ella se informa que los ejidatarios, comuneros y pequeños propietarios podrán hacer uso, aprovechamiento y/o explotación de las aguas nacionales para riego, mediante concesiones otorgadas por la Comisión Nacional del Agua; esto se indica en el art. 48.

Conforme a lo establecido en el art. 61, la emisión de la normatividad para la construcción, conservación y mantenimiento de las obras de infraestructuras requeridas para las unidades de riego, se encuentra a cargo de la CNA y es posible realizar la construcción, operación y mantenimiento de estas obras en convenio con los interesados como son los productores y los gobiernos de las entidades federativas y los municipios correspondientes. Un conjunto de unidades de riego puede agruparse y constituir un distrito de riego, según lo determina el art. 63 de esta Ley. El art. 64 establece que los Distritos de Riego se conforman por las áreas comprendidas dentro de su perímetro, por las obras de infraestructura hidráulica y las destinadas a su operación y mantenimiento, las aguas superficiales y las del subsuelo. La Ley Nacional del Agua otorga la autoridad a la Comisión de Aguas Nacionales para vigilar la correcta operación y el funcionamiento de los Distritos de riego. También debe promoverse y fomentarse el establecimiento de unidades de drenaje para incrementar la producción agropecuaria, como se señala en el art. 76.

### **8.2.1 Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales**

El día 12 de enero de 1994 fue publicado en el Diario Oficial de la Federación, el Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales. El objeto de este documento es regular la observancia y cumplimiento de la Ley de Aguas Nacionales.

En el Reglamento de la LAN se define a la descarga como la acción de verter, infiltrar, depositar o inyectar aguas residuales a un cuerpo receptor. De igual manera, se interpreta a los cuerpos receptores como las corrientes o depósitos de agua, presas, cauces, zonas marinas o bienes nacionales donde se descargan aguas residuales, así como a los terrenos en los que se infiltran o inyectan dichas aguas, cuando puedan contaminar el suelo o los acuíferos. Se entiende al uso agrícola como la utilización de agua nacional destinada a la actividad de siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas.

El art. 30 especifica que al presentarse la solicitud de concesión de aguas para uso agrícola, no es necesario solicitar al mismo tiempo el permiso de descarga de aguas residuales, pero debe asumirse la obligación de cumplir con los valores establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas y con las condiciones particulares de descarga que se emitan para tal efecto.

El Título Séptimo del Reglamento se denomina: Prevención y Control de la Contaminación de las Aguas. En su art. 135 establece una serie de requisitos que deben cumplir los responsables de descargas de aguas residuales a los cuerpos receptores, como son:

- Contar con el permiso de descarga de aguas residuales expedido por la CNA.
- Tratar las aguas residuales previamente a su vertido en los cuerpos receptores, cuando esto sea necesario para cumplir con las obligaciones establecidas en el permiso de descarga correspondiente.
- Cubrir, cuando sea necesario, el derecho federal por el uso o aprovechamiento de bienes del dominio público como cuerpos receptores de descargas de aguas residuales.
- Instalar y mantener adecuadamente, los dispositivos de aforo y de muestreo que permitan verificar los volúmenes de descarga y las concentraciones de los parámetros que estipule el permiso de descarga.
- Operar y dar mantenimiento a las obras e instalaciones que se requieran para el manejo y tratamiento de las aguas residuales, así como para asegurar el control de la calidad de estas aguas antes de ser descargadas en cuerpos receptores.
- Efectuar un monitoreo de la calidad de las aguas residuales que sean descargadas o que se infiltren en el suelo.

Los usuarios de agua tienen la responsabilidad de cumplir las Normas Oficiales Mexicanas y las condiciones particulares de descarga que se establezcan, según lo estipula el art. 137. La CNA, en coordinación con las autoridades competentes, expedirá las Normas Oficiales Mexicanas que se requieran para hacer compatible el uso del suelo con los objetivos de prevención y control de la contaminación de las aguas y de los bienes nacionales.

Los lodos generados en los procesos de tratamiento de las aguas residuales deben estabilizarse en términos de las disposiciones legales y reglamentarias. Los sitios en que se estabilicen deben impermeabilizarse con materiales que no permitan el flujo de lixiviados y contar con drenes o con estructuras que permitan la recolección de lixiviados; en el caso de que los lodos, habiendo sido estabilizados y secados, sigan reportando concentraciones de contaminantes mayores a las permisibles, deben enviarse a zonas de confinamiento controlado. Las aguas producto del escurrimiento y de los lixiviados deberán ser tratadas antes de descargarse a cuerpos receptores. Estos puntos se encuentran establecidos en el art. 148 del Reglamento de la LAN.

El art. 150 determina que la CNA promoverá las medidas preventivas y de control para evitar la contaminación de las aguas superficiales o las del subsuelo por materiales y residuos peligrosos; en caso de que el vertido o infiltración de estos materiales y residuos peligrosos contaminen las aguas nacionales superficiales o subterráneas, la CNA establecerá las medidas correctivas que deberán efectuarse.

La prohibición de descarga en cuerpos receptores y zonas federales de lodos producto del tratamiento de aguas residuales y demás desechos o residuos que, por efecto de disolución o

arrastre, contaminen las aguas de los cuerpos receptores, se enfatiza en el art. 151.

En materia de educación ambiental el art. 156 permite a la CNA promover ante las autoridades correspondientes, el establecimiento de programas educativos destinados a orientar sobre la prevención y control de la contaminación del agua; además de su aprovechamiento racional.

### **8.3 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente**

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) es un documento en el cual se determinan las medidas enfocadas a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como al cuidado del ambiente que debe prevalecer dentro del territorio nacional. Fue publicada en el Diario Oficial de la Federación del día 28 de enero de 1988 y entró en vigor en marzo del mismo año.

Los títulos y capítulos de esta Ley, que son de interés para el presente trabajo se enlistan a continuación:

**Título Tercero. Aprovechamiento racional de los recursos naturales.**

- Capítulo I. Aprovechamiento racional del agua y de los ecosistemas acuáticos.
- Capítulo II. Aprovechamiento racional del suelo y sus recursos.

**Título Cuarto. Protección al ambiente.**

- Capítulo II. Prevención y control de la contaminación del agua y de los ecosistemas acuáticos
- Capítulo III. Prevención y control de la contaminación del suelo.

**Capítulo V. Instrumentos de la política ecológica**

- Sección V. Evaluación del Impacto Ambiental

En cuanto a los reglamentos de la LGEEPA resultan de interés para este trabajo los siguientes:

- Reglamento de la LGEEPA en materia de Impacto Ambiental
- Reglamento de la LGEEPA para la Prevención y Control de la Contaminación de Aguas
- Reglamento de la LGEEPA en materia de residuos peligrosos

A continuación se resumen los principales artículos de esta Ley que tratan acerca del aprovechamiento y la contaminación del agua y del suelo.

En el Capítulo I del Título Tercero se señala que tanto el Estado como la Sociedad deben proteger los recursos hidráulicos, los suelos y la capacidad de recarga de los acuíferos.

El artículo 98 del Capítulo II trata del aprovechamiento racional del suelo y de sus recursos; entre los aspectos más importantes a los que se hace referencia se encuentran los siguientes:

- I. El uso del suelo debe ser compatible con sus características y propiedades naturales, sin alterar el equilibrio de los ecosistemas.
- II. Los suelos deben conservar su integridad física y su capacidad productiva después del uso que de ellos se haya hecho.
- III. Prohíbe realizar actividades productivas que provoquen la erosión, degradación o modificación de la topografía y la ecología.
- IV. En zonas cuyas pendientes puedan ocasionar erosión o degradación del suelo, deben plantarse cultivos y desarrollar tecnologías encaminadas a atenuar tales efectos.
- V. Toda obra que deteriore el suelo, debe incluir medidas para la regeneración del mismo.

El Título Tercero trata acerca de la prevención y control de la contaminación del suelo. En el art. 103 de este título se indica que todas las actividades agropecuarias deben incluir medidas de conservación y recuperación de los suelos y del equilibrio en la ecología. La SEDESOL establece que deben realizarse estudios de impacto ambiental, antes de otorgar cambios en el uso del suelo, en el caso de que se puedan ocasionar deterioros en éste, como lo indica el art. 104. Además debe ejecutar programas para restaurar el equilibrio ecológico y en el art. 105 se otorga la facultad al ejecutivo federal de expedir declaratorias que regulen el uso del suelo, el aprovechamiento de los recursos y la realización de actividades.

El Capítulo II de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente se refiere a la prevención y control de la contaminación del agua y de los ecosistemas acuáticos.

En el art. 117 se establece que el Estado y la Sociedad deben prevenir la contaminación de ríos, cuencas, aguas marinas y demás depósitos y corrientes de agua, además de las del subsuelo; enfatiza también la necesidad de llevar a cabo el tratamiento de las aguas descargadas con el fin de darles un reuso en otras actividades y preservar el equilibrio de los ecosistemas; además de ello, queda establecido que antes de descargar aguas residuales urbanas en cuerpos o corrientes de agua, superficiales o subterráneas, debe aplicarse tratamiento a las aguas por desechar.

La Secretaría de Desarrollo Social entre otras obligaciones, tiene las que se establecen en el art. 119, y que son:

- Promover el reuso de aguas residuales tratadas en actividades agrícolas e industriales
- Determinar los procesos de tratamiento según criterios sanitarios emitidos por la Secretaría de Salud.
- Expedir Normas Técnicas Ecológicas (actualmente denominadas Normas Oficiales Mexicanas) para el uso o aprovechamiento de aguas residuales; para ello contará con la asesoría y colaboración de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (a través de la Comisión Nacional del Agua) y con la Secretaría de Salud, como se mencionó con anterioridad.

A través de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente se prohíbe descargar o infiltrar en cuerpos o corrientes de agua, en el suelo o en el subsuelo, aguas residuales que contengan contaminantes y que no hayan sido tratadas de manera previa; para poder efectuar esta descarga es necesario contar con la autorización correspondiente; todo esto, de acuerdo con el art. 121 en el Capítulo II de este documento. El art. 122 determina que las aguas residuales municipales, domésticas, industriales o agropecuarias que se descarguen al alcantarillado y las que se infiltren en el subsuelo o se viertan sobre el terreno deben cumplir con condiciones que prevengan la contaminación de cuerpos receptores e interferencias en los procesos de depuración de aguas.

El artículo 123 establece que las descargas en el alcantarillado, en ríos, cuencas, cauces, vasos, aguas marinas (depósitos y corrientes de agua) y los derrames de aguas residuales en suelos y/o su infiltración a través del terreno, deben cumplir con las Normas Técnicas Ecológicas (actualmente Normas Oficiales Mexicanas) que se hayan expedido para tal fin y con las condiciones particulares de descarga determinadas. El responsable de tales descargas debe implantar medidas y sistemas de tratamiento, hasta el nivel que se requiera en cada caso en particular. Si las descargas, derrames o infiltraciones contienen contaminantes peligrosos, deben ser autorizados previamente por la SEDESOL.<sup>1</sup>

De acuerdo con el art. 124 en el caso de que las aguas residuales afecten a fuentes de abastecimiento de agua (mantos acuíferos, pozos subterráneos, etc.), el permiso de descarga será negado por la autoridad competente a través de SEDESOL.<sup>1</sup>

La Secretaría de Desarrollo Social<sup>1</sup> tiene la facultad de determinar las condiciones particulares de descarga y los sistemas de tratamiento de aguas residuales (conforme con el art. 125) y toda aquella planta, proceso o equipo de tratamiento debe cumplir con las Normas Técnicas Ecológicas (actualmente NOM) existentes.

El art. 128 especifica que las aguas residuales del alcantarillado urbano pueden emplearse en la industria y en la agricultura siempre y cuando sean tratadas hasta el nivel requerido por las Normas Oficiales Mexicanas. Para el empleo de aguas residuales en la agricultura deben llevarse a cabo actividades que mejoren la calidad del agua servida, las prácticas de riego y la reglamentación de los cultivos.

Es necesario que las Secretarías de Desarrollo Social y la de Salud efectúen de manera conjunta pruebas a manera de monitoreos para determinar la calidad de las aguas y detectar la existencia de contaminantes, llevando a cabo las medidas requeridas para el mejoramiento de la calidad del agua; esto se encuentra establecido en el art. 133 de esta Ley.

La LGEEPA dedica el Capítulo III a establecer los lineamientos encaminados a la prevención y control de la contaminación del suelo. En el artículo 134 de tal documento se enuncian los siguientes puntos:

---

<sup>1</sup> En lo referente a las descargas de aguas residuales, a partir del 25 de mayo de 1992 fueron restructuradas las atribuciones tanto de la SEDESOL como de la SARH, para otorgar a esta última, a través de la CNA las facultades suficientes para regular, controlar y sancionar las descargas de aguas residuales que se vierten a cuerpos de agua de jurisdicción federal (ríos, arroyos, barrancos o infiltraciones)

- La responsabilidad de evitar y prevenir la contaminación del suelo se atribuye al Estado y a la sociedad en general.
- Es necesario llevar a cabo un manejo adecuado de los elementos o compuestos que contaminan a los suelos y que pueden ser constituyentes de las aguas negras crudas y de los lodos; esto provoca la necesidad de limitar la generación de todo tipo de residuos.
- Podrán utilizarse plaguicidas, fertilizantes y otras sustancias que pueden ser tóxicas, siempre y cuando no se afecte al ambiente.

El artículo 135 señala los criterios siguientes para prevenir y controlar la contaminación del suelo:

- Ordenación y regulación del desarrollo urbano
- Operación de sistemas de limpia y de disposición final de residuos municipales en rellenos sanitarios
- Establecer autorizaciones para la instalación y operación de depósitos de residuos, que para el caso de este trabajo pueden tratarse de lodos.
- Otorgamiento de autorizaciones para todas las actividades que tengan relación con el empleo de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas.

Todos aquellos residuos (incluyendo las aguas servidas y los lodos) que puedan acumularse, depositarse o infiltrarse en los suelos, deben reunir las condiciones necesarias para evitar su contaminación y las alteraciones en el proceso biológico, los posibles daños que alteren su aprovechamiento, uso o explotación y todos los riesgos y daños que puedan causar a la salud; esto se encuentra especificado en el art. 136 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. El art. 139 del mismo documento indica que la descarga, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos, estará reglamentada por las normas que para tal efecto se expidan.

La LGEEPA en su sección V trata sobre la evaluación del impacto ambiental y la considera como un instrumento de planeación que permite predecir, evitar o atenuar el deterioro de los ecosistemas, generado por la realización de obras o actividades de carácter público o privado. El art. 28 establece que la realización de obras o actividades públicas o privadas, que puedan causar desequilibrios ecológicos o rebasar los límites y condiciones señalados en reglamentos y NOM para proteger al ambiente, deben contar con la autorización previa del Gobierno Federal por conducto de la SEDESOL, o de las entidades federativas o municipios, así como al cumplimiento de requisitos que se impongan al evaluar el impacto ambiental. Para esto, debe presentarse una manifestación de impacto ambiental que describa los efectos posibles de las obras o actividades en el ambiente.

De acuerdo con el art. 29 el Gobierno Federal, a través de la SEDESOL, debe evaluar el impacto ambiental entre diferentes tipos de obras. Para interés de este trabajo, destacan las obras públicas federales y las obras hidráulicas. Dentro de ellas puede considerarse a las obras de tratamiento de aguas residuales y de residuos peligrosos como pueden ser los lodos. El aprovechamiento de terrenos forestales y de sus materiales debe cumplir con las disposiciones generales de impacto ambiental por regiones, ecosistemas o especies emitidas por la SEDESOL, conforme a lo señalado por el art. 30; este último art. puede ser de interés en caso de que se

pretenda implantar un sistema de tratamiento en suelos en regiones forestales, como puede ser el caso del riego de bosques con aguas servidas.

### **8.3.1 Reglamento de la LGEEPA para Prevención y Control de la Contaminación de Aguas**

Este reglamento fue publicado en el Diario Oficial de la Federación, el 29 de marzo de 1993. Tiene por objeto proveer la observancia de la entonces denominada Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental (derogada y sustituida en la actualidad por la LGEEPA), en lo referente a la prevención y control de la contaminación de las aguas.

El art. 6 considera entre los procedimientos que deben seguirse para preservar y restaurar la calidad de los cuerpos receptores a el tratamiento de aguas residuales para el control parámetros tales como: sólidos sedimentables, grasas y aceites, materia flotante, temperatura y potencial de hidrógeno (pH). Además de ello, toma en cuenta como un procedimiento alterno para el mismo fin, a la determinación y cumplimiento de condiciones particulares de descarga de aguas residuales, mediante su tratamiento, de acuerdo con estudios de la capacidad de asimilación y dilución de los cuerpos receptores.

El registro ante la SARH de descargas de aguas residuales que no sean provenientes de uso doméstico exclusivo, se encuentra estipulado en el art. 7 de este reglamento; de acuerdo con al art. 13, los responsables de descargas de aguas residuales en cuerpos receptores, deben cumplir en un plazo máximo de tres años, con las condiciones de descarga siguientes:

#### **MAXIMOS TOLERABLES**

|                          |  |
|--------------------------|--|
| I. Sólidos sedimentables | 1.0 ml/l   |
| II. Grasas y Aceites     | 70 mg/l  |
| III. Materia flotante    | Ninguna que pueda ser retenida por malla de 3 mm de claro libre cuadrado |
| IV. Temperatura          | 35°C   |

En caso de requerir de obras o instalaciones de purificación de aguas, debe presentarse un informe preliminar de ingeniería (art. 16), que entre otros puntos, incluirá el proyecto del sistema de tratamiento de aguas residuales y de disposición de lodos (art. 17). En el art. 24 se presentan tablas que fijan condiciones particulares para la descarga de aguas residuales, que pueden usarse de manera complementaria con las NOM y con los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua.

La vigilancia e inspección del reglamento será ejercida por la Secretaría de Salud (antes Secretaría de Salubridad y Asistencia) y por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), según lo estipulan los art. 40 a 43.

### **8.3.2 Reglamento de la LGEEPA en Materia de Impacto Ambiental**

Este reglamento fue publicado en el Diario Oficial de la Federación del 7 de junio de 1988. En su art. 5° establece que deberán contar con previa autorización de la SEDESOL, en materia de Impacto Ambiental, las personas físicas y morales que pretendan realizar obras o actividades públicas o privadas, que puedan causar desequilibrios ecológicos o rebasar los límites y condiciones señalados en los Reglamentos y en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) emitidas por la Federación para proteger al ambiente, así como cumplir los requisitos particulares que les sean impuestos. Entre el tipo de obras o actividades de interés para este tema, se consideran a las siguientes:

- Obra pública federal. Con excepción de bienes inmuebles.
- Obras hidráulicas. Salvo unidades hidroagrícolas menores de cien hectáreas.
- Instalaciones de tratamiento, confinamiento o eliminación de residuos peligrosos (como pueden ser los lodos).
- Toda obra o actividad que pueda afectar el equilibrio ecológico de dos o más entidades federativas, de otros países o de zonas de jurisdicción internacional.

El art. 6° determina que toda obra o actividad referidas en el art. 5° de este mismo reglamento, debe contar y presentar ante la Secretaría una Manifestación de Impacto Ambiental. Las obras o actividades consideradas como altamente riesgosas deben presentar a SEDESOL un estudio de riesgo.

### **8.3.3 Reglamento de la LGEEPA en Materia de Residuos Peligrosos**

El Reglamento de la LGEEPA en Materia de Residuos Peligrosos fue publicado en el Diario Oficial de la Federación el día 25 de noviembre de 1988. Debido a que los lodos producto del tratamiento biológico de aguas residuales de origen municipal pueden considerarse como residuos peligrosos es que se presenta brevemente este reglamento.

El art. 4° indica que corresponde a la SEDESOL publicar en el Diario Oficial de la Federación, Normas Oficiales Mexicanas en las que se incluyan listados de residuos peligrosos (entre los que se incluyen a los lodos) y se dicten diferentes lineamientos respecto al manejo, disposición y tratamiento de los lodos.

Además de esto, la SEDESOL tiene la facultad de autorizar la instalación y operación de sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reúso, tratamiento, reciclaje, incineración y disposición final de residuos peligrosos.

Debe efectuarse una evaluación de Impacto Ambiental de los proyectos de tratamiento, confinamiento o eliminación de residuos sólidos.

Este reglamento trata aspectos referentes a la generación de residuos peligrosos, del manejo, medidas de control y seguridad; además de indicar las sanciones en el caso de incumplimiento.

#### 8.4 Ley General de Salud

La Ley General de Salud es un documento en el que se establece el derecho a la protección de la salud que tiene toda persona con base en el art. 4o de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en el que se determina que "toda persona tiene derecho a la protección de la salud". En el artículo tercero está señalado que debe existir una prevención y control de los efectos nocivos que puedan causar los factores ambientales al hombre. Los artículos 117 y 118 establecen lo siguiente:

**Art. 117.** La formulación y conducción de la política de saneamiento ambiental corresponde a la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (ahora denominada Secretaría de Desarrollo Social), en coordinación con la Secretaría de Salud, respecto a la salud humana.

**Art. 118.** Corresponde a la Secretaría de Salud:

I. Determinar los valores de concentración máxima permisible para el ser humano de contaminantes en el ambiente.

II. Emitir las Normas Técnicas a que deberá sujetarse el tratamiento del agua para uso y consumo humano.

III. Establecer criterios sanitarios para la fijación de condiciones particulares de descarga, el tratamiento y uso de aguas residuales o en su caso, para la elaboración de Normas Técnicas Ecológicas en la materia.

IV. Promover y apoyar el saneamiento básico.

V. Asesorar en criterios de Ingeniería Sanitaria de obras públicas y privadas para cualquier uso.

En el art. 119. se dispone que corresponde a la Secretaría de Salud y a los gobiernos de las entidades federativas, en sus respectivos ámbitos de competencia:

II. Vigilar y certificar la calidad del agua para uso y consumo humano

Se prohíbe la descarga de aguas residuales sin el tratamiento requerido para satisfacer los criterios sanitarios que hayan sido emitidos; de igual manera impide la disposición de residuos peligrosos (como pueden ser los lodos) que puedan resultar riesgosos para la salud pública, en cuerpos de aguas superficiales y subterráneas, que sean destinados para uso o consumo humano.

El título vigesimoquinto de la Ley General de Salud trata acerca de los efectos del ambiente en la salud. La Ley General de Salud define en su art. 1335 a la Ingeniería Sanitaria como la especialidad de la Ingeniería que se ocupa del conocimiento, control y mejoramiento del medio físico en que vive el ser humano. La Secretaría de Salud debe promover y apoyar la realización de obras para la disposición de aguas residuales; es función de la misma Secretaría establecer criterios sanitarios para el uso, manejo, tratamiento y disposición de las aguas residuales, con la finalidad de prevenir riesgos para la salud humana; de igual manera se determinarán los valores máximos

permisibles de sustancias peligrosas para la salud en su punto de descarga; esto se indica en los artículos 1339 y 1340.

Se requiere de un permiso sanitario para descargar aguas residuales industriales, que será otorgado en caso de que la concentración de sustancias nocivas para la salud, no exceda los límites máximos permisibles, esto se encuentra asentado en el art. 1341 de la Ley General de Salud.

Las descargas de aguas residuales o contaminantes en cualquier cuerpo de agua superficial o subterránea, cuyas aguas se destinen para uso y consumo humano, debe sujetarse a las Normas Técnicas que para tal efecto se emitan, como lo señala el art. 1342. Además, es responsabilidad de la Secretaría de Salud vigilar el cumplimiento de las disposiciones sanitarias relativas a las aguas residuales.

Debido a que la disposición de aguas residuales en el suelo implica el riesgo de contaminación del agua subterránea y de cultivos que pueden llegar a ser consumidos por el ser humano, se hace énfasis en la necesidad de establecer niveles máximos de contaminantes en las aguas residuales que son reutilizadas para riego. A continuación, se trata respecto a tales normas.

#### **8.5 Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Protección al Ambiente**

Las Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Protección Ambiental (NOM) son el conjunto de reglas científicas y tecnológicas emitidas por la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), con la colaboración de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) y la Secretaría de Salud (SS), que establece los requisitos, especificaciones, condiciones, procedimientos, parámetros y límites permisibles que deberán observarse en el desarrollo de actividades o uso y destino de bienes, que causen o puedan provocar desequilibrio ecológico o daño al ambiente y que permitan uniformizar principios, criterios, políticas y estrategias. Estas normas determinan los parámetros que garanticen las condiciones necesarias para el bienestar de la población y para asegurar la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente.

La Norma Oficial Mexicana NOM-CCA-032-ECOL/1993 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las aguas residuales de origen urbano o municipal para su disposición mediante riego agrícola. En esta norma se determinan los parámetros físicos, químicos y bacteriológicos con la finalidad de prevenir el deterioro ecológico y que la calidad del agua sea la requerida para no dañar la salud de la población.

Esta Norma debe ser acatada, de manera obligatoria, por todos los responsables de descargas de aguas negras municipales e industriales, que cuenten con permiso para disponer sus aguas por medio de riego agrícola. Los parámetros o unidades de medición se obtendrán a partir de muestras simples o compuestas. Se entiende como muestra simple a aquella que se tome de manera ininterrumpida para completar un volumen proporcional al caudal, que sea lo más representativa posible de la descarga de aguas residuales. Los valores de los parámetros físicos y químicos se obtendrán del análisis de muestras compuestas, que resulten de la mezcla de 5 muestras simples. La Norma define al riego agrícola como la acción de aportar al suelo la humedad necesaria para el desarrollo de los cultivos y que como uno de sus efectos más importantes tiene a la infiltración de las aguas negras. En el Cuadro 8.1 se especifican los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales de origen urbano o municipal que se dispongan

mediante riego agrícola.

La Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) a través de la Comisión Nacional del Agua (CNA), tiene la facultad de establecer condiciones particulares de descarga que determinen límites máximos permisibles aún más estrictos que los que se muestran en el Cuadro 8.1; esto puede ocurrir si existen descargas que aún cumpliendo con los valores determinados en dicho Cuadro provoquen efectos adversos en el cuerpo receptor. La CNA puede fijar límites a otros parámetros tales como: Demanda Química de Oxígeno, Fósforo total, Grasas y aceites, Nitrógeno total, metales pesados no incluidos en el Cuadro 8.1 y Relación de adsorción de sodio (RAS). En los casos en los que sea conveniente determinar condiciones particulares de descarga puede hacerse uso de los criterios ecológicos. Los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua fueron publicados en el Diario Oficial de la Federación del día 2 de diciembre de 1989; los criterios correspondientes a la calidad del agua para riego agrícola fueron definidos considerando su aplicación a todo tipo de cultivos; pueden ser empleados como un complemento de las NOM. En el Cuadro 8.2 se muestran los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua para Riego.

La Norma Oficial Mexicana NOM-CCA-033-ECOL/1993 determina las condiciones bacteriológicas para el uso de aguas residuales de origen urbano o municipal, o de la mezcla de éstas con la de los cuerpos de agua, para el riego de hortalizas y productos hortofrutícolas. Las características de bacteriología deben determinarse obedeciendo a que las aguas residuales de origen urbano o rural se utilizan ampliamente para el riego de cultivos hortícolas, hortofrutícolas y de otros productos que se consumen crudos, además de que pueden afectar a la salud humana.

Los usuarios de aguas residuales para riego agrícola deben cumplir todos los lineamientos que se indican en el Cuadro 8.3 referentes a tipo de riego, intervalo mínimo entre el último riego y la cosecha así como acerca de los cultivos permitidos para irrigación con aguas residuales. El incumplimiento de tal Norma Oficial se sancionará según se establece en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y en la Ley de Aguas Nacionales.

Cuadro 8.1

| <b>NOM-CCA-032-ECOL/1993</b>  |                                    |
|---|------------------------------------|
| <b>LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES PARA LAS AGUAS RESIDUALES DE ORIGEN URBANO O MUNICIPAL QUE SE DISPONGAN MEDIANTE RIEGO AGRICOLA</b> |                                    |
| <b>Parámetros</b>   | <b>Límites máximos permisibles</b> |
| pH (Unidades de pH)   | 6.5 a 8.5                          |
| Conductividad Eléctrica (micromhos/cm)  | 2000                               |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l)  | 120                                |
| Sólidos suspendidos totales (mg/l)  | 120                                |
| Aluminio (mg/l)   | 5.0                                |
| Arsénico (mg/l)   | 0.1                                |
| Boro (mg/l)   | 1.5                                |
| Cadmio (mg/l)   | 0.01                               |
| Cianuros (mg/l)   | 0.02                               |
| Cobre (mg/l)  | 0.2                                |
| Cromo total (mg/l)  | 0.1                                |
| Fierro (mg/l)   | 5.0                                |
| Fluoruros (mg/l)  | 3.0                                |
| Manganeso (mg/l)  | 0.2                                |
| Níquel (mg/l)   | 0.2                                |
| Plomo (mg/l)  | 5.0                                |
| Selenio (mg/l)  | 0.02                               |
| Zinc (mg/l)   | 2.0                                |

Fuente: Diario Oficial de la Federación. SEDESOL. Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Protección Ambiental. 18 de octubre de 1993

Cuadro 8.2

| <b>CRITERIOS ECOLOGICOS DE CALIDAD DEL AGUA PARA RIEGO AGRICOLA</b> |   |
|---|---|
| <b>Sustancia o parámetro</b>  | <b>Niveles máximos en mg/l, excepto en donde se indique otra unidad</b> |
| Aluminio  | 5.0   |
| Antimonio   | 0.1   |
| Arsénico  | 0.1   |
| Cadmio  | 0.01  |
| Cianuro   | 0.02  |
| Cloruros  | 147.5   |
| Cobre   | 0.020   |
| Coliformes totales  | 1000  |
| Cromo hexavalente   | 1.0   |
| Conductividad eléctrica (umhos/cm)                                  | 1.0   |
| Fierro  | 5.0   |
| Fluoruros   | 1.0   |
| Níquel  | 0.2   |
| Potencial de hidrógeno  | 4.5 - 9   |
| Plomo   | 5.0   |
| Selenio   | 0.02  |
| Sólidos disueltos   | 500   |
| Sólidos suspendidos   | 50  |
| Sulfatos  | 130   |

Fuente: Gaceta Ecológica> ol. II, No.6, enero de 1990, SEDUE. Publicado en el Diario Oficial de la Federación del 2 de diciembre de 1989. Acuerdo por el cual se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89.

Cuadro 8.3

| <b>NOM-CCA-033-ECOL/1993</b><br><b>CONDICIONES BACTERIOLÓGICAS PARA EL USO DE AGUAS RESIDUALES EN RIEGO DE HORTALIZAS Y PRODUCTOS HORTOFRUTICOLAS</b> |              |  |   |
|---|--------------|--|---|
| Tipo de riego   | Tipo de agua | Intervalo mínimo entre último riego y cosecha (días) | Cultivos no permitidos  |
| INUNDACION  | 1            | 20   | Los señalados en el artículo 3.1 excepto ajo, frijol ejotero, pepinillo pickle, pepino, jicama, melón y sandía.                                     |
|   | 2            | 20   | Los indicados en el artículo 3.1, excepto el melón y la sandía.   |
|   | 3            | 20   | Los que se señalan en el artículo 3.1   |
|   | 4            | 20   | Los que se están indicados en el artículo 3.2   |
| SURCOS  | 1            | 15   | Los señalados en el punto 3.1, excepto ajo, frijol ejotero, pepino, pepinillo pickle, jicama, melón y sandía, así como el tomate verde o de cáscara |
|   |              | 20   | Libre cultivo   |
|   | 2            | 20   | Los señalados en el artículo 3.1 excepto ajo, pepino, jicama, melón y sandía, así como el tomate verde o de cáscara.                                |
|   | 3            | 20   | Los que se indican en el punto 3.1, excepto melón y sandía  |
|   | 4            | 20   | A los que se hace referencia en el artículo 3.2   |
| ASPERSION   | 1            | 20   | Los señalados en el artículo 3.1, excepto ajo, pepino, pepinillo pickle, jicama, melón y sandía.  |
|   | 2            | 20   | Los indicados en el artículo 3.2  |
|   | 3            |  |   |
|   | 4            |  |   |

|  |
|--|
| <p><b>Tipo de Agua.</b><br/>                 Tipo 1. Menos de 1000 coliformes totales por 100 ml y ningún huevo viable de helminto por litro de agua.<br/>                 Tipo 2. De 1 a 1000 coliformes fecales por 100 ml y cuando más un huevo viable de helminto por litro.<br/>                 Tipo 3. De 1001 a 100 000 coliformes fecales por cada 100 ml<br/>                 Tipo 4. Más de 100 000 coliformes fecales por cada 100 ml</p> <p><b>Artículo 3.1. Hortalizas.</b> Acelga, ajo, apio, berro, betabel, brócoli, cebolla, cilantro, col y coliflor; epazote, espinaca, frijol ejotero, hierbabuena, hongo, lechuga, pápalo y perejil; quelite, quintonil, rábano, zanahoria, pepinillo pickle, calabacita, jitomate, tomatillo y tomate verde o de cáscara, con excepción de las cinco últimas cuando se siembran con espaldera. Se equiparan a las hortalizas los siguientes frutos: fresa, jicama, melón, sandía y zarzamora.</p> <p><b>Artículo 3.2 Productos hortofrutícolas.</b> Los indicados en el inciso anterior y todas las demás hortalizas y frutos en general.</p> |
|--|

Fuente: Diario Oficial de la Federación. SEDESOL. Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Protección Ambiental. 18 de octubre de 1993

Para el caso de la infiltración de aguas residuales en el terreno no se cuenta aún con una Norma Oficial en particular que establezca los límites máximos permisibles de contaminantes en las aguas servidas por infiltrar. Sin embargo, en el Diario Oficial de la Federación del lunes 18 de octubre de 1993 fueron publicadas las Normas Oficiales Mexicanas de Protección Ambiental en las que se determinan los valores máximos permitidos de contaminantes en las descargas de aguas residuales provenientes de diferentes industrias; estos valores consideran los límites permisibles para evitar efectos adversos en los depósitos o corrientes de agua y daños que puedan ocasionar los derrames de aguas residuales en los terrenos y su infiltración en los suelos. Una relación de Normas Oficiales Mexicanas que establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores (incluyendo dentro de éstos a los cuerpos y corrientes de agua y a los suelos), se presenta en el Cuadro 8.4 y en el Cuadro 8.5 se muestran a manera de ejemplo, los niveles máximos permisibles de contaminantes para algunas de las industrias más importantes, referentes a dichas Normas.

Hasta ahora no ha sido elaborada una norma específica para la aplicación de lodos al terreno, pero atendiendo a las características de éstos, pueden ser considerados como residuos peligrosos. La Norma Oficial Mexicana NOM-CRP-001-ECOL/1993, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 22 de octubre de 1993, establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente; en ella se considera que un residuo, en cualquier estado físico es peligroso debido a sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, venenosas, biológico-infecciosas y que representan un peligro para el equilibrio ecológico. En esta Norma se identifican a los residuos peligrosos y se ordenan de acuerdo a las industrias y los procesos que los generan, así como los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

En la tabla 2 del anexo 3 de esta Norma, se considera como residuo peligroso a los lodos de desecho del tratamiento biológico de aguas residuales que contenga cualquier sustancia tóxica al ambiente en concentraciones mayores a los límites señalados en el art. 5.5 de la misma Norma; este tipo de lodos son los que interesan para este trabajo, pues son los que podrían aplicarse al suelo; los límites permisibles son los siguientes:

- La SEDESOL clasifica a los lodos de desecho del tratamiento biológico del tratamiento de aguas residuales como tóxicos de acuerdo con el código de clasificación de características de los residuos peligrosos (Cretib).
- Un residuo con características biológico-infecciosas se considera peligroso cuando presenta cualquiera de las siguientes propiedades:
  - 1) Cuando el residuo contiene bacterias, virus u otros microorganismos que puedan provocar infecciones.
  - 2) Si contiene toxinas producidas por microorganismos, que causen efectos nocivos a los seres vivos.
  - 3) En caso de que se mezcle un residuo peligroso con un residuo no peligroso se tendrá como resultado un residuo peligroso.

Vale la pena mencionar que en esta Norma se define a lodos producto de diferentes actividades industriales como residuos peligrosos, pero debido a que el proceso en que se originan puede resultar aún más delicado, no se considera conveniente aplicarlos sobre el terreno, para ejemplificar estos casos se cita a lodos de tratamiento de las aguas residuales provenientes del lavado de metales para remover soluciones concentradas o lodos provenientes de lagunas de evaporación del proceso de fundición del plomo, los que evidentemente no debe ni pensarse en disponerlos sobre terrenos o zonas agrícolas.

En México se han incrementado la preocupación y el interés por la restauración del equilibrio ecológico y la preservación del ambiente, debido a ello, se cuenta con Leyes que han sido elaboradas cuidadosamente, intentando atender las necesidades en materia ecológica. Sin embargo, se requiere elaborar aún más Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Protección Ambiental, entre las que deben encontrarse las destinadas a establecer límites permisibles para la infiltración de aguas residuales en el suelo, de manera general y las de disposición de lodos producto de tratamiento biológico sobre el terreno. Además de ello debe realizarse una constante actualización de los límites máximos permisibles, con base en estudios y pruebas de laboratorio; también se requiere vigilar el estricto cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas vigentes.

Cuadro 8.4

| <b>NORMAS OFICIALES MEXICANAS QUE ESTABLECEN LOS LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES A CUERPOS RECEPTORES*</b> |  |
|--|--|
| <b>Norma Oficial Mexicana</b>  | <b>Fuente de generación de la descarga</b>   |
| NOM-CCA-001-ECOL/1993  | - Centrales termoeléctricas convencionales   |
| NOM-CCA-002-ECOL/1993  | - Industria de azúcar de caña  |
| NOM-CCA-003-ECOL/1993  | - Industria de refinación del petróleo y la petroquímica   |
| NOM-CCA-004-ECOL/1993  | - Industria de fabricación de fertilizantes  |
| NOM-CCA-005-ECOL/1993  | - Industria de fabricación de productos plásticos y polímeros sintéticos   |
| NOM-CCA-006-ECOL/1993  | - Industria de fabricación de harinas  |
| NOM-CCA-007-ECOL/1993  | - Industria de la cerveza y de la malta  |
| NOM-CCA-008-ECOL/1993  | - Industria de la fabricación de asbestos de construcción  |
| NOM-CCA-009-ECOL/1993  | - Industria elaboradora de leche y sus derivados   |
| NOM-CCA-010-ECOL/1993  | - Industria de manufactura de vidrio plano y de fibra de vidrio  |
| NOM-CCA-011-ECOL/1993  | - Industria de productos de vidrio prensado y soplado  |
| NOM-CCA-012-ECOL/1993  | - Industria huleira  |
| NOM-CCA-013-ECOL/1993  | - Industria del hierro y del acero   |
| NOM-CCA-014-ECOL/1993  | - Industria textil   |
| NOM-CCA-015-ECOL/1993  | - Industria de la celulosa y el papel  |
| NOM-CCA-016-ECOL/1993  | - Industria de bebidas gaseosas  |
| NOM-CCA-017-ECOL/1993  | - Industria de acabados metálicos  |
| NOM-CCA-018-ECOL/1993  | - Industria de laminación, extrusión y estiraje de cobre y sus aleaciones  |
| NOM-CCA-019-ECOL/1993  | - Industria de impregnación de productos de aserradero   |
| NOM-CCA-020-ECOL/1993  | - Industria de asbestos textiles, materiales de fricción y selladores  |
| NOM-CCA-021-ECOL/1993  | - Industria del curtido y acabado en pieles  |
| NOM-CCA-022-ECOL/1993  | - Industria de matanza de animales y empaqueo de cárnicos  |
| NOM-CCA-023-ECOL/1993  | - Industria de envasado de conservas alimenticias  |
| NOM-CCA-024-ECOL/1993  | - Industria elaboradora de papel a partir de celulosa virgen   |
| NOM-CCA-025-ECOL/1993  | - Industria elaboradora de papel a partir de fibra celulósica reciclada  |
| NOM-CCA-026-ECOL/1993  | - Descargas de restaurantes o de hoteles   |
| NOM-CCA-027-ECOL/1993  | - Industria de beneficio del café  |
| NOM-CCA-028-ECOL/1993  | - Industria de preparación y envasado de conservas de pescados y mariscos y de la industria de producción de harina de aceite de pescado   |
| NOM-CCA-029-ECOL/1993  | - Descargas de hospitales  |
| NOM-CCA-030-ECOL/1993  | - Industria de jabones y detergentes   |
| NOM-CCA-031-ECOL/1993  | - Descargas provenientes de la industria, de actividades agroindustriales, de servicios y el tratamiento de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal |

\* Como cuerpo receptor se consideran a depósitos y corrientes de agua superficial y subterránea y al suelo.

Fuente: Diario Oficial de la Federación. SEDESOL. Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Protección Ambiental. 18 de octubre de 1993.

Cuadro 8.5

| EJEMPLOS DE LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES A CUERPOS RECEPTORES |  |   |  |
|--|--|---|--|
| Norma Oficial Mexicana e industria o fuente que genera la descarga   | Parámetros<br>(mg/l, excepto donde se indique otra unidad)   | Límites máximos permisibles                                     |  |
|  |  | Promedio diario   | Instantáneo  |
| NOM-CCA-001-ECOL/1993<br>Centrales termoeléctricas convencionales  | pH (unidades de pH)<br>Sólidos suspendidos totales (SST)<br>Grasas y aceites<br>Cobre<br>Fierro<br>Fósforo total<br>Zinc   | 8-9<br>80<br>15<br>0.8<br>1.0<br>10<br>2.0                      | 8-9<br>80<br>18<br>1.0<br>1.2<br>12<br>2.4                       |
| NOM-CCA-002-ECOL/1993<br>Industria de azúcar de caña   | pH (unidades de pH)<br>Demanda Bioquímica de Oxígeno (SST)<br>Sólidos sedimentables<br>Grasas y aceites<br>Fenoles   | 6-9<br>60<br>1.0<br>15<br>0.5                                   | 6-9<br>72<br>1.2<br>20<br>0.75                                   |
| NOM-CCA-003-ECOL/1993<br>Industria de refinación de petróleo y petroquímica  | pH (unidades de pH)<br>Grasas y aceites<br>Demanda Química de Oxígeno (DQO)<br>Sulfuros<br>Cromo hexavalente<br>Cromo total<br>Fenoles<br>Sólidos suspendidos totales (SST)                                      | 6-9<br>30<br>100<br>60<br>0.2<br>0.05<br>1.0<br>0.5<br>70       | 6-9<br>45<br>120<br>72<br>0.4<br>0.075<br>1.2<br>0.75<br>0.85    |
| NOM-CCA-013-ECOL/1993<br>Industria del hierro y del acero  | pH (unidades de pH)<br>Grasas y aceites<br>Sólidos suspendidos totales (SST)<br>Nitrógeno Amoniacal<br>Fenoles<br>Cianuros<br>Zinc<br>Plomo<br>Cromo total<br>Níquel   | 6-9<br>30<br>50<br>20<br>0.5<br>0.3<br>1.0<br>0.6<br>1.0<br>2.0 | 6-9<br>40<br>60<br>30<br>0.75<br>0.5<br>1.2<br>0.7<br>1.2<br>2.4 |
| NOM-CCA-014-ECOL/1993<br>Industria textil  | pH (unidades de pH)<br>Demanda Bioquímica de Oxígeno<br>Demanda Química de Oxígeno (DQO)<br>Sólidos sedimentables<br>Grasas y aceites<br>Sólidos suspendidos totales (SST)<br>Cromo total<br>Sulfuros<br>Fenoles | 6-9<br>100<br>200<br>1.0<br>20<br>100<br>1.0<br>0.2<br>0.1      | 6-9<br>120<br>240<br>1.2<br>30<br>120<br>1.2<br>0.4<br>0.2       |
| NOM-CCA-015-ECOL/1993  | pH (unidades de pH)<br>Demanda Bioquímica de Oxígeno<br>Sólidos sedimentables<br>Sólidos suspendidos totales (SST)<br>Grasas y aceites   | 6-9<br>200<br>8<br>200<br>40                                    | 6-9<br>240<br>8.2<br>240<br>50                                   |

Cuadro 8.5 (Continuación)

| EJEMPLOS DE LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES A CUERPOS RECEPTORES   |  |                             |              |
|--|--|-----------------------------|--------------|
| Norma Oficial Mexicana e industria o fuente que genera la descarga   | Parámetros<br>(mg/l, excepto donde se indique otra unidad) | Límites máximos permisibles |              |
|  |  | Promedio diario             | Instantáneo  |
| NOM-CCA-031-ECOL/1993 Descargas de aguas residuales provenientes de la industria, actividades agroindustriales, de servicio y el tratamiento de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal | Temperatura (°C)   | -                           | 40 C (313 K) |
|  | pH (unidades de pH)  | 8 - 9                       | 8 - 9        |
|  | Sólidos sedimentables (ml/l)                               | 5                           | 10           |
|  | Grasas y aceites   | 60                          | 100          |
|  | Conductividad eléctrica (micromhos/cm)                     | 5000                        | 8000         |
|  | Aluminio   | 10                          | 20           |
|  | Arsénico   | 0.5                         | 1.0          |
|  | Cadmio   | 0.5                         | 1.0          |
|  | Cianuros   | 1.0                         | 2.0          |
|  | Cobre  | 5                           | 1.0          |
|  | Cromo hexavalente  | 0.5                         | 1.0          |
|  | Cromo total  | 2.5                         | 5.0          |
|  | Fluoruros  | 3                           | 6            |
|  | Mercurio   | 0.01                        | 0.02         |
|  | Níquel   | 4                           | 8            |
|  | Plata  | 1.0                         | 2.0          |
| Plomo  | 1.0  | 2.0                         |              |
| Zinc   | 6  | 12                          |              |
| Fenoles  | 5  | 10                          |              |
| Sustancias activas al azul de metileno   | 30   | 60                          |              |

Fuente: Diario Oficial de la Federación. SEDESOL. Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Protección Ambiental. 18 de octubre de 1993.

---

**9. SITUACION Y EXPECTATIVAS  
EN MEXICO DEL TRATAMIENTO DEL  
AGUA RESIDUAL EN SUELOS**

---

## CAPITULO 9

### SITUACION Y EXPECTATIVAS EN MEXICO DEL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL EN SUELOS

#### 9.1 Panorama de los recursos hidráulicos y el empleo de aguas residuales en México

##### 9.1.1 Situación general

México es un país con alrededor de 80 millones de habitantes, que se encuentran concentrados en una gran mayoría en grandes zonas urbanas, como son la Ciudad de México y su zona metropolitana, Guadalajara y Monterrey. El fenómeno de alta concentración de la población en dichos núcleos urbanos trae consigo diversas consecuencias como son la generación de grandes cantidades de residuos líquidos y sólidos. En relación a las aguas residuales, en el Cuadro 9.1 se presenta la composición típica y las concentraciones que comúnmente reportan las aguas residuales generadas en el Distrito Federal. El Cuadro 9.2 reporta el panorama de la disposición de aguas residuales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

En la actualidad, en nuestro país se considera al control de la contaminación de los cuerpos de agua mediante el ordenamiento y la promoción del aprovechamiento de las aguas residuales, como una política técnica y económicamente confiable; lo anterior implica el uso eficiente del agua en la economía del país, liberando los volúmenes de agua de buena calidad utilizada en el riego y aprovechándola para abastecimiento de las comunidades, lo que a su vez permite sustituirlas con aguas residuales municipales para el riego; este uso deberá ajustarse a las normas correspondientes respecto al nivel de tratamiento con el que debe cumplir antes de ser utilizada; además de que deben realizarse estudios para determinar aquellos cultivos que puedan ser irrigados de acuerdo con la calidad de las aguas.

Vale la pena considerar que México presenta diferentes características geográficas y climatológicas, lo que ha ocasionado que sus recursos naturales estén concentrados en áreas determinadas. La distribución irregular de los recursos hidráulicos, su sobreexplotación, el excesivo crecimiento demográfico e industrial y las diferencias de elevación entre las regiones ha provocado serias restricciones de consumo y calidad del agua. Además de esto, la insuficiencia de agua y el aumento en su demanda provocará que no se satisfagan los requerimientos para diferentes usos, principalmente para el riego agrícola que demanda gran cantidad de agua, lo que a su vez detiene

el desarrollo regional. En aquellas regiones en que la disponibilidad de agua sea reducida y se presenten altas demandas de este recurso, es posible utilizar aguas residuales municipales con el fin de cubrir las necesidades.

Además de estas carencias suelen ocurrir conflictos entre los usuarios de aguas residuales debido a las disputas para el empleo de éstas atendiendo a los efectos benéficos que los nutrientes contenidos en las aguas residuales tienen sobre los suelos y los cultivos. Lamentablemente el reúso de aguas residuales en México se ha desarrollado de manera desordenada y sin control.

En México no se ha considerado al suelo como un medio de tratamiento de aguas residuales, enfoque que tiene perspectivas interesantes. Con este fin debe estudiarse la factibilidad, posibilidad y conveniencia de proyectar, construir y operar sistemas de irrigación, infiltración, escurrimiento superficial y de aplicación de lodos.

Debido a la creciente necesidad de reutilizar aguas servidas, es necesario impulsar los proyectos de sistemas de tratamiento de aguas, entre los que debe considerarse a los que emplean al suelo y los terrenos como medios de remoción; esto, además de resultar novedoso en el ámbito nacional, resulta atractivo debido a aspectos económicos, ya que en ellos se tiene un costo de construcción, operación y mantenimiento, considerablemente más bajo que para una planta de tratamiento de aguas residuales compuestas por distintas unidades. Beneficios tales como la recarga de acuíferos, el empleo de terrenos que pudieran estar desaprovechados y la utilización de los nutrientes contenidos en el agua residual y en los lodos para el crecimiento de la productividad agrícola hacen de este tipo de sistemas una alternativa para la depuración de aguas de desecho.

### **9.1.2 Diagnóstico de la distribución de los recursos hidráulicos**

Con respecto a la distribución de los recursos hidráulicos, el país puede dividirse en las cuatro zonas que se describen a continuación:

- **Zona Pacífico Norte y Centro.** Ubicada al noroeste del país, tiene una superficie de 582 000 km<sup>2</sup> y representa el 28% del territorio nacional. Presenta carencias de agua por lo que reporta déficit en su balance hidráulico.
- **Zona Norte.** Se encuentra en el norte y noroeste de nuestro país, cuenta con una superficie de 646 233 km<sup>2</sup> constituyendo un 33 % del territorio nacional pero tiene serias limitaciones en cuanto a recursos hidráulicos.
- **Zona Central.** Su extensión es de 284 000 km<sup>2</sup> lo que representa el 14 % del territorio mexicano. También tiene restricciones en sus recursos hidráulicos debidas principalmente a la contaminación de las fuentes de abastecimiento.
- **Zona Golfo y Sureste.** Ubicada al oriente de la República Mexicana, su extensión es de 485 000 km<sup>2</sup> lo que representa un 25 % del territorio nacional. En esta región los volúmenes de agua son abundantes.

El balance hidráulico para la República Mexicana es negativo, pues para el año 2000 se calcula un déficit posible de 71 000 millones de metros cúbicos. En la Figura 9.1 se muestra la disponibilidad de los recursos hidráulicos en distintas regiones de nuestro país.

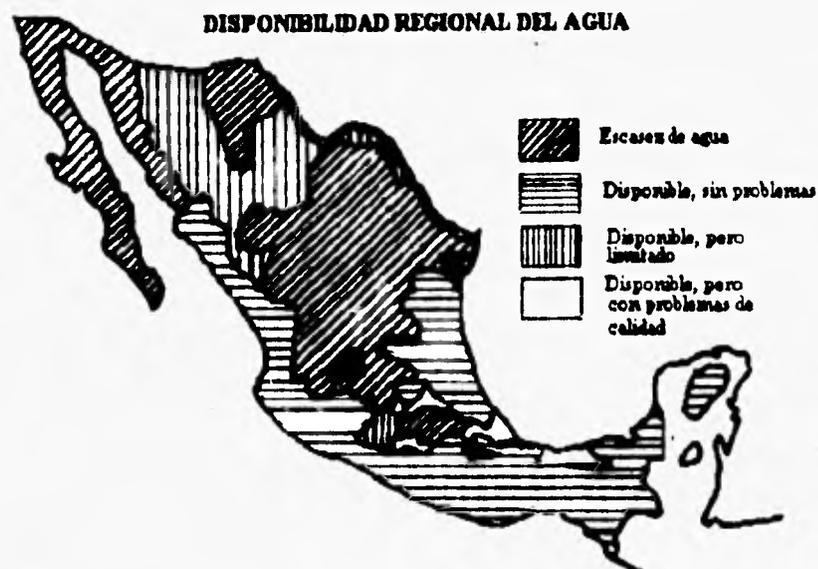


Figura 9.1 Distribución de los recursos hidráulicos en México

### 9.1.3 Diagnóstico del aprovechamiento de aguas residuales

El aprovechamiento de las aguas residuales es una de las alternativas más viables para solucionar los problemas relacionados con la carencia de agua en el territorio nacional. La utilización de aguas residuales en la agricultura se ha llevado a cabo desde hace algún tiempo, principalmente en las zonas áridas del país.

Entre los aprovechamientos de aguas residuales más importantes se pueden mencionar: las zonas agrícolas de los Valles del Mezquital y de México que comprenden los distritos de riego 03 de Tula, Hidalgo, el 88 de Chalco-Chiconautla y 100 de Alfajayucan. Además de éstos, otros distritos aprovechan aguas residuales de origen urbano, como son: 030 de Valsequillo, Puebla, 028 de Tulancingo, Hidalgo y 09 de Ciudad Juárez, Chihuahua. También se riegan zonas agrícolas próximas a 53 ciudades y el total de ciudades en las que se aprovechan las aguas residuales para riego es de 57.

El volumen de agua residual que manejan estos distritos es cercano a los 138 millones de metros cúbicos anuales y la extensión total de estos distritos es de 82 781 hectáreas. Sin embargo, en ninguna de las descargas de aguas residuales para estos distritos de riego se realiza tratamiento. En total se tiene una superficie estimada de 185 mil hectáreas regadas con aguas residuales, de las cuales el 36 % corresponde al riego con aguas residuales provenientes de la Ciudad de México; potencialmente el área de riego puede incrementarse hasta 430 000 hectáreas.

Cuadro 9.1

| CARACTERISTICAS PROMEDIO DEL AGUA RESIDUAL GENERADA EN EL DISTRITO FEDERAL |                                   |
|--|-----------------------------------|
| Parámetro  | Concentración (mg/l) <sup>1</sup> |
| Potencial de hidrógeno (pH)  | 7.3                               |
| Conductividad eléctrica  | 1503.0 umhos/cm                   |
| Sólidos totales  | 1106.0                            |
| Sólidos totales fijos  | 627.0                             |
| Sólidos totales volátiles  | 479.0                             |
| Sólidos suspendidos totales  | 200.0                             |
| Sólidos suspendidos fijos  | 76.0                              |
| Sólidos suspendido volátiles   | 125.0                             |
| Sólidos disueltos totales  | 905.0                             |
| Sólidos disueltos fijos  | 551.0                             |
| Sólidos disueltos volátiles  | 35.0                              |
| Sólidos sedimentables  | 3.1                               |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )                          | 279.4                             |
| Demanda Química de Oxígeno (DQO)   | 612.0                             |
| Nitrógeno amoniacal (N-NH <sub>3</sub> )                                   | 15.1                              |
| Nitrógeno orgánico (N-org.)  | 7.3                               |
| Nitrógeno total (N-total)  | 22.4                              |
| Nitrógeno de nitritos (NO <sub>2</sub> )                                   | 0.11                              |
| Nitrógeno de nitratos (NO <sub>3</sub> )                                   | 0.9                               |
| Ortofosfatos   | 4.5                               |
| Fosfatos totales   | 8.4                               |
| Grasas y aceites totales   | 108.8                             |
| Grasas y aceites minerales   | 52.4                              |
| Sustancias activas al azul de metileno SAAM (detergentes)                  | 10.4                              |
| Boro   | 1.1                               |
| Sulfatos   | 127.8                             |
| Cloruros   | 147.5                             |
| Cromo hexavalente  | 0.0                               |
| Sulfuros   | 0.8                               |
| Níquel   | 0.6                               |
| Fenoles  | 0.4                               |
| Zinc   | 0.3                               |
| Cadmio   | 0.008                             |
| Cianuros   | 0.004                             |

<sup>1</sup> Unidades en mg/l, excepto donde se indique alguna otra

Fuente: Alba Vázquez, Enrique César. Impacto Ambiental. Facultad de Ingeniería UNAM, IMTA.

Cuadro 9.2

| PANORAMA DE LA DISPOSICION DE AGUAS RESIDUALES<br>ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO |                                |  |   |            |
|---|--------------------------------|--|---|------------|
| DEMANDA DE AGUA   |                                |  |   |            |
| AÑO   | POBLACION<br>(habitantes)      | DOTACION<br>URBANA<br>(l/hab.día)                | DEMANDA (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /año) |            |
|   |                                |  | URBANA  | INDUSTRIAL |
| 1976  | 11 278 843                     | 400  | 1 646.7                                       | 308.8      |
| 1982  | 14 338 870                     | 400  | 2 093.5                                       | 392.5      |
| 1988  | 17 257 979                     | 400  | 2 519.7                                       | 472.4      |
| 1994  | 20 771 362                     | 400  | 3 032.6                                       | 568.6      |
| 2000  | 25 000 000                     | 400  | 3 650.0                                       | 684.4      |
| DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES  |                                |  |   |            |
| AÑO   | GENERACION DE AGUAS RESIDUALES |  | DESCARGA (l/s)                                |            |
|   | URBANA<br>(l/hab.día)          | INDUSTRIAL<br>(%)                                | URBANA  | INDUSTRIAL |
| 1976  | 320                            | 85   | 41 773.2                                      | 8 323.2    |
| 1982  | 320                            | 85   | 53 107.6                                      | 10 579.2   |
| 1988  | 320                            | 85   | 63 919.3                                      | 12 732.7   |
| 1994  | 320                            | 85   | 76 930.5                                      | 15 325.6   |
| 2000  | 320                            | 85   | 92 592.6                                      | 18 446.2   |
| DISPOSICION DE AGUAS RESIDUALES   |                                | Cuerpo receptor: Río Tula<br>Uso: Riego Agrícola |   |            |

Fuente: Normas y Lineamientos para la disposición de Aguas Residuales en Suelos. SEDUE, México, 1985

#### 9.1.4 Diagnóstico de la infraestructura de tratamiento

Hasta el año de 1989 se generaban 115 000 litros por segundo de aguas residuales y se contaba con 256 plantas de tratamiento municipales con capacidad de 14 000 litros por segundo (14 m<sup>3</sup>/s) y 150 industriales con capacidad de 12 000 litros por segundo (12 m<sup>3</sup>/s). De las de tipo municipal únicamente se encontraban en operación el 35 %, por lo que sólo el 15 % de las aguas residuales eran tratadas. En el año de 1994 se tratan aproximadamente 55 m<sup>3</sup>/s, de acuerdo con datos de la CNA; se ha incrementado de un 10 a un 35 % de la cobertura del total de la población.

En el Sexto Informe de Gobierno del Presidente Salinas de Gortari se informó que en cumplimiento del compromiso para sanear nuestros ríos, lagos y mantos acuíferos fueron instaladas 415 plantas de tratamiento de aguas negras, con lo que se tiene 3.3 veces más la capacidad instalada de 1988.

El tratamiento de las aguas residuales en plantas convencionales, seguido de desinfección, proporciona agua de buena calidad para riego pero sus altos costos de construcción, operación y mantenimiento no han permitido que se generalice su uso en los países subdesarrollados. Los

procesos de tratamiento en México se basan principalmente en la remoción de la materia orgánica y requieren de desinfección y de mano de obra calificada; la adquisición del equipo y de los reactivos significa erogaciones elevadas. La eficiencia de los sistemas respecto a la remoción de contaminantes es baja, a algunas plantas se aplica cargas hidráulicas en demasía y carecen de mantenimiento adecuado.

## **9.2 Riego con aguas residuales en México**

### **9.2.1 Principales zonas de irrigación con aguas residuales**

El aprovechamiento más importante de agua residual para fines de riego en México, se realiza en los distritos de riego 03 de Tula y 100 de Alfajayucan, en el Valle del Mezquital, en el Estado de Hidalgo. La superficie de riego que cubren es la más grande del mundo, con aproximadamente 85000 ha; el riego se efectúa con aguas residuales sin tratamiento, provenientes de la Ciudad de México y su área metropolitana. La utilización de las aguas residuales para riego agrícola surgió de manera imprevista a partir de las obras de drenaje del Valle de México; el cual se encuentra en una cuenca cerrada que de manera artificial ha sido abierta hacia el río Tula, a través de sus efluentes que son los ríos Salto y Salado.

En el año de 1955 se creó el distrito de riego DR 03 de Tula, Hidalgo en el que el empleo de las aguas residuales ha provocado la incorporación de amplias extensiones de tierra que eran improductivas al riego por gravedad. En 38 años la superficie bajo riego en esta región ha aumentado de 25 187 ha en 1948 a 44 242 en 1986, lo que representa un 76 % de incremento. En el Cuadro 9.3 se presenta el proceso de desarrollo de las obras de irrigación en el Valle del Mezquital. La Figura 9.2 muestra un mapa en el que se observa la conducción de las aguas residuales de la Cd. de México hacia el Valle del Mezquital.

La producción agrícola en el Valle del Mezquital es intensa y la superficie que se irriga aumenta considerablemente, en una proporción similar a aquélla con la que se incrementa la generación de aguas residuales por la población de la Ciudad de México y su zona conurbada. El empleo de aguas residuales ha provocado problemas de contaminación microbiológica de productos regados con aguas residuales, pero no se han reportado grandes problemas de contaminación de suelos debido al contenido de materia orgánica del agua residual, al alto pH del suelo, a las altas láminas utilizadas para riego, que permiten lixiviación de contaminantes solubles y a las propiedades del suelo.

Además de los distritos de riego que se encuentran ubicados en el Valle del Mezquital existen otros que aprovechan las aguas residuales de zonas urbanas como son los distritos: 030 de Valsequillo, Puebla, 028 en Tulancingo, Hidalgo y 09 en Ciudad Juárez, Chihuahua, como se mencionó en el apartado 9.1.3 de este capítulo.

Cuadro 9.3

| <b>PROCESO DE DESARROLLO DE LAS OBRAS DE RIEGO Y SUPERFICIE REGADA EN EL VALLE DEL MEZQUITAL</b> |                                   |  |
|--|-----------------------------------|--|
| <b>Año</b>   | <b>Superficie bajo riego (ha)</b> | <b>Obra de infraestructura</b>   |
| 1900   | 0                                 | El gran canal del desagüe entra en servicio desalojando las aguas residuales de la Ciudad de México                            |
| 1926   | 14 000                            | Red incipiente de riego en el Valle del Mezquital  |
| 1950   | 28 000                            | Túnel de Tequixquiac   |
| 1960   | 38 512                            | Canal Endhó  |
| 1972   | 39 442                            | Zona de riego Bojay  |
| 1978   | 66 367                            | Canales del Centro, Chilcuautla, Xochitlán y zona de riego Alfajayucan   |
| 1979   | 69 860                            | Canales El Tigre, Alto Tepetitlán, Chicavasco y Demacu   |
| 1984   | 71 360                            | Canal el Xotho   |
| 1985   | 74 184                            | Continuación del canal El Xotho y el Salto Tlamaco   |
| 1986   | 75 384                            | Canal Alto de Alfajayucan  |
| 1987   | 75 384<br>+ 5 389<br>+ 4 322      | Superficie operada por la SARH<br>Superficie en unidades de riego<br>Superficie operada por juntas de agua (usuarios privados) |
| <b>TOTAL</b>   | <b>85 095</b>                     | <b>SUPERFICIE TOTAL BAJO RIEGO</b>   |

Fuente: Humberto Romero Alvarez. Utilidad y Riesgo del Uso de las Aguas Residuales. Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, julio- agosto de 1988



**Figura 9.2 Conducción de aguas residuales de la Ciudad de México y su zona metropolitana hacia el Valle del Mezquital**

**9.2.2 Utilidad y riesgo del uso de las aguas residuales en la agricultura**

El empleo de aguas residuales en la agricultura puede resultar benéfico o adverso. En el primer caso, esto se debe a que puede ser una fuente de nutrientes; propicia el acondicionamiento y formación de suelos además de ser una fuente disponible de agua para usos en los que no se requiere de una calidad mayor. En el segundo caso puede constituirse como un gran riesgo para la salud de las personas que consumen los productos regados con estas aguas y de los campesinos y sus familias.

El alto porcentaje de zonas áridas y semiáridas en México (cerca del 75 % de la superficie del país) y la distribución irregular de los recursos hidráulicos en el territorio nacional, hacen necesario el uso de las aguas residuales tanto en la industria como en la agricultura.

Entre las principales ventajas del uso de las aguas residuales en la agricultura, se pueden mencionar:

- Incorporación de tierras al cultivo.
- Incremento en la producción agropecuaria debido a la adición de nutrientes para las plantas.

- Sustitución del empleo de aguas claras en la industria y en el riego agrícola por aguas que no requieren de esta calidad, lo que implica el contar con una mayor oferta de agua para primer uso.
- Impulso al desarrollo económico de la región.
- Atenuación del impacto contaminante de las aguas residuales.

En México, principalmente en el Valle del Mezquital, el empleo de aguas residuales en la agricultura ha reportado impactos benéficos puesto que ha impulsado la incorporación de tierras al riego, se ha incrementado la productividad agrícola y se ha constituido como una fuente de abastecimiento de agua para riego, en regiones que se caracterizan por la escasez de este recurso o en las que ocurren diferentes problemas y conflictos entre los usuarios de las aguas de desecho. A pesar de ello, no deben soslayarse los efectos adversos que este empleo puede provocar en la salud de los consumidores y de los propios agricultores y sus familias, quienes tienen contacto con las aguas residuales; existe la posibilidad de que se ocasionen daños en las propiedades físicas de los suelos y en la calidad de las aguas subterráneas.

Algunas medidas para prevenir y minimizar los riesgos sanitarios que puedan derivarse del uso de aguas residuales son las siguientes:

- Tratar las aguas residuales hasta alcanzar niveles de calidad que ofrezcan seguridad.
- Restringir el riego de cultivos con aguas residuales, de acuerdo con la calidad de las aguas para riego estipuladas por las Normas Oficiales Mexicanas NOM-CCA-032-ECOL/1993 y NOM-CCA-033- ECOL/1993 (ver Cuadros 8.1 y 8.3).
- Seleccionar y utilizar las técnicas de riego que generen menor contaminación ambiental.
- Proporcionar servicios de vigilancia y atención médica a la población expuesta, que tenga contacto con las aguas servidas.

Sin embargo, el cumplimiento de estos lineamientos en nuestro país no resulta sencillo, como se explica a continuación.

El tratamiento de aguas residuales presenta problemas de operación y mantenimiento, lo que limita la eficiencia y seguridad que puede tenerse al emplear aguas residuales. Por otra parte, el costo económico y financiero que representa cumplir con las recomendaciones internacionales del grupo de expertos en Ingeniería Sanitaria reunido en Engelberg en 1985 es muy alto y difícil de satisfacer debido a la situación económica que enfrenta nuestro país; estas recomendaciones se refieren a la calidad mínima que debe tener el agua para riego agrícola (menos de 1000 coliformes por cada 100 ml y no más de un huevecillo viable de nemátodo por litro).

Deben extenderse y mejorarse los servicios médicos de tipo preventivo y curativo, para atender a las personas que están expuestas y que se hayan en contacto con las aguas residuales, considerando entre ellos tanto a los trabajadores agrícolas como a los consumidores de productos regados con aguas residuales. La realización de estas modificaciones al sistema de salud parece

ser poco factible debido a las carencias que existen de estos servicios en nuestro país.

Atendiendo a lo anterior, la medida de control sanitario que resulta más viable para llevarse a cabo, es restringir los cultivos e implantar un sistema de riego adecuado.

En México se requiere efectuar estudios epidemiológicos (siguiendo el método científico) orientados al conocimiento de los efectos que tiene la utilización de aguas residuales en la agricultura sobre la salud humana. Se han llevado a cabo investigaciones epidemiológicas además de estudios de caracterización y monitoreo de la calidad del agua en el Valle del Mezquital; dichos estudios son efectuados por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, a través de la Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica y del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Sin embargo, como se ha estudiado a lo largo de este trabajo, el riego no solamente es un reúso que se le puede dar al agua residual, sino que puede constituir un sistema de tratamiento adicional para las aguas de desecho, que deben estar previamente tratadas, hasta un nivel secundario.

### 9.3 Situación de la infiltración de las aguas residuales en nuestro país

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales que utilizan como medio de depuración la infiltración del líquido residual a través del suelo tienen como disposición final la recolección del agua filtrada o la recarga de acuíferos. La recarga por medios artificiales de los acuíferos ha cobrado especial importancia en nuestro país debido a los siguientes factores:

- Distribución irregular de los recursos hidráulicos en el territorio mexicano, existiendo abundancia en la región sur de la República y escasez en la zona norte de nuestro país
- El desmedido crecimiento poblacional que trae consigo una mayor demanda de agua potable o para primer uso y una generación en aumento de aguas residuales
- Contaminación de las aguas subterráneas
- Excesiva extracción de las aguas subterráneas en las regiones en donde la demanda es creciente y en las que el crecimiento económico y el desarrollo de las actividades productivas así lo exige. Cuando de un manto de agua subterránea se bombea agua a un ritmo superior al de su recarga natural, se presenta un desequilibrio y los niveles freáticos descienden sin ser recuperados.
- La deficiencia en el volumen de aguas dulces potables provenientes de cuerpos de agua superficiales provoca que se tenga que hacer uso de las aguas subterráneas para tal fin

Atendiendo a estos factores se requiere implantar métodos de reposición o recarga de las aguas del subsuelo y técnicas de regulación de las reservas de agua subterránea. La recarga artificial de aguas subterráneas es el procedimiento por medio del cual se aseguran las condiciones favorables para disponer parte de los escurrimientos superficiales en escurrimientos subterráneos, con el objeto de asegurar la reposición de las reservas de aguas subterráneas y protegerlas para evitar que se agoten, además de permitir la utilización racional y la protección de los recursos

hidráulicos y los suelos. Los procedimientos para recuperar el equilibrio entre la cantidad de agua bombeada del subsuelo y los volúmenes de recarga natural o artificial son de dos tipos: métodos superficiales y de profundidad. En los métodos de superficie se utilizan lagunas de infiltración, en las que se logra la depuración de las aguas residuales aplicadas al terreno obteniendo una mejor calidad de las mismas al llegar al manto freático; en estos estanques o lagunas el agua se infiltra y percola a través de los estratos de suelo hasta alcanzar el acuífero que, en estos casos, suele ser del tipo libre o freático. Cuando se recarga el acuífero con métodos de profundidad se construyen pozos de inyección a través de los cuales se aplica el agua de recarga, esto se hace en acuíferos del tipo confinado. En la eficiencia del procedimiento aplicado influyen las características del terreno y del subsuelo, el tipo de agua, las necesidades y condiciones socioeconómicas de la región, etc. En el apartado 7.4.2 del presente trabajo se han analizado los posibles impactos ambientales de los sistemas de infiltración; la Figura 9.4 es un esquema de los procedimientos de recarga de acuíferos, que como se ha estudiado, puede realizarse con el efluente de los sistemas de tratamiento en suelos por infiltración.

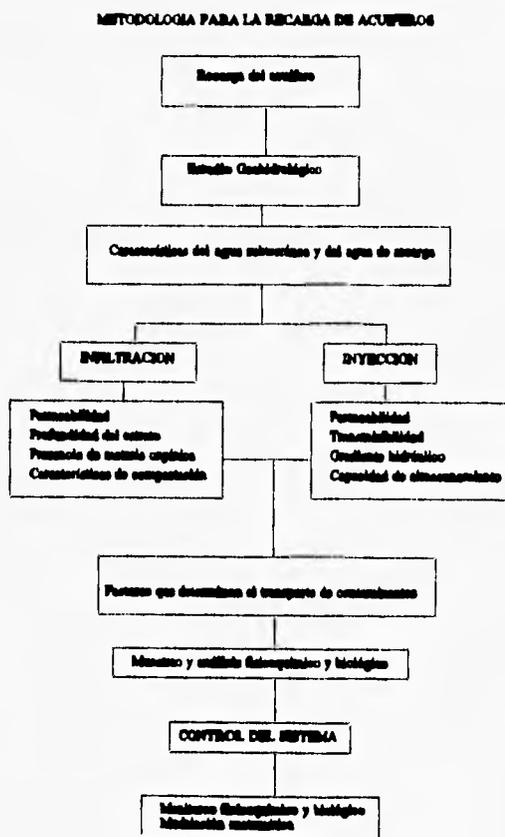


Fig. 9.3 Procedimientos de recarga de acuíferos

#### 9.4 Expectativas de la aplicación de sistemas de tratamiento en suelos en México

Las necesidades de agua potable en nuestro país son cada día mayores. Para una optimización en el uso de este recurso, pueden reutilizarse aguas que ya han sido empleadas con anterioridad, es decir aguas residuales en actividades que no requieren de una calidad como la potable, como puede ser el caso de la irrigación de determinados cultivos o la recarga de acuíferos. Además de esto, también debe considerarse que se requiere disminuir la contaminación de los cuerpos y corrientes de agua, tanto superficiales como subterráneas; atendiendo a esto, resulta primordial impulsar aún más el empleo de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

El tratamiento de aguas residuales en México afronta problemas debido a la difícil situación económica en la que se encuentra nuestro país, que en muchas ocasiones impide la construcción de plantas de tratamiento con procesos más eficientes pero también con elevados costos de construcción, de suministro de energía eléctrica, de operación y mantenimiento.

Ante esta situación es interesante analizar diferentes alternativas para el tratamiento de aguas residuales, entre las cuales se encuentran los sistemas de tratamiento en suelos. Este tipo de sistemas requieren de poco equipo, salvo el caso de los sistemas de irrigación por aspersión, pero no sólo permiten la depuración de las aguas residuales, sino que pueden alcanzar otros objetivos, como la irrigación de cultivos y la recarga de acuíferos. Sin embargo, este tipo de sistemas debe estar precedido de un tratamiento hasta nivel secundario para ser eficiente y seguro. En caso de que por cuestiones económicas no pueda ser precedido por equipos de sedimentación, sistemas de tratamiento biológico (como pueden ser los de lodos activados, biodiscos, lagunas de estabilización, etc.) o de tratamiento de lodos, no resulta recomendable. Sin embargo, en nuestro medio se han construido varias plantas de tratamiento con lagunas de estabilización, cuyo costo de construcción es alto, pero los costos de operación y mantenimiento se reducen considerablemente; si los sistemas de tratamiento en suelos son precedidos por sistemas de lagunas de estabilización en las que se alcance un nivel secundario en el tratamiento, puede resultar una de las alternativas más atractivas desde el punto de vista económico.

También conviene considerar que los sistemas de tratamiento en suelos, pueden ser aplicados para el desarrollo de la agricultura, por irrigación de aguas residuales, de lodos tratados hasta un nivel secundario y para la recarga de acuíferos.

Con base en lo estudiado se establece que la posible aplicación de estos sistemas en un país con carencias de agua en gran parte de su territorio y con abundancia en otras regiones, puede ayudar a disminuir estas carencias. El aprovechamiento de aguas residuales tratadas permite que las aguas limpias e incluso potables que se utilizaban para ciertas aplicaciones (como el riego y la recarga de acuíferos) puedan ser empleadas en actividades que exijan una calidad potable o prácticamente potable. Para las regiones con escasez de agua en la República, resulta aún más interesante el desarrollo de este tipo de sistemas de tratamiento de agua residual. En tiempo de sequía, los sistemas de irrigación pueden salvar cosechas que de otra manera se perderían por falta de agua de riego y también pueden incorporarse áreas de riego por temporal a la irrigación artificial por procedimientos mecánicos.

Las perspectivas de los procesos de depuración de aguas residuales en México son positivas y pueden resultar más factibles de llevar a cabo que otros procesos. Por ejemplo, en caso de considerar a los sistemas de tratamiento en suelos dentro de un nivel terciario de depuración, es más factible en nuestro medio utilizar al suelo como medio de remoción, que llevar a cabo procesos químicos más sofisticados, que requieren de una tecnología hasta ahora poco desarrollada en nuestro país. Sin embargo, deben seguirse todas las consideraciones que han sido estudiadas para que el tratamiento en suelos sea eficiente y seguro.

Intentando realizar una breve comparación con otros métodos, se puede observar que en los sistemas de tratamiento en suelos no sólo se efectúa la depuración del influente, sino que se pueden tener otros objetivos alternos, como el aprovechamiento de los nutrientes contenidos en las aguas residuales por los cultivos, lo que permite incrementar la productividad de los mismos; también puede tenerse como propósito la recarga de acuíferos con aguas residuales que han sido depuradas al infiltrarse en el suelo. La mayoría de los procesos de tratamiento no llevan en sí mismos el reúso de las aguas una vez tratadas, sino que las obras o actividades encaminadas a darle una nueva utilización a las aguas efluentes, son independientes del propio sistema. Así, por ejemplo una planta de tratamiento de aguas residuales puede consistir en un pretratamiento, sedimentación primaria, tratamiento biológico como lodos activados en unidades denominadas tanques de aereación, aplicación de cloro y tratamiento de lodos; al llegar a este nivel, el efluente deberá ser conducido quizá por bombeo a un sistema de irrigación, o transportarse por pipas al lugar donde sea utilizado o si se pretende recargarlo al subsuelo, tendrá que transportarse al sitio de recarga, mientras que en los sistemas de infiltración, éste lugar es el mismo en el que se realiza el tratamiento. Sin embargo, debe reconocerse que para que un sistema de tratamiento de aguas residuales en el suelo funcione eficientemente, el agua influente a él debe estar previamente tratada, por lo que se recomienda que haya sido sometida a procesos como los que se han ejemplificado. Por ello, es recomendable que se empleen como complemento de los sistemas de tratamiento previos, es decir, como un tratamiento avanzado. En caso contrario, si se efectúa la aplicación en el suelo de las aguas residuales sin tratar, o con sólo un tratamiento preliminar, existiría un mayor riesgo de contaminación de los suelos y de las aguas subterráneas y no sería ya un método de tratamiento.

Algunas de las plantas de tratamiento descargan los lodos producidos durante el proceso de al sistema de alcantarillado general lo que no debe realizarse, pues se están volviendo a introducir los contaminantes que se encuentran todavía presentes en los lodos hacia las aguas del alcantarillado. Estos lodos, siempre y cuando hayan sido tratados con anterioridad y sean provenientes de aguas residuales municipales (no industriales), pueden ser aplicados sobre terrenos, siguiendo lo recomendado en el sexto capítulo de este trabajo y cumpliendo los requerimientos que establezcan las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes.

En el territorio nacional existen unidades orogénicas como la Sierra Madre Occidental, la Sierra Madre Oriental, la Cordillera Neovolcánica, la Sierra Madre del Sur, la Sierra Madre de Oaxaca, la Sierra Madre de Chiapas, etc. en las que, de acuerdo con las características del terreno, es posible ubicar algunas laderas o terrazas que cumplan con las pendientes y con el tipo de suelo apropiados para utilizarse como sistemas de escurrimiento superficial. Para ello deben realizarse estudios antes de poder determinar si esto es factible.

### 9.5 Objetivos y estrategias del aprovechamiento de aguas residuales

Los propósitos que se pretende alcanzar referentes al aprovechamiento de las aguas residuales son:

- Promover el uso de aguas residuales como una fuente alternativa de abastecimiento para usos que no requieran de calidad potable.
- Fomentar el desarrollo regional por la utilización de aguas residuales tratadas en la agricultura, industria y servicios municipales.
- Incrementar el uso del agua residual como una manera de disminuir la contaminación de aguas limpias.

Hasta la fecha se han realizado algunos proyectos de desarrollo hidroagrícolas con aguas residuales en México, consistentes en sistemas sencillos de tratamiento basados en lagunas anaerobias, facultativas y almacenamiento superficial; fueron diseñados para las zonas agrícolas de Hermosillo, Sonora, y Torreón, Coahuila, proyectos piloto para aprovechamiento de aguas residuales que permitirán ampliar de 1400 a 5500 hectáreas la superficie regada, beneficiando a 800 familias campesinas que podrán cultivar en sus parcelas alfalfa, sorgo, trigo, naranja, vid de mesa, vid industrial. A través de estos proyectos piloto se pretendió adaptar y asimilar tecnologías adecuadas a las condiciones nacionales y posteriormente extender las experiencias a otras zonas del país.

Como parte de las estrategias que se han llevado a cabo para disminuir la contaminación de los cuerpos y corrientes de agua, y para reducir el riesgo de daños a la salud pública debido al riego con aguas residuales crudas, el 5 de abril de 1991 por órdenes presidenciales se reforzaron los programas de control de calidad del agua, creándose el Programa Agua Limpia, cuyo objetivo es el de garantizar que los recursos hidráulicos cumplan con las normas de calidad para los usos a los que se destina.

Entre las estrategias de este programa resulta de interés para este tema, las siguientes:

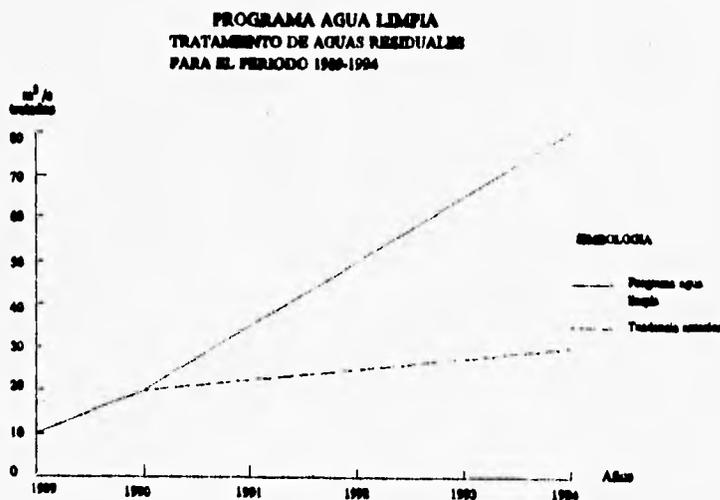
- De los 120 m<sup>3</sup> de aguas residuales municipales que se vierten en ríos y cuerpos de agua en todo el país, 60 m<sup>3</sup> se tratarán mediante lagunas de oxidación, para ser reutilizados en riego agrícola.
- Se cancelarán las concesiones de aguas residuales que se destinen al riego de productos agrícolas que se consuman crudos.

En cuanto al avance del programa al respecto del riego con aguas residuales se tiene que de las 24 100 hectáreas detectadas de cultivos restringidos, se han cancelado concesiones, cambiado o destruido cultivos en 21 570. Adicionalmente, el 24 de octubre de 1991, las Secretarías de Desarrollo Urbano y Ecología, Salud y de Agricultura y Recursos Hidráulicos, a través de la Comisión Nacional del Agua, emitieron la Norma Oficial Mexicana que establece las condiciones para el uso de aguas residuales en riego agrícola. En la actualidad esta Norma corresponde a la NOM-CCA-033-ECOL/1993 publicada el 18 de octubre de 1993.

Las metas que se esperaban alcanzar en el crecimiento de la capacidad de tratamiento de aguas residuales para el período de 1989 a 1994 se presentan en la Figura 9.4. Las gráficas de la Figura 9.5 muestran la situación del riego con aguas residuales en México que se reportó en 1991; en la Figura 9.6 se presenta un terreno regado con aguas residuales en el Valle del Mezquital y el aprovechamiento de este tipo de aguas en canales de riego.

Otras medidas enfocadas a darle utilidad a las aguas negras, son:

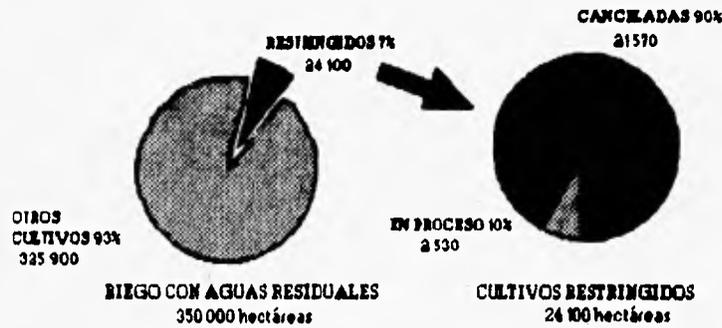
- Promover el empleo de este tipo de aguas en regiones en las que existan problemas generados por la escasez de agua y donde la disponibilidad de aguas residuales sea una alternativa de abastecimiento.
- Aprovechar las propiedades de remoción de contaminantes del suelo, sin afectarlo.
- Mejorar la infraestructura existente de tratamiento.
- Fomentar la construcción y operación de nueva infraestructura de tratamiento.
- Realizar monitoreos constantes y proyectos piloto, tendientes a desarrollar los criterios y mecanismos para hacer del uso de las aguas residuales una aplicación segura y extensiva.



**Figura 9.4 Metas esperadas en el tratamiento de aguas residuales para el período 1989-1994**

**PROGRAMA AGUA LIMPIA  
CONTROL DEL RIEGO CON AGUAS RESIDUALES**

ABRIL 1991 - ABRIL 1992



**PROGRAMA AGUA LIMPIA  
SITUACION DEL RIEGO CON AGUAS  
RESIDUALES EN ABRIL DE 1991**

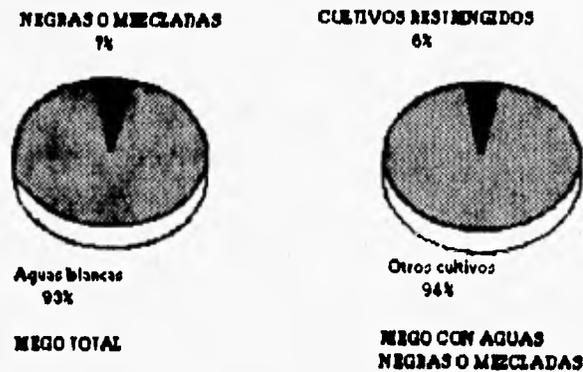


Figura 9.5 Situación del riego con aguas residuales en México. Abril de 1991



**Figura 9.6** Terreno regado con aguas residuales y aprovechamiento en canales de riego en el Valle del Mezquital

## 9.6 Conclusiones

1. El presente trabajo ha tenido como objetivo conocer, describir y explicar los distintos procesos de tratamiento de aguas residuales en los suelos, considerando la importancia que pueden tener estos procedimientos como alternativas de tratamiento de aguas residuales en nuestro país, así como el impacto ambiental de los mismos.

2. México debe cuidar de sus recursos naturales, destacando entre ellos el agua. Actualmente una gran cantidad de los cuerpos y corrientes de agua en nuestro país se encuentran contaminados, convertidos en "tiraderos" a los que van a parar gran cantidad de residuos provenientes de zonas urbanas, industriales, de retorno agrícola, etc. Esta situación disminuye aún más los limitados volúmenes de agua para algunas regiones del territorio nacional. Surge entonces la necesidad de volver a utilizar aguas residuales, para lo que debe de efectuarse su tratamiento.

Existe una gran variedad de procesos de tratamiento de aguas residuales de tipos físicos, químicos y biológicos. Para cada caso en particular se elabora un estudio lo más completo posible para determinar cuál es el sistema de tratamiento óptimo. Para la toma de esta decisión influyen diferentes factores, como pueden ser la extensión de terreno disponible, los recursos económicos con los que se cuente, el tiempo que se haya establecido para realizar la obra, la calidad de las aguas residuales por tratar y la calidad que se pretende obtener del sistema de tratamiento, además del origen de las aguas, es decir, si se trata de aguas residuales municipales, industriales, procedentes de un alcantarillado combinado, etc.

3. Los sistemas de tratamiento de aguas que utilizan como medio de remoción de contaminantes al suelo, son una alternativa nueva en nuestro país, pero existe experiencia en otras partes del mundo, principalmente en Estados Unidos de América. En México, el riego con aguas residuales es una práctica que por muchos años se ha llevado a cabo, sin embargo, no se le ha concebido como un posible medio de depuración de aguas residuales, que pueden ser recolectadas y utilizadas nuevamente. Este enfoque puede darle un impulso significativo a los sistemas en estudio y vale la pena tenerlo en consideración.

4. Respecto al riego con aguas residuales se pueden concluir los siguientes puntos:

- Es indebido regar con aguas residuales crudas, por el riesgo a la salud que esto implica, sobre todo si se trata de vegetales que se consumen crudos.
- El agua residual tratada debe ser sometida a la desinfección previa a su aplicación en cultivos de vegetales para satisfacer las Normas Oficiales Mexicanas y los Criterios de Calidad del Agua.
- Se requiere de un mayor control de calidad en los sistemas de tratamiento para que las aguas utilizadas en riego no sobrepasen los límite establecidos.

5. Cada uno de los sistemas de tratamiento que han sido estudiados permite una alta remoción de contaminantes, a través de diferentes mecanismos de remoción como son la adsorción, absorción, sedimentación, precipitación química, captación por cultivos, etc. Presentan

características distintas y requieren de determinadas propiedades del suelo; de igual manera, las actividades involucradas para su construcción, operación y mantenimiento son similares, pero con algunas diferencias que hacen a cada sistema distinto de los demás.

Se hace énfasis en que para obtener las eficiencias de remoción esperadas y un funcionamiento satisfactorio del sistema se necesita cumplir con las Normas Oficiales Mexicanas y con las recomendaciones en cuanto a cargas hidráulicas, cargas de nitrógeno y de otros parámetros, así como con los requerimientos de superficie, de pendientes, tipos de suelo, períodos de aplicación y de descanso, etc., para cada tipo de sistema. Se subraya la importancia de que las aguas influentes a los sistemas de tratamiento en suelos hayan sido tratadas previamente hasta un nivel secundario. Si se cumplen con estas condiciones, los sistemas de tratamiento en suelos pasan a un nivel de tratamiento avanzado y el agua que se obtenga de ellos será de una calidad muy aceptable, que podrá cumplir con las Normas Oficiales Mexicanas que se establezcan para determinados usos. En caso de que el nivel de tratamiento previo al que se haya sometido a las aguas residuales, sea primario, el sistema de tratamiento en suelos representará un nivel secundario y posiblemente se requiera de otro tratamiento más avanzado.

6. El análisis del impacto ambiental realizado en el Capítulo 7 ha permitido determinar los efectos benéficos y adversos que el tratamiento mediante el suelo puede tener. Se ha observado que los sistemas de aplicación de lodos son los que más impactos adversos provocan;

esto ocurre en el caso de que los lodos que se depositan en el terreno no sean estabilizados con anterioridad y no se cumplan las recomendaciones expuestas en el Capítulo 6. Pueden presentarse daños para la salud pública, para los cultivos, etc. El estudio de impacto ambiental también permite concluir que los sistemas de escurrimiento superficial causan muy pocos impactos adversos en el ambiente, siendo el más significativo de ellos, la posible erosión de las terrazas por las que circula el agua residual. En general, los impactos adversos más significativos que pudieran presentarse son daños en la salud pública por consumir cultivos regados con aguas residuales y contaminación de acuíferos; no obstante, debe enfatizarse que estos riesgos son mínimos si se cumple con las recomendaciones expuestas a lo largo de este trabajo.

7) Respecto a la legislación referente a la prevención y el control de la contaminación originada por los sistemas de tratamiento en suelos, se ha concluido que se tienen diferentes documentos que tratan acerca de la contaminación de las aguas y los suelos, de diferentes procedimientos encaminados a disminuirla y establecen valores máximos permisibles para la utilización del agua residual en la agricultura y en las descargas a cuerpos receptores (entre los que se considera al suelo), criterios bacteriológicos, criterios de calidad del agua, etc. Entre estos documentos se encuentran la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y sus reglamentos, la Ley General de Salud, las Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Protección Ambiental, etc. El cumplimiento de tales reglamentos es indispensable para evitar problemas, como daños a cultivos, contaminación de suelos, contaminación de acuíferos, efectos adversos en la salud pública, etc. Además, si se satisfacen tales requerimientos pueden obtenerse beneficios como los que ya se han descrito.

Debe realizarse una estricta vigilancia del cumplimiento de estas Normas, responsabilidad de la autoridad competente, que generalmente se trata de la Comisión Nacional del Agua en colaboración con la Secretaría de Desarrollo Social. Periódicamente, resulta conveniente analizar

que los niveles máximos permisibles sean los adecuados y para algunos casos pueden determinarse condiciones particulares de descarga. Paulatinamente debe generalizarse el estricto cumplimiento de las Leyes hasta alcanzar una cultura ecológica en la mentalidad de los mexicanos.

8) Las expectativas que ofrecen los sistemas de tratamiento de aguas residuales en suelos resultan muy interesantes y parecen ser una alternativa que permitirá ayudar a satisfacer requerimientos de agua en regiones necesitadas de este recurso en el territorio nacional, pues el empleo de aguas residuales tratadas en determinadas actividades, permitirá que aguas de buena calidad no sean utilizadas en tales actividades, sino se encaminen a usos para los que sí se requiera una alta calidad o incluso que sean potables.

Es necesario llevar a cabo estudios más profundos para determinar las características con las que se podrían introducir estos sistemas en nuestro país, los lugares que cumplan con los requisitos para ello y la disponibilidad existente por parte de los Ingenieros que participen en un proyecto de esta naturaleza y de las poblaciones cercanas al sitio de proyecto.

La preservación y conservación de un recurso de gran importancia para la vida como lo es el agua, ha llevado al ser humano al estudio de diferentes técnicas y procesos por medio de los cuales se pueda depurar las aguas que han sido utilizadas y a las que se les han añadido sustancias ajenas a su propia naturaleza. Dentro de estos procesos de tratamiento se encuentran los que emplean al suelo como medio de remoción y que han sido motivo de estudio en este trabajo.

---

## **BIBLIOGRAFIA**

---

**BIBLIOGRAFIA**

- METCALF y Eddy. Ingeniería Sanitaria. **TRATAMIENTO, EVACUACION Y REUTILIZACION DE AGUAS RESIDUALES**. 2ª ed., Ed. Labor, Barcelona, España, 1985, pp. 969.
- LASHLEY, Harvey G. **EL AGUA, METODOS MODERNOS DE SU USO Y CONSERVACION**. Intercontinental Publication, Inc. Stamford Connecticut, E.U.A, 1966, pp. 94.
- DEMING, H.G. **EL AGUA, UN RECURSO INSUSTITUIBLE**. Ed. Nuevomar, México, 1979, pp. 343.
- MURGUIA Vaca, Ernesto. **EVALUACION, EFECTOS Y SOLUCION DE LA CONTAMINACION DEL AGUA**. Apuntes de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, México, 1983, pp. 171.
- ORTIZ Villanueva B. y Ortiz Solorio A. **EDAFOLOGIA**. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México, 1984, pp. 374.
- GAMRASNI, M.A. **APROVECHAMIENTO AGRICOLA DE AGUAS NEGRAS URBANAS**. Ed. Limusa, México, 1985, pp. 220.
- CESAR Valdez, Enrique. **ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE**. UNAM, Facultad de Ingeniería, 2ª ed., México, 1991, pp. 276.
- VAZQUEZ González, Alba Beatriz, César Valdez, Enrique. **IMPACTO AMBIENTAL**. UNAM, Facultad de Ingeniería, IMTA. México, 1993, pp. 260.
- Environmental Protection Agency.(EPA) **LAND TREATMENT OF MUNICIPAL WASTEWATER EFFLUENTS DESIGN FACTORS I**. EPA, Technology Transfer Seminar Publication, E.U.A., 1976, pp. 49.
- EPA. **LAND TREATMENT OF MUNICIPAL WASTEWATER EFFLUENTS DESIGN FACTORS II**. EPA, Technology Transfer Seminar Publication, E.U.A., 1976, pp. 72.
- EPA. **LAND TREATMENT OF MUNICIPAL WASTEWATER EFFLUENTS DESIGN FACTORS III**. EPA, Technology Transfer Seminar Publication, E.U.A., 1976, pp. 79.
- EPA. **USE AND DISPOSAL OF MUNICIPAL WASTEWATER SLUDGE**. Environmental Regulations and Technology. E.U.A, 1984. PP. 76.

- Secretaría de Recursos Hidráulicos. Dirección General de Riego. **NORMAS PARA UN BUEN DRENAJE DE LAS TIERRAS**. Memorandum Técnico No. 250, México, 1967, pp. 10.
- SEDUE. Subsecretaría de Ecología. Dirección General de la Contaminación Ambiental. **NORMAS Y LINEAMIENTOS PARA LA DISPOSICION ADECUADA DE AGUAS RESIDUALES EN SUELOS**. México, 1985, pp. 220.
- SCHWAB, Glenn, et. al. **INGENIERIA DE CONSERVACION DE SUELOS Y AGUAS**. Ed. Limusa, México, 1990, pp. 569.
- Colegio de Ingenieros Civiles de México. División Técnica del Medio Ambiente. **INGENIERIA Y MEDIO AMBIENTE**. Cuadernos técnicos, Volumen 3, Memoria de la 3ª mesa redonda sobre Ingenier y Medio Ambiente, México, 1991, pp. 126.
- **CONSTITUCION POLITICA DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS**. 9ª ed., Ed. Trillas, México, 1992, pp. 183.
- SEDESOL. Diario Oficial de la Federación. **NORMAS OFICIALES MEXICANAS EN MATERIA DE PROTECCION AMBIENTAL**. 18 de octubre de 1993.
- SEDESOL. Diario Oficial de la Federación. **NORMAS OFICIALES MEXICANAS EN MATERIA DE PROTECCION AMBIENTAL**. 22 de octubre de 1993.
- **LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE**. Colección Porrúa. Leyes y Códigos de México. 7ª ed., México, 1993.
- SEDUE. **GACETA ECOLOGICA**. Volumen II, No. 6, enero de 1990, pp. 63.
- **LEY GENERAL DE SALUD**. Colección Porrúa. Leyes y Códigos de México, 8ª ed., México, 1992, pp. 1167.
- SARH. Comisión Nacional del Agua. **LEY DE AGUAS NACIONALES**. Diciembre de 1992, pp. 77.
- SARH. Diario Oficial de la Federación. **REGLAMENTO DE LA LEY DE AGUAS NACIONALES**. 12 de enero de 1994.
- **BABBIT. ALCANTARILLADO Y TRATAMIENTO DE AGUAS NEGRAS**. México, 1983.
- **GUERREE, H. SANEAMIENTO DE LAS AGLOMERACIONES URBANAS**. Barcelona, España, 1962, pp. 171.
- Laboratorio de Salinidad de los E.U.A. **DIAGNOSTICO Y REHABILITACION DE SUELOS SALINOS Y SODICOS**. Ed. Limusa, México, 1973, pp. 172.
- **ASANO Takashi y Pettygrove Stuart. USO DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS EN RIEGO AGRICOLA**. Ingeniería Ambiental. Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Año 2, No. 6. México, 1989.

- ROMERO Alvarez, Humberto. **UTILIDAD Y RIESGO DEL USO DE LAS AGUAS RESIDUALES.** Ingeniería Ambiental. Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. julio-agosto de 1988.
- CALDERON Bartheneuf, José Luis. **REUSO DE AGUA RESIDUAL EN LA AGRICULTURA.** Ingeniería Ambiental. Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Año 5, No. 15, 1992.
- SANCHO y Cervera, Jaime. **PROGRAMA AGUA LIMPIA. ESTRATEGIA NACIONAL.** Ingeniería Ambiental. Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Año 5, No. 15, 1992.
- FRIAS Figueroa, Rolando. **AGUAS RESIDUALES PARA RIEGO AGRICOLA.** Ingeniería Ambiental. Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Marzo-abril 1988.
- FRIAS Figueroa, Rolando. **ACONDICIONAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA REUSO AGRICOLA.** Ingeniería Ambiental. Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Año 4, No.9, enero de 1991.
- TEJEDA González, Carlos. **EL RIEGO CON AGUAS RESIDUALES EN MEXICO: EFECTOS EN LA SALUD Y PROPUESTA DE SOLUCIONES TECNICAS.** Ingeniería Ambiental. Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Año 4, No.10, 1991.
- HARO García, Rodolfo. **DERECHO DE DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN EL MARCO DE LA PROBLEMÁTICA DE LA CONTAMINACION DEL AGUA Y LA POLITICA PARA LA PRESERVACION DE SU CALIDAD.** Ingeniería Ambiental. Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Año 5, No.15, 1992.
- Comisión Nacional del Agua. Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial. **MANUAL PARA LA SELECCION DE SISTEMAS ALTERNATIVOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y LODOS PRODUCIDOS.** Volumen 1. México, 1989.
- STEEL, Ernest y JMcGhee. **ABASTECIMIENTO DE AGUA Y ALCANTARILLADO.** 5ª ed., Ed. Gustavo Gili, Barcelona, España, 1981, pp. 636.
- ATHALA Molano, Jorge. **RIESGO, BENEFICIOS Y CATASTROFES DE LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUIFEROS CON AGUAS RESIDUALES.** Memoria del VI Congreso Nacional "Saneamiento Ambiental, el gran reto". Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Querétaro, México. Agosto de 1988.
- FLORES Flores, Ana. **EFECTOS DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LOS SUELOS Y CULTIVOS.** Memoria del VI Congreso Nacional "Saneamiento Ambiental, el gran reto". Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Querétaro, México. Agosto de 1988.
- ALVAREZ Rosas, José. **CRITERIOS PROPUESTOS PARA EL USO Y MANEJO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LA AGRICULTURA.** Memoria del VI Congreso Nacional. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental "Saneamiento Ambiental, el gran reto". Querétaro, México. Agosto de 1988.

- RAMIREZ González, Antonio. **CRITERIOS TECNICO-SANITARIOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN RIEGO AGRICOLA.** Memoria del VI Congreso Nacional. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental "Saneamiento Ambiental, el gran reto". Querétaro, México. Agosto de 1988.
  
- FLORES y Robles. **DISTRITOS DE RIEGO CON AGUAS RESIDUALES.** Memoria del VI Congreso Nacional. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental "Saneamiento Ambiental, el gran reto". Querétaro, México. Agosto de 1988.
  
- ALVARADO Jiménez, Alejandra. **IMPACTO DE LOS USOS DEL AGUA EN LA AGRICULTURA.** Memoria del V Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental "Los límites del deterioro ambiental". Puebla, México, 1986.
  
- AYANEGUI Jaritz, Salvador. **IMPACTO SOBRE EL SUELO POR LA DISPOSICION DE AGUAS RESIDUALES CRUDAS Y TRATADAS.** Memoria del V Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental "Los límites del deterioro ambiental". Puebla, México, 1986.
  
- TEJEDA González, Carlos. **APROVECHAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN DISTRITOS DE RIEGO.** Memoria del V Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental "Los límites del deterioro ambiental". Puebla, México, 1986.
  
- TEJEDA González, Carlos. **PROGRAMA NACIONAL DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.** Memoria del V Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental "Los límites del deterioro ambiental". Puebla, México, 1986.
  
- MOELLER Chávez, Gabriela. **ASPECTOS MICROBIOLÓGICOS Y DE SALUD EN EL USO DE AGUAS RESIDUALES PARA RIEGO AGRICOLA.** Memoria del V Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental "Los límites del deterioro ambiental". Puebla, México, 1986.