



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

90

ZES

" REUSO DE LAS AGUAS
RESIDUALES TRATADAS "

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

ISABEL DE CASTILLA / NUAREZ HEREDIA

DIRECTOR DE TESIS :

M. C. CONSTANTINO GUTIERREZ PALACIOS



MEXICO, D. F.

1995

FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



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
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-034/93

Señor:
ISABEL DE CASTILLA JUAREZ HEREDIA
Presente.

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **M.C. CONSTANTINO GUTIERREZ PALACIOS**, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

"REUSO DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS"

- I .- INTRODUCCION
- II .- ANTECEDENTES
- III .- ASPECTOS BASICOS DE TRATAMIENTO
- IV .- LEGISLACION NACIONAL REFERENTE AL USO DEL AGUA
- V .- ALTERNATIVAS DE REUSO
- VI .- REUSO POTENCIAL EN LA REPUBLICA MEXICANA
- VII .- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- VIII .- REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

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 8 de marzo de 1993.
EL DIRECTOR.

ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/RCR*nl



A mi director y gran amigo:

M. en C. Constantino Gutiérrez Palacios

Con afecto y gratitud, por la valiosa guía y consejos que hicieron posible este trabajo.

Por su gran paciencia, comprensión y tolerancia que mostró hasta el final del camino.

A mis Maestros:

Ing. Enrique Heras Palacios,

Ing. Héctor García Gutiérrez,

como prueba de mi agradecimiento,

por el gran interés que siempre han demostrado en mi

formación y por la gran ayuda, consejo y cariño que siempre me han brindado

A todos mis Maestros:

Como prueba de mi agradecimiento





A mi Madre:

**Ma. Isabel Heredia Correa,
por tantos años de sacrificios y esfuerzos,
porque fué la mano siempre presta cuando necesitaba ayuda
la fiel compañera en las noches de desvelo
y el consejo siempre sabio de seguir adelante
y no desfallecer ante las pequeñas barreras que nos
depara la vida**

A mi esposo:

**Roberto Negrete Lemus,
por su invaluable ayuda en la terminación de mi tesis,
por todo el amor y ternura que me ha brindado y que me
han permitido alcanzar mis logros**

A mi hijo por siempre:

**El chiquitín, por tantos momentos de alegría, juegos y chanzas,
porque su ternura y dulzura me ha hecho siempre
tomar aliento para afrontar los momentos amargos de la vida
y emprender con nuevos bríos mis empresas**





A mi padre:

***José Antonio Juárez Rangel,
por haberme dado la vida y esos años tan maravillosos de
mi infancia***

A la memoria de mi Abuela:

***Guadalupe Rangel Cruz,
por su gran ternura, comprensión, cariño y
por su compañía en mis noches de desvelo***

A mis hermanos:

***Ruth Juárez Heredia,
Hernani Juárez Heredia,
Hernán Juárez Heredia,
Germana del Socorro Juárez Heredia,
Hispenia Jeromina Juárez Heredia,
por pasar junto a mí tantos años de mi vida,
compartiendo mis alegrías y tristezas,
y brindándome su apoyo y ayuda cuando lo necesitaba***

A mi suegra y cuñados:

***Estela Lemus Quintero,
Fernando y Gabriel Negrete Lemus,
por albergarme en su casa, ofrecirme ternura y comprensión
y por compartir mis desvelos
cuando tuve necesidad de pasar noches interminables
capturando la tesis***





***A todos mis familiares y amigos:
Por hacer mis días mas agradables al proporcionarme
incesantemente su amistad, cariño y comprensión***

***A mi gran amiga:
Dra. Georgina Fernández,
por haberme ayudado a lograr una meta mas en mi vida,
mostrando gran comprensión y paciencia.***



INDICE

AGRADECIMIENTOS

INDICE

INDICE DE TABLAS

INDICE DE FIGURAS

INTRODUCCION 1

CAPITULO I	ANTECEDENTES	6
	1.1 AGUAS RESIDUALES	6
	1.1.1 Definición	6
	1.1.2 Tipos de aguas residuales	7
	1.1.3 Volumen de aguas residuales	7
	1.2 DISPOSICION DE LAS AGUAS RESIDUALES	8
	1.2.1 Sistema de Alcantarillado	8
	1.2.2 Disposición de las aguas residuales	9
	1.3 TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL	11
	1.3.1 Objetivos del tratamiento de las aguas residuales	11
	1.3.2 Datos preliminares para tratabilidad	11
	1.4 CARACTERISTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES	17
	1.4.1 Características Físicas	19
	1.4.2 Características Químicas	20
	1.4.3 Características Biológicas	26

CAPITULO II	ASPECTOS BASICOS DEL TRATAMIENTO	29
II.1	CLASIFICACION DE LOS METODOS DE TRATAMIENTO	29
II.1.1	Operaciones Unitarias	37
II.1.2	Procesos Químicos Unitarios	41
II.1.3	Procesos Unitarios Biológicos	45
II.2	TRATAMIENTO Y DISPOSICION DEL LODO	55
II.2.1	Tratamiento del lodo	55
II.2.2	Disposición de los lodos y sólidos residuales	71
II.3	TRATAMIENTO AVANZADO DEL AGUA RESIDUAL	72
II.3.1	Procesos y Operaciones Unitarios	74
II.3.2	Disposición de los contaminantes	87
II.4	SISTEMAS DE TRATAMIENTO POR APLICACION AL TERRENO	87
II.4.1	Aplicación del lodo al terreno	92
CAPITULO III	LEGISLACION REFERENTE AL USO DEL AGUA	93
	INTRODUCCION	93
III.1	ANTECEDENTES	94
III.2	LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y PROTECCION DEL AMBIENTE	95
III.3	LEY FEDERAL DE AGUAS (CNA)	96
III.4	SECRETARIA DE SALUD	98
III.5	NORMAS TECNICAS ECOLOGICAS (SEDUE)/NORMAS OFICIALES MEXICANAS (SEDESOL/octubre 1993)	99
III.6	CRITERIOS ECOLOGICOS DE CALIDAD DEL AGUA (SEDUE)	100
III.7	NORMATIVIDAD EN MEXICO PARA LA CALIDAD DEL AGUA USADA PARA RIEGO	102

III.8	REGLAMENTO DEL SERVICIO DE AGUA Y DRENAJE PARA EL DISTRITO FEDERAL	107
CAPITULO IV	ALTERNATIVAS DE REUSO	110
	INTRODUCCION	110
IV.1	ALTERNATIVAS DE REUSO	111
IV.1.1	Evaluación de las posibilidades de reuso	112
IV.2	RIEGO AGRICOLA	114
IV.2.1	Calidad del agua para riego	114
IV.2.2	Requisitos sanitarios y legales	122
IV.2.3	Ventajas y Desventajas del uso de las aguas residuales tratadas para Riego	123
IV.3	REUSO INDUSTRIAL	125
IV.3.1	Reutilización del agua en la industria	127
IV.3.2	Calidades del agua según los usos	127
IV.3.3	Ventajas de reutilización de efluentes	133
IV.4	RECARGA DE ACUIFEROS CON AGUAS RESIDUALES TRATADAS	133
IV.4.1	Calidad del agua de recarga	135
IV.4.2	Ventajas de la recarga de acuíferos con aguas residuales tratadas	136
IV.5	USOS RECREATIVOS	138
IV.5.1	Criterios de calidad	138
IV.6	REUSO POTABLE	139
IV.6.1	Criterios de calidad	141
IV.6.2	Normatividad	141

CAPITULO V	POTENCIAL DE REUSO EN LA REPUBLICA MEXICANA	146
	INTRODUCCION	147
V.1	DISTRIBUCION GEOGRAFICA DEL AGUA	147
V.2	USOS DEL AGUA	
V.3	GRADO DE CONTAMINACION DE LOS RECURSOS HIDRAULICOS	164
V.4	LOCALIDADES CON POTENCIALIDAD DE REUSO	167
V.5	VOLUMENES POTENCIALES DE REUSO	181
CAPITULO VI	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	195
	CONCLUSIONES	195
	RECOMENDACIONES	197
BIBLIOGRAFIA		
ANEXO 1	(Relación de Normas Oficiales Mexicanas, referentes a la prevención y control de la contaminación del agua)	

INDICE DE TABLAS

TABLA NO.	TEXTO	PAG.
I-1	Características físicas, químicas y biológicas del agua residual	13
I-2	Parámetros de control de las aguas residuales, contenidos en las Normas Oficiales Mexicanas (SEDESOL)	14
I-3	Contaminantes de importancia en el tratamiento del agua residual	15
I-4	Unidades para expresar los resultados analíticos	16
I-5	Composición típica de las aguas residuales domésticas no tratadas	18
II-1	Operaciones, procesos unitarios y sistemas de tratamiento utilizados para eliminar la mayoría de los contaminantes presentes en el agua residual	32
II-2	Métodos de tratamiento y disposición del lodo	34
II-3	Aplicaciones de las operaciones físicas unitarias en el tratamiento de las aguas residuales	37
II-4	Aplicaciones de los procesos químicos unitarios en el tratamiento del agua residual	42
II-5	Principales procesos biológicos utilizados en el tratamiento del agua residual	47,48
II-6	Métodos de tratamiento y disposición de lodos	57,58
II-7	Origen de los sólidos y lodo, dentro de las instalaciones de una planta de tratamiento	59
II-8	Características del lodo producido durante el tratamiento del agua residual	60,61
II-9	Composición química típica del lodo crudo y digerido	62
II-10	Procesos que requieren la trituración previa del lodo	63

II-11	Concentraciones máximas de los componentes químicos presentes en las aguas residuales	73
II-12	Operaciones y procesos de tratamiento avanzado del agua residual	75,76
II-13	Comparación de sistemas alternativos de nitrificación	78
II-14	Comparación de sistemas de desnitrificación alternativos	80,81
II-15	Ventajas y desventajas de la eliminación del fósforo en diversos puntos de una planta de tratamiento	84
II-16	Métodos para la disposición de contaminantes	88
III-1	Límites máximos de la calidad de las aguas residuales para el riego agrícola	103
III-2	Límites máximos de contaminantes para las aguas residuales de origen urbano o municipal, que se dispongan mediante riego agrícola	104
III-3	Restricciones de los tipos de cultivos a regar con aguas residuales de origen urbano o municipal	106
IV-1	Alternativas de reuso	115
IV-2	Calidad de agua para riego	117
IV-3	Concentraciones de elementos traza recomendables para aguas de riego	119-121
IV-4A	Criterios de calidad para el agua de alimentación a la caldera en un sistema de intercambio de calor	131,132
IV-4B	Criterios de calidad para el agua empleada en la torre de enfriamiento en un sistema de intercambio de calor	132,133
IV-5	Principales factores a considerar en un proyecto de recarga de acuíferos	137
V-1	Estimaciones de volúmenes de aprovechamiento anual de aguas superficiales dentro de la República Mexicana	152,153
V-2	Estimaciones de volúmenes de aprovechamiento anual de aguas subterráneas dentro de la República Mexicana	154,155
V-3	Superficies agrícolas de riego y temporal	157
V-4	Requerimientos de agua para uso agrícola	158
V-5	Estimaciones de volúmenes totales de agua disponibles para tierras de riego, dentro de la República Mexicana	159,160

V-6	Grupos industriales que inciden mayormente en el problemática de contaminación del agua en México	161
V-7	Volúmenes de extracción de agua de las industrias mayoritarias	162
V-8	Requerimientos de agua para uso industrial	162
V-9	Consumo de agua para uso doméstico	163
V-10	Cuencas hidrológicas de la República Mexicana, ordenadas de acuerdo a su grado de contaminación	166,167
V-11	Localidades con potencialidad de reuso, de acuerdo a sus perspectivas de desarrollo industrial	169
V-12	Centros de población con posibilidades de reuso de acuerdo a sus perspectivas de desarrollo urbano	170,171
V-13A	Localidades con conflicto actual y futuro de disponibilidad de agua	173
V-13B	Localidades con conflictos actuales de disponibilidad de agua	173
V-13C	Localidades con conflicto actual de disponibilidad de agua, pero con fuentes alternativas de abastecimiento sin conflicto	174
V-13D	Localidades con conflicto futuro de disponibilidad de agua	174
V-13E	Localidades sin conflicto de disponibilidad de agua hasta el año 2000	175
V-13F	Localidades sin estudios de aguas subterráneas, pero con evidencia de estas	176
V-14	Estados de la República Mexicana, ordenados de acuerdo a su grado de contaminación	180,181
V-15	Volúmenes de aguas residuales disponibles para su reuso, en el año 1990	185-187
V-16	Proyección de poblaciones	188-190
V-17	Volúmenes de aguas residuales disponibles para su reuso, en el año 2005	191-193

INDICE DE FIGURAS

FIGURA NO.	TEXTO	PAG.
1	Diagrama de flujo de una planta de tratamiento de aguas residuales	33
2A	Diagrama de flujo general, para el tratamiento y disposición del lodo	35
2B	Diagrama de flujo general, para el tratamiento y disposición del lodo (continuación)	36
3	Situación de las operaciones físicas unitarias, en el diagrama de flujo de una planta de tratamiento de aguas residuales	38
4A	Distribución de la superficie continental de los E.U.M., según tipo de clima	148
4B	Distribución de la superficie continental de los E.U.M., según tipo de clima	148
5A	Distribución de la superficie continental de los E.U.M., según precipitación media anual	150
5B	Distribución del volumen medio anual llovido en los E.U.M.	150
6	Disponibilidad regional de agua	151
7	Distribución de la superficie total de los E.U.M., de acuerdo a su uso (196 Mha.)	156
8	Distribución de la carga contaminante total (DBO) anual	165
9	Areas con potencialidad de reuso de las aguas residuales tratadas, de acuerdo a sus perspectivas de desarrollo industrial	168
10	Areas con potencialidad de reuso de las aguas residuales tratadas, de acuerdo a sus perspectivas de desarrollo urbano	172

11A	Areas con potencialidad de reuso de las aguas residuales tratadas, de acuerdo a sus conflictos de escasez y disponibilidad de agua	177
11B	Areas con potencialidad de reuso de las aguas residuales tratadas, de acuerdo a sus conflictos de escasez y disponibilidad de agua	178
12	Estados de la República Mexicana, ordenados de acuerdo a su grado de contaminación	179
13	Localidades con las mas altas posibilidades de reuso de las aguas residuales tratadas	183

INTRODUCCION

El agua es un elemento esencial para la vida; es el principal componente del protoplasma celular y representa dos tercios del peso total del hombre y hasta nueve décimas partes del peso de los vegetales, además de que es la sustancia más usada en las actividades humanas como son: el riego, preparación de alimentos, procesos de fabricación, enfriamiento y medio de arrastre de los desechos originados por estas actividades. Sin embargo, el uso del agua en dichas actividades, produce la incorporación de sustancias o energía, provocando de esta manera la alteración de sus características físicas, químicas y biológicas, en otras palabras, su contaminación.

Aunque el agua constituye un recurso potencialmente inagotable; ya que la naturaleza lo tiene perfectamente dispuesto de tal manera que éste se renueva mediante su ciclo natural (ciclo hidrológico); no obstante, el progresivo aumento de la población y el rápido proceso de la industrialización, han provocado la demanda creciente del agua, lo que, unido al deterioro de la calidad de los recursos existentes, generan una situación generalizada de escasez de recursos, tanto en cantidad como en calidad. El reuso de las aguas residuales tratadas surge entonces como una invaluable alternativa de solución a la problemática del agua; así el reuso permite solucionar simultáneamente dos problemas que van continuamente aparejados: el tratamiento y disposición segura de las aguas residuales y la satisfacción de las crecientes demandas de agua. El reuso de las aguas residuales tratadas, representa entonces una excelente solución a la imperiosa búsqueda de fuentes alternativas de abastecimiento de agua.

Por otro lado, la reutilización del agua no constituye una novedad para el hombre, sino que al contrario, constituye una consecuencia natural de un hecho básico: la cantidad de agua existente en la actualidad en el planeta es, esencialmente la misma que cuando éste se formó. Por tanto, el agua se mueve dentro de un ciclo estrictamente cerrado, sin posibilidad de aportaciones externas. No obstante, hasta épocas relativamente recientes, la práctica del reuso dentro del ciclo del agua tenía un carácter inintencional, indirecto y de poca cuantía. Es tiempo de adoptar una nueva política del agua y reconocer el reuso tanto directo como indirecto de las aguas residuales tratadas, como la alternativa más factible para dar solución a la problemática del agua.

En lo que respecta a nuestro país, México cuenta con suficientes volúmenes de agua como para satisfacer las demandas de abastecimiento de todos los sectores, sin embargo, su distribución geográfica es completamente adversa para casi la mitad del territorio nacional. El estudio de su distribución indica que el 3% del total disponible como recurso renovable se encuentra en un área equivalente al 30% del territorio nacional, mientras que el 50% de la disponibilidad total se encuentra distribuida en un área no mayor al 20% del territorio.

Por otro lado, comparando las zonas de disponibilidad del recurso con las de asentamientos humanos e industriales, existen situaciones contrastantes, tales como: más del 85% del agua del país se encuentra en la zona baja, abajo de la cota 500, mientras que más del 70% de la población y 80% de la planta industrial se localiza en la zona alta, arriba de 500 m.; de ésta última el 55% se encuentra en el Valle de México, que sufre de graves problemas de agua.

Aunado a lo anterior, nuestro país enfrenta actualmente grandes problemas regionales de abastecimiento de agua en cantidad suficiente y calidad adecuada, entre los que destacan la disminución acelerada de la disponibilidad de agua en las zonas más pobladas y la creciente contaminación de los cuerpos de agua, susceptibles de servir como fuentes de abastecimiento; ya que nuestro país no se ha podido sustraer a las consecuencias de un desarrollo acelerado, que ha propiciado un aumento en la extracción y consumo de agua, que se traduce consecuentemente, en una mayor generación de aguas residuales, las cuales al ser descargadas sin previo tratamiento en la mayoría de los casos, a los cuerpos de receptores, perjudican sus usos legítimos y disminuyen su potencial de aprovechamiento. Por lo anterior, en un futuro cercano, pueden presentarse déficits críticos de recursos hidráulicos en algunas regiones, lo que plantea un serio desafío para las autoridades a cargo de la administración y distribución del agua y disposición de las aguas residuales. Así, el reuso resulta ser una opción necesaria si se toman en cuenta los problemas de escasez del agua en nuestro país, los altos costos de su transporte, las consecuencias ecológicas de su desperdicio y su importancia estratégica en el desarrollo urbano e industrial.

Las localidades que concentran la mayor proporción de habitantes, concentran también la mayoría de actividades industriales de la nación y disponen de mayor cobertura de servicios de agua potable y alcantarillado, constituyendo asimismo las principales fuentes de generación de aguas residuales. Muchas de éstas grandes ciudades no tienen o carecen de suficientes, a la

vez que eficientes plantas de tratamiento de aguas residuales, para el control de la contaminación. Esta problemática se hace más palpable en los grandes centros urbanos y productivos de la nación, que requieren en el menor tiempo posible, tener un suficiente número de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales y municipales, que procesen los fuertes volúmenes de aguas residuales que generan diariamente.

"Se estima que a nivel nacional solo el 70 % de la población cuenta con servicio formal de agua potable, con un caudal suministrado del orden de los 170 m³/s, en tanto que para la industria es aproximadamente 240 m³/s. Las aguas residuales provenientes de los centros urbano-industriales mayores de 100,000 habitantes alcanzan un gasto medio anual de 255 m³/s, de los cuales alrededor de 184 m³/s son generados por la industria y cerca de 71 m³/s provienen de los usuarios domésticos. Estos volúmenes instantáneos son captados en una infraestructura de drenaje que atiende a cerca del 49 % de la población".¹

Los datos consignados en el párrafo anterior nos dan una idea de los volúmenes de aguas residuales disponibles en nuestro país para el reuso, sin embargo, hasta épocas muy recientes las aguas residuales se habían venido aprovechando en el país en forma espontánea, para satisfacer demandas que no requieran calidad de agua potable, principalmente en las zonas de escasez. Se estimaba que a nivel nacional se estaban regando con aguas residuales alrededor de 156,000 ha., en las que se utiliza un volumen de 1600 millones de m³ por año o sea 51 m³/s.¹

En lo que respecta al reuso de las aguas residuales en el sector industrial, éste es reducido en relación a su potencial, realizándose principalmente en las ciudades de México, Monterrey y Guadalajara.

El volumen de agua residual potencialmente reutilizable en cada localidad específica, dependerá entre otros factores de la disponibilidad y el costo de la fuente de abastecimiento actual de agua potable, de los costos de transporte del agua tratada y de los costos asociados a su tratamiento, de las normas existentes referentes a la calidad del agua y finalmente y de especial importancia de el potencial de reutilización de la zona de estudio.

Se define como **agua residual**, de acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas, "al líquido de composición variada proveniente de los usos domésticos, de fraccionamientos, agropecuario, industrial, comercial, de servicios o de cualquier otro uso, que por este motivo haya sufrido degradación de su calidad original."

Los contaminantes presentes en el agua residual pueden ser eliminados por medios físicos, químicos y biológicos. Los métodos individuales de tratamiento pueden clasificarse en Operaciones Físicas Unitarias, Procesos Químicos Unitarios y Procesos Biológicos Unitarios. Así puede definirse al **agua residual tratada** como aquel líquido de composición variada

¹ Ing. José Manuel Arango Maldonado e Ing. Martín Molina Ochoa. PROGRAMA NACIONAL DE REUTILIZACION DEL AGUA. Gerencia de Reutilización del Agua, SGAA-CNA. 11º Congreso Nacional de Hidráulica. Tomo 1. Agua Prioridad Nacional. Asociación Mexicana de Hidráulica A.C. Zacatecas, Zac. 2-5 Octubre 1990.

proveniente del agua residual y resultante de la aplicación de un conjunto de operaciones y procesos de tratamiento.

Los objetivos fundamentales del tratamiento de las aguas residuales son, por un lado proporcionar una reducción adecuada del nivel de contaminantes del agua, a fin de adecuar su calidad para su descarga al medio y por otro el de ser una estrategia de solución a dos problemas que van continuamente aparejados como son: la escasez de agua potable y la disposición de las aguas residuales, dándoles un reuso.

Aunque la tecnología existente en la actualidad permite obtener agua tratada de la calidad deseada a partir de cualquier naturaleza del influente, los costos asociados al tratamiento son proporcionales al grado de contaminación del influente y a los requerimientos de calidad final del agua tratada, por lo que resulta lógico establecer las jerarquías de reutilización de los efluentes tratados de acuerdo a los requerimientos de calidad de cada uno de ellos, con la finalidad de optimizar al máximo el uso del efluente y disminuir los costos de tratamiento.

Los principales objetivos que persigue el presente, son los siguientes:

1) Proponer el reuso de las aguas residuales tratadas como una de las opciones mas ventajosas, en la búsqueda de la solución de la problemática del agua que aqueja a la mayoría de los países.

2) Presentar las ventajas y desventajas de las diferentes alternativas de reuso de las aguas residuales tratadas.

3) Concientizar a la población de nuestro país acerca de la problemática actual del suministro de agua, proporcionando igualmente la visión de dicha problemática en el futuro próximo. Plantear al mismo tiempo el reuso de sus aguas residuales tratadas como una solución a la problemática nacional del agua, basándose en que ésta alternativa permite dar solución a dos graves problemas al mismo tiempo: disminuye la contaminación acuática y aumenta la disponibilidad del recurso para ser usado en cualquier otra actividad.

4) Obtener de manera general la potencialidad regional del reuso de las aguas residuales tratadas, en nuestro país.

Para lograr los objetivos anteriores, el presente trabajo se desarrolla de la siguiente manera: dentro del primer capítulo se definen los conceptos básicos asociados a las aguas residuales y su tratamiento; para proceder inmediatamente en el capítulo II a la descripción de la gran gama de operaciones y procesos aplicables al tratamiento de las aguas residuales. También dentro del capítulo II se establecen los métodos de disposición de las aguas residuales.

Dentro del capítulo III se establece el marco normativo de nuestro país, aplicable al uso del agua, así como también el referido al tratamiento, uso y disposición de las aguas residuales.

INTRODUCCION

En el capítulo IV se presentan las principales alternativas de reuso de las aguas residuales tratadas, estableciendo asimismo los criterios de calidad, ventajas y desventajas asociados a cada una de las alternativas.

En el capítulo V, se inicia presentando la problemática del agua en nuestro país, para proceder posteriormente a hacer un análisis de la potencialidad regional de reuso de las aguas residuales tratadas, basándose en la problemática actual y futura del agua, así como en las perspectivas de desarrollo regional.

CAPITULO I ANTECEDENTES

I.1 AGUAS RESIDUALES

Introducción

De manera global, los usos principales a que se destina el recurso hidráulico son: a) Doméstico, b) Agrícola, c) Producción de energía eléctrica, d) Industrial, e) Conservación y desarrollo de flora y fauna acuáticas y f) Recreación y navegación.

El agua resulta un elemento esencial para la vida, de ahí que ésta se encuentre incluida en la gran mayoría de las actividades humanas. Sin embargo, el uso del agua en dichas actividades, produce la incorporación de sustancias o energía, provocando de esta manera la alteración de sus características físicas, químicas y biológicas.

I.1.1 Definición

Debe entenderse por agua residual, al agua proveniente de cualquier uso y que por tal motivo se encuentren alteradas sus propiedades físicas, químicas y biológicas iniciales.

Dentro de nuestro país las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), expedidas por la Secretaría de Desarrollo Social y surgen por dictamen de las Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección del Ambiente, como una medida de protección del ambiente y los ecosistemas acuáticos. Dichas normas tienen como finalidad vigilar la calidad de las descargas de aguas residuales generadas en el territorio nacional.

De acuerdo con las NOM, se define como **agua residual**, "al líquido de composición variada proveniente del usos domésticos, de fraccionamientos, agropecuario, industrial, comercial, de servicios o de cualquier otro uso, que por este motivo haya sufrido degradación de su calidad original."

1.1.2 Tipos de aguas residuales

El agua residual, dependiendo de la actividad que las genere, poseerá características físicas, químicas y biológicas particulares, de acuerdo al tipo de contaminantes que se le hayan adicionado en su uso.

En términos generales, las aguas residuales provenientes de los núcleos urbanos pueden clasificarse en dos grandes grupos: 1) aguas residuales de origen urbano o municipal y 2) aguas residuales de origen industrial o de servicios. De acuerdo a las NOM, a continuación se establecen sus definiciones:

1) Aguas residuales urbanas o municipales. Se definen como "aquellas que resultan de la combinación de aguas residuales domésticas, comerciales y de servicios públicos o privados, así como industriales en el caso de que los procesos que las generen se localicen en centros de población y se viertan a un sistema de drenaje y alcantarillado operado por la autoridad competente."

2) Aguas residuales industriales o de los servicios. Se definen como "aquellas que provienen de los procesos de extracción, beneficio, transformación, generación de bienes de consumo o de sus actividades complementarias, y del propio tratamiento de aguas residuales".

1.1.3 Volumen de aguas residuales

Para cuantificar los caudales de agua residual, si no es posible obtenerlos a partir de aforos directos, suelen estimarse estos a partir de los caudales de agua de abastecimiento.

Debido a la utilidad de los datos de caudales de abastecimiento para estimar los caudales de aguas residuales, resulta de vital importancia el establecer la relación entre la cantidad de agua demandada (consumo) y la cantidad de agua realmente utilizada. La diferencia entre estos dos valores es un volumen de agua llamado comúnmente pérdidas, el cual no puede ser captado por los sistemas de alcantarillado por varias razones, entre las más importantes se tiene: pérdidas en la tubería de distribución, riego de jardines, agua consumida en algunos procesos industriales, infiltraciones, evaporaciones y en general, reusos múltiples. Sin embargo, dicho volumen también puede verse incrementado por diversas causas, tales como: infiltraciones de corrientes subterráneas, aportaciones de abastecimientos particulares de agua, etc. Por lo general, sin considerar la infiltración del agua subterránea, de un 60 a un 80% del consumo per cápita se transformará en agua residual.

Fluctuaciones en el gasto de aguas residuales

En la mayoría de las localidades, el comportamiento de los volúmenes de descarga a las alcantarillas es muy semejante, generalmente por debajo de los volúmenes de consumo de agua. A pesar de lo anterior, existen algunos otros casos en los que la industria de la zona utiliza grandes cantidades de agua cuyo origen es diferente al suministro público, lo cual provoca un aumento en el volumen de aguas residuales, lo que en algunos casos puede igualar, o en casos más críticos, superar el volumen de las aguas de abastecimiento público.

En términos generales, las variaciones en el caudal de aguas residuales de una comunidad fluctúa, al igual que el consumo de agua de abastecimiento, por los siguientes factores:

- 1) Dotación de agua potable;
- 2) Número de habitantes de la comunidad;
- 3) Estación del año, día de la semana, hora;
- 4) Características de la zona de estudio (climatológicas, topográficas, estratigráficas, etc.);
- 5) Actividades productivas preponderantes de la zona de estudio;
- 6) Pérdidas del sistema colector (riego de áreas verdes, infiltración, evaporación y reuso múltiple);
- 7) Sistema colector empleado (separado o divisor y combinado o unitario).

1.2 DISPOSICION DE LAS AGUAS RESIDUALES

1.2.1 Sistema de alcantarillado

Es pertinente establecer la siguiente definición: se define como **sistema de alcantarillado**, al conjunto de dispositivos, instalaciones y conductos, que tienen como propósito recolectar, conducir, alejar y descargar las aguas residuales de manera higiénica y segura. Dependiendo del sistema de recolección y conducción de las aguas residuales, se tienen dos tipos de sistemas de alcantarillado: sistema separado o divisor y sistema combinado o unitario.

a) Sistema separado o Divisor

Se denomina así, al sistema de alcantarillado donde se manejan las aguas residuales sanitarias y las aguas pluviales de manera separada, existen por lo tanto dos redes de alcantarillado diferente; una de ellas conducirá exclusivamente las aguas residuales sanitarias y la otra es exclusiva para las aguas residuales de lluvia (alcantarillado pluvial). Este sistema se recomienda en los siguientes casos:

- 1) Cuando el destino de disposición final de ambos sistemas sea diferente.

- 2) Cuando por factores económicos, convenga separar dichos volúmenes para su mejor manejo.
- 3) Cuando las áreas que hay que drenar sean reducidas y con pendiente suficiente, facilitándose por tanto el escurrimiento del agua de lluvia por la superficie de las calles hacia una corriente natural de drenaje.
- 4) Cuando se tenga una red de alcantarillado existente, con incapacidad de manejar ambos volúmenes, en cuyo caso se utilizará para disponer alguno de los dos volúmenes.
- 5) Cuando, por factores económicos, solamente pueda financiarse un sistema de alcantarillado. Siendo éste el caso, se procede a construir primeramente el sistema de disposición de las aguas residuales sanitarias.

b) Sistema combinado o Unitario

Se denomina así cuando se tiene un solo sistema de recolección, conducción y disposición de el volumen total de aguas residuales.

Este sistema es conveniente en los siguientes casos:

- a) Cuando ambos volúmenes de aguas residuales tengan un mismo punto de disposición final.
- b) Cuando se utiliza un sistema de tratamiento de las aguas residuales, las aguas pluviales ofrecen un buen sistema de dilución con miras a reducir la carga de contaminantes y mejorar su tratabilidad.
- c) Cuando no exista suficiente espacio para construir ambas redes de alcantarillado.
- d) Cuando sea factible instalar estructuras de regulación que permitan derivar parte del volumen captado en época de lluvias para descargarlas a una corriente de drenaje natural.
- e) Cuando por razones económicas y no teniéndose restricciones sanitarias o ecológicas que prohíban el sistema unitario, se prefiere éste sobre el sistema divisor.

1.2.2 Disposición de las aguas residuales

La captación y concentración de las aguas residuales de una comunidad regularmente requieren de un adecuado tratamiento antes de su disposición, con el fin de proteger la salud y bienestar públicos.

Existen varios métodos de disposición de las aguas residuales tratadas, los cuales pueden ser: dilución en aguas receptoras, vertido en el terreno o en algunos casos en zonas desérticas mediante evaporación, así como por infiltración en el terreno y por último, puede darse un reuso de dichas aguas. Sin duda alguna, la eliminación por dilución (tras tratamiento preliminar o biológico) en grandes masas de agua, como lagos, ríos, estuarios o mares, es el método más utilizado. Se espera sin embargo que la historia dé un giro radical al respecto y se inicie una política tendiente a reusar dichos efluentes, tanto para resolver los problemas de escasez en aquellas áreas donde sea escaso el recurso y/o no llueva lo suficiente, como para conservar las fuentes de agua existentes.

Es necesario recalcar que, independientemente del método utilizado de disposición de los efluentes, el agua deberá recibir un tratamiento previo a fin de adecuar su calidad para su destino final.

Los sistemas de **disposición al terreno** consisten primordialmente en esparcirlas sobre la superficie del terreno, distribuir las bajo la superficie del terreno mediante tubos subterráneos, descargarlas en zanjas o descargarlas en el lecho de una corriente seca, donde pueda infiltrarse en el suelo o ser arrastrada a una masa de agua. Estos sistemas de disposición, se encuentran contenidos con mayor amplitud dentro del capítulo II.

Los sistemas de **disposición a un cuerpo de agua (dilución)**, consisten en descargar las aguas residuales o los efluentes procedentes de las instalaciones de tratamiento, en un cuerpo de agua. Este método de disposición, debe buscar en todo momento que no se produzca la contaminación del cuerpo receptor, ni afectar la salud pública. Existen entonces limitaciones respecto a las características de las aguas residuales que pueden arrojarse a los cuerpos de agua; de forma general, se dice que, cuando no hay riesgo para la salud pública, las aguas residuales deben recibir por lo menos, un tratamiento primario tendiente a reducir el contenido de sólidos en suspensión y la Demanda Bioquímica de Oxígeno. El control de la contaminación del agua, supone el desarrollo de métodos y medios para lograr y mantener la calidad del agua, lo que depende de los usos a los que se destine la misma. Por lo que, existen distintos criterios sobre la calidad del agua según que ésta sea para usos domésticos, industriales, agrícolas, recreo, estéticos, pesca, vida acuática o animal. Dentro del capítulo III que trata sobre la legislación nacional referente al uso del agua, se encuentran contenidos los criterios ecológicos de calidad de agua, emitidos por la Secretaría de Desarrollo Social.

La tesis fundamental que rige el tratamiento de las aguas residuales que serán diluidas en cuerpos receptores, se basa en darle al agua cierto nivel de tratamiento, de manera de aprovechar la capacidad de autopurificación de dichos cuerpos receptores. La autodepuración o purificación que tiene lugar en un cuerpo de agua depende, entre otros factores, de su caudal, de su contenido de oxígeno y de su capacidad de reoxigenación. Dicho concepto, es denominado capacidad asimiladora cuando se aplica a cuerpos receptores como son ríos, lagos y estuarios.

En todos los casos, las autoridades competentes se encargan de definir la capacidad asimiladora de cada uno de los cuerpos receptores y, consecuentemente la reglamentación de sus descargas; en cuyo caso, dicha capacidad se define en función de los usos a los que es sometida la corriente aguas abajo, de las necesidades del público y de la economía total del sistema del cuerpo receptor. Dentro del capítulo III, se encuentra contenida la legislación nacional más importante hasta estas fechas, referida a las descargas.

La **Reutilización del agua residual tratada** puede considerarse también como un método de disposición adecuado. El volumen de agua residual que pueda reutilizarse, dependerá entre otros factores de la disponibilidad y el costo del agua dulce, de los costos de transporte y tratamiento, de las normas sobre la calidad del agua y de su potencial de reutilización dentro de la zona de estudio.

Las diferentes posibilidades de reuso de las aguas residuales tratadas, se pueden clasificar de acuerdo al uso a que se destinen en: 1) municipal; 2) industrial; 3) agrícola; 4) recreativo y 5) otros. Dentro del capítulo IV de este trabajo, se presentan los principales factores asociados a cada una de las alternativas de reuso.

1.3 TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL

Como se dijo con anterioridad, las aguas residuales deberán recibir un tratamiento previo antes de su disposición final. Es claro advertir que cada proyecto de disposición final requerirá un agua de calidad adecuada a las características particulares del sitio de disposición final.

Antes de dar paso al desarrollo de los distintos procesos de tratamiento, a continuación se presentan algunos conceptos afines al tratamiento de las aguas residuales.

1.3.1 Objetivos del Tratamiento de las Aguas Residuales

Los objetivos fundamentales del tratamiento de las aguas residuales son, por un lado proporcionar una reducción adecuada del nivel de contaminantes del agua, a fin de adecuar su calidad para su descarga al medio y por otro el de ser una estrategia para dar solución a dos problemas que van continuamente aparejados como son: la escasez de agua potable y la disposición de las aguas residuales, dándoles un reuso.

En el caso específico de nuestro país, se introdujo en varias legislaciones (Ley Federal de Aguas (Comisión Nacional del Agua), Ley del Equilibrio Ecológico y Protección del Ambiente (Secretaría de Desarrollo Social, SEDESOL) y las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) (Secretaría de Desarrollo Social, SEDESOL), el concepto de **condiciones particulares de descarga**. Dichas condiciones particulares de descarga se refieren a los niveles máximos permitidos de los parámetros físicos, químicos y biológicos en las descargas de aguas residuales, de manera que al momento de verificarse su vertido, se pueda garantizar con ello el bienestar de las poblaciones y el equilibrio ecológico.

1.3.2 Datos preliminares para tratabilidad

Es fundamental, antes de iniciar cualquier sistema de tratamiento, identificar las características del agua residual disponible, así como definir la calidad requerida por el agua tratada para su disposición final. Para ello deben realizarse pruebas experimentales y definirse los parámetros de control, entre otros aspectos, a fin de poder seleccionar la alternativa de tratamiento más adecuada.

Los primeros pasos para el desarrollo de un programa de control de contaminación lo constituyen el muestreo y el análisis de las muestras.

a) Muestreo

El muestreo es un proceso que consiste en la obtención de las muestras ya sean simples o compuestas, para que por medio de su análisis se puedan determinar las características del agua.

Dentro de las Normas Oficiales Mexicanas, se definen como muestra simple a "aquella tomada ininterrumpidamente durante el período necesario para completar un volumen proporcional al caudal, de manera que resulte representativo de la descarga de aguas residuales, medido éste en el sitio y en el momento del muestreo; y como muestra compuesta a "aquella que resulta de mezclar varias muestras simples".

El muestreo es la fase más importante para la determinación analítica de un agua, ya que de la técnica empleada dependerá en gran medida la confiabilidad y veracidad de los resultados analíticos obtenidos.

b) Análisis de aguas residuales

Dentro de esta etapa, se hace la selección de los parámetros a determinar y controlar dentro de un proyecto determinado, los cuales dependen tanto de las características y origen de las aguas residuales, como de los usos o disposición final que se pretenda proporcionar al agua.

Los análisis de las muestras de aguas residuales se basan en la identificación de sus parámetros físicos, químicos y biológicos. En la TABLA I-1¹ se citan los principales parámetros utilizados para caracterizar a las aguas residuales.

¹ METCALF-EDDY, Tratamiento, Evacuación y Reutilización de aguas residuales. Edit. Labor, 2a. Edición. (Página 61 y 62).

CARACTERISTICAS FISICAS, QUIMICAS Y BIOLÓGICAS DEL AGUA RESIDUAL	
PARAMETRO	ORIGEN
CARACTERISTICAS FISICAS	
Color	Aguas residuales domésticas e industriales, desintegración natural de materiales orgánicos.
Olor	Agua residual en descomposición, vertidos Industriales.
Sólidos	Agua de suministro, aguas residuales domésticas e industriales, erosión del suelo, infiltración y conexiones Incontroladas.
Temperatura	Aguas residuales domésticas e Industriales.
CARACTERISTICAS QUIMICAS	
ORGANICOS	
Carbohidratos	Aguas residuales comerciales e industriales.
Grasas animales, aceite y grasa	Aguas residuales domésticas, comerciales e Industriales.
Pesticidas	Residuos agrícolas.
Fenoles	Vertidos Industriales.
Proteínas	Aguas residuales domésticas y comerciales.
Agentes tensoactivos	Aguas residuales domésticas e Industriales.
Otros	Desintegración natural de materiales orgánicos.
INORGANICOS	
Alcalinidad	Aguas residuales domésticas, agua de suministro, infiltración del agua subterránea.
Cloruros	Agua de suministro, aguas residuales domésticas, infiltración del agua subterránea, ablandadores de agua.
Metales pesados	Vertidos Industriales.
Nitrógeno	Aguas residuales domésticas y residuos agrícolas.
pH	Vertidos Industriales.
Fósforo	Aguas residuales domésticas e industriales, escorrentía residual.
Azufre	Aguas de suministro, aguas residuales, domésticas e Industriales.
Compuestos Tóxicos	Vertidos Industriales.
GASES	
Sulfuro de hidrógeno	
Metano	Descomposición de aguas residuales domésticas.
Oxígeno	Descomposición de aguas residuales domésticas. Agua de suministro, infiltración del agua superficial.
CARACTERISTICAS BIOLÓGICAS	
Animales	Cursos de agua y plantas de tratamiento.
Plantas	Cursos de agua y plantas de tratamiento.
Protistas	Aguas residuales domésticas, plantas de tratamiento.
Virus	Aguas residuales domésticas.

TABLA I-1

La TABLA I-2, presenta los parámetros de contaminación contenidos en las Normas Oficiales Mexicanas (SEDESOL)²; que fijan los criterios ecológicos que deberán cumplir las descargas de aguas residuales.

PARAMETROS DE CONTROL DE LAS AGUAS RESIDUALES, CONTENIDOS EN LAS NORMAS OFICIALES MEXICANAS (SEDESOL)		
PARAMETRO	PARAMETRO	PARAMETRO
Alcalinidad/acidez	Demanda química de oxígeno (DQO)	Nitrógeno
Aluminio	Derivados celulósicos	Nitrógeno total
Amonio	Detergentes	Oxígeno disuelto (OD)
Arsénico	Dibenzoantraceno	Potencial de Hidrógeno (unidades de pH)
Bario	Etilbenceno	Pireno
Benceno	Fenoantraceno	Plata
Benzoantraceno	Fenoles	Plomo
Benzofluoranteno	Fierro	Pollamidas
Benzopireno	Fosfato	Relación de adsorción de sodio (RAS)
Bifenilos polclorados	Fósforo	Resinas acrílicas
Cadmio	Fósforo total	Silicones
Cianuros	Fluor	Sólidos disueltos (SD)
Cobalto	Fluoranteno	Sólidos sedimentables (SS)
Cobre	Fluoreno	Sólidos suspendidos totales (SST)
Coliformes fecales	Fluoruros	Sulfatos
Color	Grasas y aceites	Sulfitos
Compuestos fenólicos	Indeno	Sulfuros
Compuestos nitrogenados	Manganeso	Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)
Conductividad eléctrica	Materia flotante	Temperatura
Cloro libre residual	Mercaptanos	Tolueno
Cloruros	Mercurio	Triclorometano
Cromo	Metales pesados	Turbiedad
Cromo hexavalente	Naftaleno	Vanadio
Cromo total	Nitrógeno amoniacal como NH ₄	Zinc
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO, total)	Níquel	

TABLA I-2

² DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACION. Secretaría de Desarrollo Social. Normas Oficiales Mexicanas en materia de Protección Ambiental. 2a. Sección, lunes 18 de octubre de 1993.

En la TABLA I-3³ se tienen los parámetros de contaminación de mayor importancia en el tratamiento de las aguas residuales.

CONTAMINANTES DE IMPORTANCIA EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL	
CONTAMINANTES	RAZON DE LA IMPORTANCIA
Sólidos en suspensión	Los sólidos en suspensión pueden conducir al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático.
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos, grasas animales; la materia orgánica biodegradable se mide, la mayoría de las veces, en términos de DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y de COO (demanda química de oxígeno). Si se descargan al entorno sin tratar, su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y al desarrollo de condiciones sépticas.
Patógenos	Pueden transmitirse enfermedades contagiosas patógenas presentes en el agua residual.
Nutrientes	Tanto el nitrógeno como el fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se vierten al entorno acuático, estos nutrientes pueden llevar el crecimiento de una vida acuática no deseada. Cuando se vierten al terreno en cantidades excesivas, también pueden conducir a la contaminación del agua subterránea.
Materia orgánica refractaria	Esta materia orgánica tiende a revestir los métodos convencionales de tratamiento. Ejemplos típicos son los agentes tensoactivos, fenoles, y pesticidas agrícolas.
Metales pesados	Los metales pesados son añadidos frecuentemente al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales y puede que deban ser eliminados si se va a reutilizar el agua residual.
Sólidos inorgánicos disueltos	Los constituyentes inorgánicos tales como el calcio, sodio y los sulfatos se añaden al agua de suministro como resultado del uso del agua y puede que deban eliminarse si se va a reutilizar el agua residual.

TABLA I-3

³ MITCALF-EDDY. Op. cit. (pág. 63)

UNIDADES PARA EXPRESAR LOS RESULTADOS ANALITICOS		
BASE	APLICACION	UNIDAD
UNIDADES FISICAS		
Densidad	$\frac{\text{Masa de disolución}}{\text{Unidad de volumen}}$	kg/m ³
% (en volumen)	$\frac{\text{Volumen de soluto} \times 100}{\text{Volumen total de disolución}}$	% (en volumen)
% (en masa)	$\frac{\text{Masa de soluto} \times 100}{\text{Masa total de soluto} + \text{disolvente}}$	% (en masa)
Relación de volumen	$\frac{\text{Milímetros}}{\text{litro}}$	ml/l
Masa por unidad de volumen	$\frac{\text{Miligramos}}{\text{litro de disolución}}$	mg/l
	$\frac{\text{Gramos}}{\text{metro cúbico de disolución}}$	g/m ³
Relación de masa	$\frac{\text{Miligramos}}{10^6 \text{ miligramos}}$	ppm
UNIDADES QUIMICAS		
Molaridad	$\frac{\text{Moles de soluto}}{1000 \text{ gramos de disolvente}}$	moles/kg
Molalidad	$\frac{\text{Moles de soluto}}{\text{litro de disolución}}$	moles/l
Normalidad	$\frac{\text{Equivalentes de soluto}}{\text{litro de disolución}}$	equiv./l
	$\frac{\text{Miliequivalentes de soluto}}{\text{litro de disolución}}$	meq/l

TABLA I-4

c) Expresión de los resultados analíticos

Una vez realizados los análisis del agua residual, los resultados se expresan por medio de unidades de medida físicas y químicas. Las unidades mas usuales se presentan en la TABLA I-4⁴.

Las concentraciones de los parámetros químicos son expresados generalmente en mg/l. Los gases disueltos son considerados como parámetros químicos, por lo que se miden en mg/l, no sucediendo lo mismo con los gases desprendidos como subproducto del tratamiento de las aguas residuales, los cuales suelen medirse en litros y/o metros cúbicos.

I.4 CARACTERISTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

En la TABLA I-5⁵, a manera de ejemplo aparecen las concentraciones típicas de los principales parámetros contenidos en las aguas residuales domésticas crudas.

⁴ METCALF-EDDY. op. cit. (Pág. 68)

⁵ METCALF-EDDY. Op. cit. (pág. 69)

COMPOSICION TIPICA DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS NO TRATADAS			
CONSTITUYENTE	CONCENTRACION		
	FUENTE	MEDIA	DESL.
Sólidos totales:	1200	720	350
*Disueltos totales	850	500	250
Fijos	525	300	145
Volátiles	325	200	105
*En suspensión totales	350	220	100
Fijos	75	55	20
Volátiles	275	165	80
Sólidos sedimentables, ml/l	20	10	5
Demanda bioquímica de oxígeno a 5 días y 20°C (DBO₅ a 20°C)	400	220	110
Carbono orgánico total (COT)	290	160	80
Demanda química de oxígeno (DQO)	1000	500	250
Nitrógeno (total como N):	85	40	20
*Orgánico	35	15	8
*Amoníaco libre	50	25	12
*Nitritos	0	0	0
*Nitratos	0	0	0
Fósforo (total como P):	15	8	4
*Orgánico	5	3	1
*Inorgánico	10	5	3
*Cloruros ^a	100	50	30
Alcalinidad (como CaCO₃)^a	200	100	50
Grasa	150	100	50

^a Los valores deberían incrementarse en la cantidad correspondiente contenida en el agua de suministro.

TABLA I-5

A continuación se analizarán las principales características de las aguas residuales contenidas en la TABLA I-1.

1.4.1 CARACTERISTICAS FISICAS

La característica física mas importante del agua residual, es su contenido total de sólidos; además se tienen otras características menos importantes como son temperatura, color y olor.

Sólidos totales

Los sólidos totales contenidos en un agua residual pueden tener distintos orígenes:

- del agua de abastecimiento,
- del uso industrial,
- del uso doméstico,
- por infiltración de pozos locales y aguas subterráneas a la red de alcantarillado.

De forma analítica, cuando un agua residual es sometida a temperaturas entre 103-105 °C, la materia remanente que resulta de la evaporación es a lo que se le denominan sólidos totales. La materia que tiene una presión de vapor menor a dicha temperatura se elimina durante la evaporación, por lo que no se considera como sólido.

Ahora bien, los sólidos totales o residuo de evaporación, se clasifican en sólidos suspendidos o sólidos filtrables, y sólidos no filtrables, los cuales se clasifican al hacer pasar un volumen de agua por un filtro.

Los sólidos suspendidos se clasifican nuevamente en sólidos sedimentables y sólidos no sedimentables, los cuales se diferencian al fijar un período de sedimentación de 60 minutos.

Los sólidos filtrables se dividen en sólidos coloidales y sólidos disueltos. Las partículas coloidales poseen un diámetro que oscila entre $10^{-3}\mu\text{m}$. Los sólidos disueltos son moléculas orgánicas e iones que se encuentran presentes en disolución en las aguas y que no pueden ser eliminadas por sedimentación, sino que se requiere una coagulación u oxidación biológica seguida de sedimentación para su eliminación.

A su vez, cada clase de sólidos presentada anteriormente, puede clasificarse en sólidos volátiles y sólidos fijos, los cuales se diferencian en base a su volatilidad a 600°C. A dicha temperatura la fracción orgánica se oxidará y será expulsada como gas (sólidos volátiles), permaneciendo la fracción orgánica (sólidos fijos) como ceniza.

Temperatura

La temperatura del agua residual, por lo general es más alta que la de suministro, debido a la adición de agua caliente proveniente de las descargas tanto domésticas como industriales.

La temperatura del agua es un parámetro muy importante por su efecto en la vida acuática, en las reacciones químicas y velocidad de reacción, así como también en los usos posteriores que pretendan darse al agua.

Color

En términos generales puede decirse que por la impresión visual del agua residual, se puede establecer si se trata de un agua residual reciente, ya que posea un color grisáceo o bien añeja, cuando posea un color negro. Además, algunas aguas residuales de tipo industrial añaden ciertas coloraciones al agua.

Olor

Los olores de las aguas residuales son debidos a los gases producto de la descomposición de la materia orgánica o bien producto de algunos compuestos industriales olorosos o capaces de producir olores en el proceso de tratamiento.

El agua residual reciente tiene un olor peculiar desagradable, en cambio el agua residual en fase séptica tiene un olor mas fuerte y desagradable, caracterizándose principalmente el del sulfato de hidrógeno producto de la reducción de sulfatos a sulfitos a cargo de microorganismos anaerobios.

1.4.2 CARACTERISTICAS QUIMICAS

Materia orgánica

La materia orgánica contenida en un agua, procede de los reinos animal y vegetal y de las actividades humanas relacionadas con la síntesis de compuestos orgánicos. Los compuestos orgánicos se encuentran formados principalmente por la combinación de carbono, hidrógeno y oxígeno, conjuntamente con nitrógeno, en algunos casos; aunque pueden tenerse presentes también otros elementos importantes, tales como azufre, fósforo y hierro.

Los principales grupos de sustancias orgánicas halladas en el agua residual son las proteínas (40-60%), carbohidratos (25-50%) y grasas y aceites (10%). La urea, principal constituyente de la orina, es otro importante compuesto orgánico del agua residual. El agua residual contiene además pequeñas cantidades de un gran número de diferentes moléculas orgánicas sintéticas cuya estructura varía desde muy simple hasta sumamente compleja, como por ejemplo: agentes tensoactivos (detergentes), fenoles y pesticidas. El número de dichos compuestos aumenta año tras año al irse incrementando la síntesis de moléculas orgánicas. La presencia de dichas sustancias en las aguas residuales, ha dificultado el tratamiento de las aguas residuales en los últimos años, ya que muchas de ellas no pueden descomponerse biológicamente, o bien, lo hacen muy lentamente.

Proteínas. Son los principales componentes de los organismos animales y en menor grado se encuentran presentes en los organismos vegetales.

Todas las proteínas contienen carbono, hidrógeno, oxígeno y como característica principal, contiene una proporción bastante elevada y constante de nitrógeno (alrededor del 16 %). En algunos casos, también se tienen presentes el azufre, fósforo y hierro.

En las aguas residuales, la urea y las proteínas son las fuentes principales de nitrógeno. Ahora bien, si se tienen presentes grandes cantidades de proteínas en un agua residual, se producen olores extremadamente desagradables al descomponerse.

Carbohidratos. Los carbohidratos se encuentran formados por carbono, hidrógeno y oxígeno; incluyen azúcares, almidones, celulosa y fibra de madera. Todos ellos se encuentran presentes en las aguas residuales.

La celulosa es el carbohidrato contenido en el agua residual más importante, debido a que se encuentra en mayores proporciones y posee una amplia resistencia a su descomposición.

Grasas animales, aceites y grasa. Dentro de las aguas residuales, el término grasa incluye las grasas animales, aceites y ceras.

Las grasas animales y aceites son compuestos (ésteres) de alcohol o glicérico (glicerina) y ácidos grasos. Los ésteres de ácidos grasos que son líquidos a las temperaturas ordinarias se llaman aceites y los que son sólidos se llaman grasas. Son químicamente muy semejantes, siendo sus componentes carbono, hidrógeno y oxígeno en diversas proporciones.

Las grasas son uno de los compuestos orgánicos más estables y no puede ser descompuesto fácilmente por las bacterias.

El queroseno, los aceites lubricantes y los procedentes de materiales bituminosos usados en la construcción de carreteras, son derivados del petróleo y alquitrán, y contienen principalmente, carbono e hidrógeno. Estos aceites llegan a las alcantarillas en grandes volúmenes procedentes de tiendas, garajes y calles.

El contenido de grasa del agua residual puede producir muchos problemas tanto en las alcantarillas como en las plantas de tratamiento. Es necesario eliminar la grasa contenida en el agua residual antes de su vertido, porque de lo contrario, puede interferir con la vida biológica en las aguas y crear películas y materia en flotación imperceptibles.

Agentes tensoactivos. Los agentes tensoactivos son grandes moléculas orgánicas, ligeramente solubles en agua que causan espumas en el agua.

Los agentes tensoactivos tienden a acumularse en la interfase aire-agua, por lo cual, durante el proceso de aireación en el tratamiento del agua residual, estos compuestos se acumulan en la superficie de las burbujas de aire, causando con ello una gran cantidad de espuma.

Antiguamente, el tipo de agente tensoactivo presente en los detergentes sintéticos, llamados sulfonato de alquilbenceno (SAB), ofrecía muchas dificultades para su eliminación por su alta resistencia a la descomposición por medios biológicos. Actualmente, el SAB es sustituido en los detergentes por sulfonatos de alquilo lineales (SAL) que son biodegradables, con lo que se logró reducir en gran medida el contenido de espuma en las plantas de tratamiento.

Fenoles. Los fenoles presentes en las aguas residuales, tienen su origen en los desechos industriales.

En la potabilización del agua, los fenoles causan problemas de sabor, especialmente cuando ésta está clorada. En el tratamiento del agua residual, los fenoles pueden ser biológicamente oxidados en concentraciones menores de 500 mg/l.

Pesticidas y productos químicos agrícolas. Los compuestos orgánicos traza, tales como pesticidas, herbicidas y otros productos químicos usados en la agricultura, resultan ser peligrosos contaminantes de las aguas, ya que son tóxicos para gran número de formas de vida. Estos productos químicos suelen incorporarse al agua residual como resultado de la escorrentía de parques, campos agrícolas y tierras abonadas. Las concentraciones de estos productos químicos puede provocar desde la contaminación de la carne de los peces hasta su muerte, como también el empeoramiento de la calidad del agua de suministro.

Medida del contenido orgánico

Los métodos de laboratorio más utilizados para la determinación del contenido orgánico de las aguas residuales son: la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), carbono orgánico total (COT), demanda total de oxígeno (DTO). Como un análisis complementario a los expresados anteriormente, se tiene la demanda teórica de oxígeno (DTeO), la cual se determina con las fórmulas químicas de la materia orgánica.

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). La DBO se define como la medida aproximada de oxígeno disuelto que requieren las bacterias para degradar la materia orgánica presente en el agua, bajo condiciones aerobias.

La determinación de la DBO consiste en la medida aproximada del oxígeno disuelto utilizado por los microorganismos en la oxidación bioquímica de la materia orgánica presente.

Dentro del análisis tanto de las aguas residuales como superficiales, el parámetro de contaminación orgánica más comúnmente utilizado es la DBO a los 5 días (DBO_5). Específicamente, dentro del análisis de las aguas residuales, los resultados de la DBO son muy importantes, ya que son utilizados para: 1) determinar la cantidad aproximada de oxígeno que se requerirá para estabilizar la materia orgánica presente; 2) determinar el tamaño de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales y 3) medir la eficiencia de algunos procesos de tratamiento.

Demanda Química de Oxígeno (DQO). Se define como la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar los compuestos orgánicos por vía química.

Al igual que la DBO, el ensayo de la DQO se emplea para medir el contenido de materia orgánica tanto de las aguas naturales como de las residuales. Dentro del análisis de las aguas residuales, este ensayo se emplea igualmente para medir la materia orgánica en aguas de origen industrial o municipal que contengan compuestos tóxicos para la vida biológica.

En muchos tipos de aguas residuales es posible correlacionar la DQO con la DBO, lo cual resulta útil ya que la DQO puede determinarse en 3 horas, comparado con los 5 días que requiere la DBO.

Carbono Orgánico Total (COT). Utilizado para medir el contenido de materia orgánica cuando las concentraciones de la misma son pequeñas. Debido a que el ensayo se realiza en muy poco tiempo, su uso se ha extendido muy rápidamente. Sin embargo, como el ensayo se basa en la oxidación de la materia orgánica, existen algunos compuestos orgánicos que no se oxidan, por lo que el resultado del COT resultará ligeramente inferior al valor real.

Demanda Total de Oxígeno (DTO). En este ensayo las sustancias orgánicas y, en menor escala, las inorgánicas se transforman en productos finales estables dentro de una cámara de combustión catalizada con platino. La DTO se determina observando el contenido de oxígeno presente en el gas que transporta el nitrógeno. Este ensayo consume muy poco tiempo y sus resultados pueden ser correlacionados con la DQO.

Demanda Teórica de Oxígeno (DTeO). Ensayo de laboratorio por medio del cual se puede determinar el contenido de materia orgánica al evaluar la cantidad de oxígeno necesaria para la descomposición de la materia orgánica si es que se conoce la fórmula química de la materia orgánica.

Materia Inorgánica

Las concentraciones de los distintos constituyentes inorgánicos pueden afectar de manera significativa los usos del agua, a pesar de lo cual, las aguas residuales, a excepción de algunos residuos industriales, son raramente tratados para la eliminación de los constituyentes inorgánicos añadidos en su ciclo de utilización. Debido a lo anterior, se presenta a continuación un análisis de la naturaleza de algunos de los componentes inorgánicos presentes en las aguas residuales.

Potencial Hidrógeno (pH). La concentración del ion hidrógeno o mejor conocido con el término de potencial de hidrógeno (pH), es un importante parámetro de calidad tanto de las aguas naturales como de las residuales, ya que de su concentración dependerá la existencia de la mayoría de la vida biológica.

Ahora bien, para el tratamiento de las aguas residuales es necesario que la concentración de pH se encuentre en el intervalo idóneo de manera que permita el desarrollo de la vida biológica, de lo contrario, el agua residual será difícil de tratar por medios biológicos y si la concentración no se modifica antes de la evacuación, el efluente puede alterar la concentración de las aguas naturales.

Cloruros. Los cloruros que se encuentran en el agua tienen distintos orígenes, los cuales pueden ser:

- Disolución de suelos y rocas que han estado en contacto con el agua,
- En regiones costeras de la intrusión de aguas saladas,
- Descargas de aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales en las aguas superficiales,
- En lugares donde se utilizan ablandadores para disminuir la dureza del agua, éstos añaden grandes cantidades de cloruros al agua.

Alcalinidad. La alcalinidad es producida por hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos tales como calcio, magnesio, sodio, potasio y amoníaco. Aunque los más frecuentes son los bicarbonatos magnésicos y de calcio.

Un agua residual generalmente es alcalina, resultando importante su concentración cuando el agua tenga que recibir algún tratamiento químico o bien cuando se pretenda eliminar el amoníaco mediante el arrastre por aire.

Nitrógeno. Tanto el nitrógeno como el fósforo son los principales elementos nutritivos para el crecimiento biológico y por tanto son conocidos como elementos nutrientes o bioestimulantes.

Es de vital importancia el evaluar la concentración de nitrógeno dentro de las aguas residuales, para poder valorar su tratabilidad mediante procesos biológicos, debido a que el nitrógeno es absolutamente básico para la síntesis de las proteínas.

El nitrógeno se encuentra presente en el agua de distintas formas, así tenemos que el nitrógeno presente en un agua residual reciente se encuentra en forma de urea y materia protéica, luego éste se transforma en amoníaco por medio de la acción de las bacterias. Ahora bien, dentro de un ambiente aerobio, las bacterias oxidan el nitrógeno del amoníaco para formar nitritos y nitratos.

Por lo anterior, la forma en que el nitrógeno se encuentra presente en un agua residual es continuamente utilizada para definir la edad del agua residual, así por ejemplo, si en un agua residual predomina el nitrógeno en forma de nitrato, esto indica que el agua residual se ha estabilizado con respecto a la demanda de oxígeno.

El nitrógeno en forma de nitratos es utilizado por las algas y otras plantas para formar proteínas y a su vez pueden ser utilizadas por animales para formar proteínas animales. Por tal razón se hará necesario eliminar o reducir los nitratos para evitar (cuando el caso así lo exija), dichos crecimientos.

Fósforo. En el agua el fósforo puede encontrarse en distintas formas, siendo las más frecuentes los ortofosfatos, polifosfatos y fosfatos orgánicos.

Como se dijo con anterioridad, el fósforo es esencial para el crecimiento de las algas y otros organismos biológicos. Debido a los crecimientos explosivos nocivos que tienen lugar en las aguas superficiales, es necesario controlar la cantidad de compuestos de fósforo presentes en las aguas superficiales provenientes tanto de las descargas de agua residual ya sea de origen doméstico como industrial y de las escorrentías naturales.

Azufre. El azufre se encuentra presente de forma natural en la mayoría de los suministros de agua o bien en el agua residual, en forma de ion sulfato.

Los sulfatos son reducidos químicamente a sulfuros y a sulfuro de hidrógeno (SH_2) por bacterias en condiciones anaerobias; éste último a su vez puede ser oxidado biológicamente para formar ácido sulfúrico.

Es importante controlar las concentraciones del azufre en sus distintas formas, ya que el ácido sulfúrico en concentraciones altas puede corroer las tuberías del alcantarillado (efecto corona). Ahora bien, los sulfatos son reducidos a sulfuros en los digestores de lodos y si no hay un control en su concentración, esto puede alterar el funcionamiento de los procesos biológicos.

Compuestos tóxicos. Dentro de estos tenemos al cobre, plomo, plata, cromo, arsénico y boro, los cuales son tóxicos a los microorganismos en distinta medida, por lo cual, deben ser cuantificados cuando se pretenda emplear algún proceso biológico para su tratamiento, ya que la presencia de éstos iones pudiera causar trastornos a las plantas de tratamiento, hasta el extremo de causar la muerte de los microorganismos responsables de los procesos.

Metales pesados. Son importantes constituyentes de muchas aguas, los principales son el níquel (Ni), manganeso (Mn), plomo (Pb), cromo (Cr), cadmio (Cd), zinc (Zn), cobre (Cu), hierro (Fe) y mercurio (Hg). Debe siempre tenerse un control de su concentración, ya que su presencia en concentraciones adecuadas es indispensable para el desarrollo de la vida biológica, de lo contrario se estaría limitando su desarrollo; en cambio, si se encuentran en concentraciones excesivas, interferirán con muchos usos provechosos del agua, dada su toxicidad.

Gases

Los gases mas frecuentes encontrados en el agua residual son nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2), anhídrido carbónico (CO_2), sulfuro de hidrógeno (SH_2), amoníaco (NH_3), y metano (CH_4). Los tres primeros se encuentran en aguas que están en contacto con el aire, procediendo consecuentemente de la interfase agua-aire, y los tres últimos son exclusivos de las aguas residuales, ya que proceden de la descomposición de la materia orgánica contenida en el agua residual.

Oxígeno Disuelto (O.D.) El oxígeno disuelto es necesario para la respiración de los microorganismos, así como de otras formas de vida aerobia; debido a lo cual su presencia en el agua residual es deseable, de manera que la descomposición de la materia orgánica se de en condiciones aerobias y se eviten los malos olores que se generan cuando la materia orgánica es degradada en condiciones anaerobias.

Sulfuro de hidrógeno. El sulfuro de hidrógeno es un gas incoloro, inflamable y tiene un olor característico de huevo podrido; su presencia en las aguas residuales tiene su origen en la descomposición de la materia orgánica que contiene azufre o bien por la reducción de sulfitos y sulfatos minerales en condiciones casi facultativas (ya que no se forma en presencia de un contenido abundante de oxígeno).

Cuando este gas se encuentra presente ya sea en aguas residuales como en lodos, se combina con el hierro presente para formar sulfuro ferroso (SFe) el cual le adiciona al agua una coloración negruzca.

Metano. El metano es un hidrocarburo combustible, incoloro e inodoro y resulta ser el principal subproducto de la descomposición de la materia orgánica contenida en las aguas residuales bajo condiciones anaerobias (ya que incluso pequeñas cantidades de oxígeno resultan ser tóxicas para los organismos responsables de la producción del metano). Sin embargo, suele suceder que se de la producción de metano como consecuencia de la descomposición de la materia orgánica acumulada en el fondo de algún depósito de aguas residuales.

1.4.3 CARACTERISTICAS BIOLÓGICAS

Dentro de esta sección se darán a conocer los principales grupos de microorganismos contenidos tanto en las aguas naturales como en las residuales, así como aquellos que intervienen en los procesos de tratamiento biológico. Se identificarán también aquellos organismos utilizados como indicadores de polución de las aguas.

Microorganismos

Los microorganismos que se encuentran en las aguas superficiales y residuales se clasifican en cuatro grupos principales: protistas, virus, plantas y animales.

Protistas. Dentro de éstos se tienen a las bacterias, algas y protozoos. Sin embargo, la importancia del estudio de las bacterias radica en la responsabilidad de las mismas en la descomposición y estabilización de la materia orgánica contenida tanto en las aguas residuales como en las naturales. Ahora bien, las bacterias coliformes son utilizadas como un indicador de polución producto de vertidos de origen humano.

Las algas pueden presentar un serio inconveniente en las aguas superficiales, ya que cuando las condiciones son favorables, pueden reproducirse rápidamente y cubrir ríos, lagos y embalses con grandes colonias flotantes, fenómeno que se conoce como eutroficación. Puesto que el effluente de las plantas de tratamiento de agua residual es, por lo general, rico en nutrientes biológicos, la descarga del effluente en lagos, motiva su enriquecimiento y aumenta la tasa de eutroficación. Los mismos efectos pueden darse en los ríos.

La presencia de algas afecta el valor del agua de suministro, ya que puede causar problemas de olor y sabor. Las algas pueden igualmente alterar el valor de las aguas superficiales por el crecimiento de ciertas especies de peces y de otro tipo de vida acuática.

Sin embargo, se ha planteado la solución para evitar el crecimiento de algas y otras plantas acuáticas, la cual se encuentra dada por la eliminación del carbono, de las distintas formas de nitrógeno y fósforo, así como también la eliminación de elementos tales como el hierro y el cobalto.

Los protozoos mas importantes de considerar para el tratamiento de las aguas residuales son las amebas, los flagelados y los ciliados libres y fijos. Estos protistas son básicos tanto para el funcionamiento de los procesos biológicos de tratamiento, como en el proceso de autopurificación de los ríos ya que mantienen el equilibrio natural entre los distintos grupos de microorganismos.

Virus. El contenido de estos microorganismos en una fuente de abastecimiento de agua a alguna población, representa un gran riesgo a la salud pública, ya que pueden llegar a provocar serios problemas epidémicos a las poblaciones a las cuales abastece.

Plantas y animales. El análisis del contenido de estos organismos en un agua es útil en la valoración tanto de las aguas naturales como de las aguas residuales; así por ejemplo si el análisis se aplica a aguas naturales, servirá para valorar el estado de pureza y contenido de sustancias y materia que permitan o inhiban el desarrollo de los mismos; en las aguas residuales, el análisis de contenido de estos organismos se usa tanto para evaluar la toxicidad de las aguas residuales como para evaluar la efectividad de la vida biológica en los procesos secundarios de tratamiento utilizados para destruir los residuos orgánicos.

Organismos patógenos

Los organismos patógenos encontrados en el agua residual, tienen su origen en los desechos excretados por humanos que están infectados o que simplemente son portadores de alguna enfermedad. Los organismos patógenos bacterianos, son los más numerosamente contenidos en las aguas residuales, dichos organismos son altamente infecciosos y son los responsables de epidemias del aparato gastrointestinal, tales como fiebre tifoidea o paratifoidea, disentería, diarrea y cólera.

Dentro de un agua residual existe gran variedad de organismos patógenos; la identificación de los mismos además de difícil, requiere un consumo extremado de tiempo, por lo cual, el grupo de organismos coliformes, se utiliza actualmente como indicador de la presencia de heces fecales y por lo tanto de organismos patógenos.

Organismos coliformes

Los organismos coliformes no son dañinos al hombre y, de hecho, son útiles para destruir la materia orgánica en los procesos biológicos de tratamiento de las aguas residuales, sin embargo, como se mencionó con anterioridad, dado que se encuentran en mayor número y su determinación es sencilla, se utilizan como indicadores de polución fecal. Su presencia es interpretada como un indicador de que los organismos patógenos pueden estar presentes y su ausencia indica que el agua se halla exenta de organismos productores de enfermedades.

CAPITULO II ASPECTOS BASICOS DEL TRATAMIENTO

II.1 CLASIFICACION DE LOS METODOS DE TRATAMIENTO

Para efecto del presente trabajo, es necesario establecer las siguientes definiciones:

Contaminación, se define así a la acumulación de sustancias, elementos o efectos en el medio ambiente, produciendo efectos nocivos en los organismos que conforman los ecosistemas.

Contaminación del agua, se refiere al efecto de alteración de la composición natural del agua, debido a la acumulación de sustancias o elementos, de tal manera que ya no reúne las condiciones de calidad adecuadas a uno u otro o al conjunto de usos que se ubiese destinado en su estado natural.

Agua residual tratada¹, es el líquido de composición variada proveniente del agua residual y resultante de un conjunto de operaciones y procesos de tratamiento, ya sea primario, secundario o terciario.

Planta de tratamiento¹. Instalación industrial compuesta de un conjunto de unidades de proceso que depuran las aguas residuales, a fin de reutilizarse de conformidad con las Normas de Salud y Ecológicas establecidas.

¹ Reglamento del Servicio de Agua y Drenaje para el D.F. (Depto. del D.F.)

Contaminantes del agua. Los contaminantes del agua son aquellas sustancias o materiales que se encuentran contenidos en el agua y que por tal motivo modifican sus propiedades ya sea físicas, químicas o biológicas, invalidándola para su aprovechamiento posterior, por representar un recurso que involucra riesgos tanto sanitarios como ambientales.

Los contaminantes presentes en el agua residual pueden ser eliminados por medios físicos, químicos y biológicos. Los métodos individuales de tratamiento se clasifican en **Operaciones Físicas Unitarias, Procesos químicos Unitarios y Procesos Biológicos Unitarios.** A pesar de que dichas operaciones y procesos se utilizan combinados en los sistemas de tratamiento, resulta ventajoso estudiar las bases científicas de cada uno de ellos por separado, ya que los principios básicos no varían. Para los fines de este trabajo, es necesario establecer los siguientes conceptos:

Operaciones Físicas Unitarias. Se denominan así, a los métodos de tratamiento en los que predomina la aplicación de los fenómenos físicos.

Procesos Químicos Unitarios. Los métodos de tratamiento en los cuales la eliminación o conversión de los contaminantes es acelerada por la adición de productos químicos y por reacciones químicas entre algunos componentes específicos del agua, se conocen por procesos químicos unitarios.

Procesos Biológicos Unitarios. Se conocen como procesos biológicos unitarios, aquellos métodos de tratamiento en los cuales se consigue la eliminación de los contaminantes mediante la acción biológica. Generalmente este tipo de procesos es utilizado para eliminar las sustancias orgánicas biodegradables (coloidales o disueltas) presentes en el agua residual, aunque también suelen utilizarse para la eliminación del nitrógeno. El mecanismo mediante el cual se elimina la materia orgánica biodegradable es mediante su conversión en gases que escapan a la atmósfera y en tejido celular que puede ser fácilmente eliminado mediante sedimentación.

La aplicación de las operaciones y procesos unitarios se agrupan para constituir diferentes sistemas de tratamiento. Dichos sistemas tendrán distintos alcances de tratamiento, también denominado nivel de tratamiento, dependiendo del tipo de operaciones y procesos que involucre.

El nivel de tratamiento requerido en un proyecto específico de aguas residuales, dependerá de las características iniciales del agua a tratar, así como de la calidad requerida por el efluente tratado.

Los niveles de tratamiento se clasifican en: primario, secundario y terciario (avanzado). Se denomina **nivel de tratamiento primario** a aquel sistema de tratamiento donde predominan las operaciones físicas unitarias y cuyo objetivo primordial es la remoción de los sólidos sedimentables y flotantes.

Un nivel de tratamiento secundario es aquel donde se tienen presentes los tres tipos de operaciones y procesos unitarios, predominando la acción de los procesos biológicos; tienen como objetivo primordial la eliminación de la mayoría de la materia orgánica.

Dentro de un nivel de tratamiento terciario, al igual que en el tratamiento secundario, se tienen presentes los tres tipos de operaciones y procesos unitarios, predominando en este caso la acción de los procesos químicos. Dentro de un tratamiento terciario se eliminan componentes tales como nitrógeno y fósforo, que no pueden ser eliminados totalmente en el tratamiento secundario.

Los contaminantes de mayor interés presentes en el agua residual, así como las operaciones y procesos aplicables para la eliminación de esos contaminantes se muestran en la tabla II-1². Dentro de la figura 1³ se presenta la ubicación de las operaciones y procesos dentro de una planta de tratamiento de aguas residuales.

Como parte de el tratamiento de las aguas residuales y de igual importancia, si no es que mayor todavía, son las operaciones y procesos unitarios o sistemas utilizados para el tratamiento de los lodos, producto del tratamiento de la fracción líquida del agua residual. Los principales métodos usados para el tratamiento de los lodos se muestran en la tabla II-2⁴. En las figuras 2A y 2B⁵ se presenta de manera general la secuencia y ubicación de las operaciones y procesos aplicables al tratamiento y disposición del lodo.

² METCALF-EDDY. Tratamiento, Evacuación y Reutilización de las aguas residuales. Edit. Labor. 2a. Edición. (pág. 135)

³ METCALF-EDDY. Op. Cit. (Pág. 286)

⁴ METCALF-EDDY. Op. cit. (pág. 136)

⁵ METCALF-EDDY. Op. Cit. (Págs. 632 y 633)

OPERACIONES, PROCESOS UNITARIOS Y SISTEMAS DE TRATAMIENTO UTILIZADOS PARA ELIMINAR LA MAYORIA DE CONTAMINANTES PRESENTES EN EL AGUA RESIDUAL	
CONTAMINANTE	OPERACION UNITARIA, PROCESO UNITARIO O SISTEMA DE TRATAMIENTO
Sólidos en suspensión	Sedimentación Desbaste y aireación Filtración Flotación Adición de polímeros o reactivos químicos Coagulación / sedimentación Sistemas de tratamiento por disposición al terreno
Materia orgánica biodegradable	Lodos activados Película fija: filtros percoladores Película fija: discos biológicos Lagunas Filtración Intermitente en arena Sistemas de tratamiento por disposición al terreno Sistemas fisicoquímicos
Patógenos	Cloración Hipocloración Ozonización Sistemas de tratamiento por disposición al terreno
Nutrientes: Nitrógeno	Sistema de lagunas Sistemas de cultivo-suspendido con nitrificación y desnitrificación Sistemas de película fija con nitrificación y desnitrificación Arrastre de amoníaco (stripping) Intercambio iónico Cloración en el punto crítico Sistemas de tratamiento por disposición al terreno
Fósforo	Adición de sales metálicas Coagulación y sedimentación con cal Eliminación biológica y química del fósforo Sistemas de tratamiento por disposición al terreno
Materia orgánica refractaria	Adsorción en carbón Ozonización Sistemas de tratamiento por disposición al terreno
Metales pesados	Precipitación química Intercambio iónico Sistemas de tratamiento por disposición al terreno
Sólidos inorgánicos disueltos	Intercambio iónico Osmosis inversa Electrodialisis

TABLA II-1

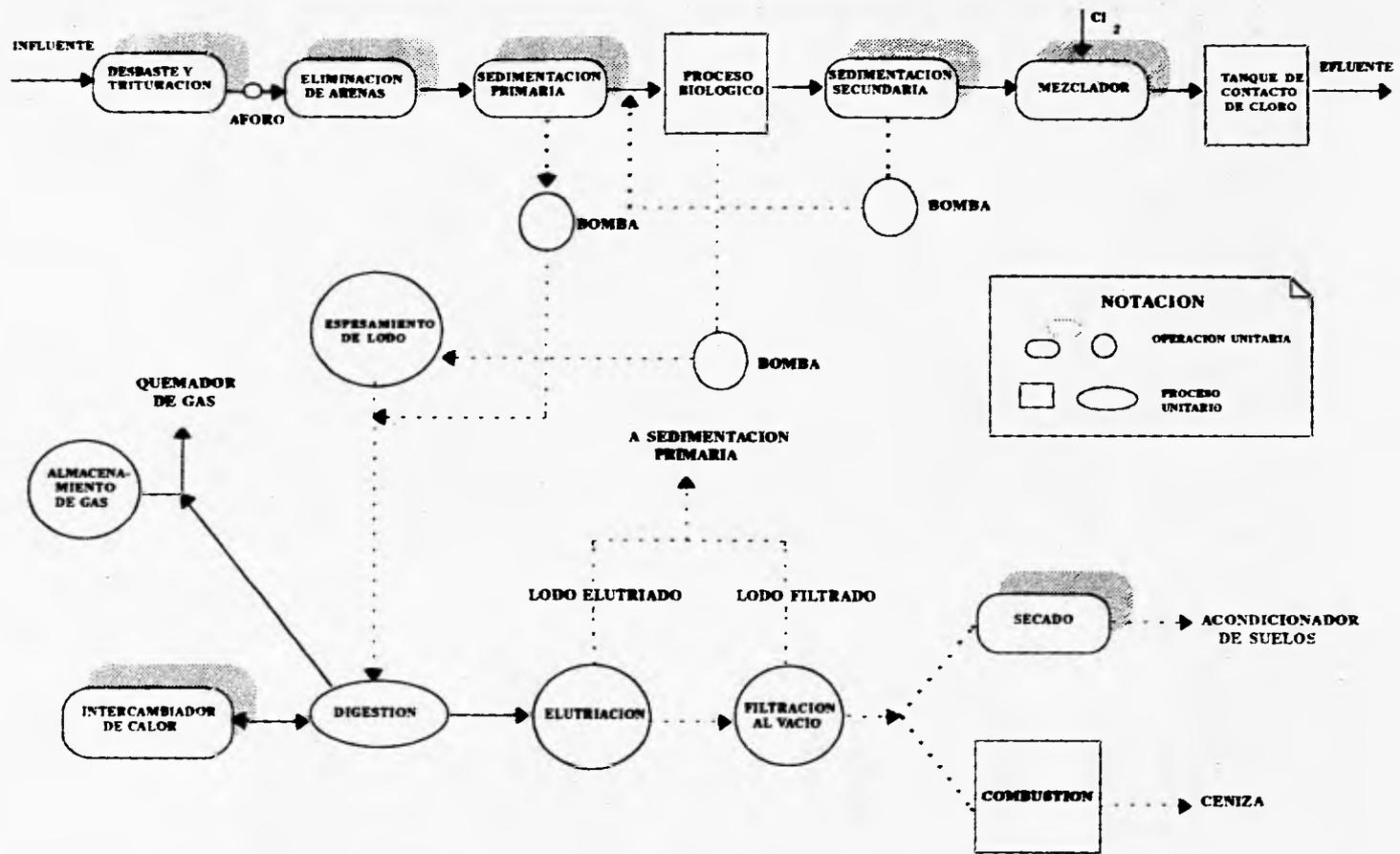


Fig.1 DIAGRAMA DE FLUJO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE DISPOSICIÓN DEL LODO	
FUNCIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO	OPERACIÓN UNITARIA, PROCESO UNITARIO O MÉTODO DE TRATAMIENTO
Operaciones preliminares	Bombeo y dilución del lodo Homogeneización y almacenamiento de lodo
Espesamiento	Espesamiento por gravedad Espesamiento por flotación Centrifugación Clasificación
Estabilización	Oxidación con cloro Estabilización con cal Digestión anaerobia Digestión aerobia Digestión aerobia con oxígeno puro Tratamiento térmico
Desinfección	Desinfección
Acondicionamiento	Acondicionamiento químico Elutriación
Deshidratación	Centrífuga Filtro de vacío Filtro prensa Filtro de banda Lechos de secado Lagunas
Secado	Lechos de secado
Compostaje	Compostaje Compostaje conjunto con residuos sólidos
Reducción térmica	Incinerador de pasos Incinerador de lecho fluidizado Combustión instantánea Incineración conjunta con residuos sólidos Pirólisis conjunta con residuos sólidos Pirólisis Oxidación por vía húmeda Recalcinación
Disposición	Vertedero controlado Vertido al terreno
Reutilización	Acondicionador del suelo Fuente de energía Rescate de sustancias útiles

TABLA II-2

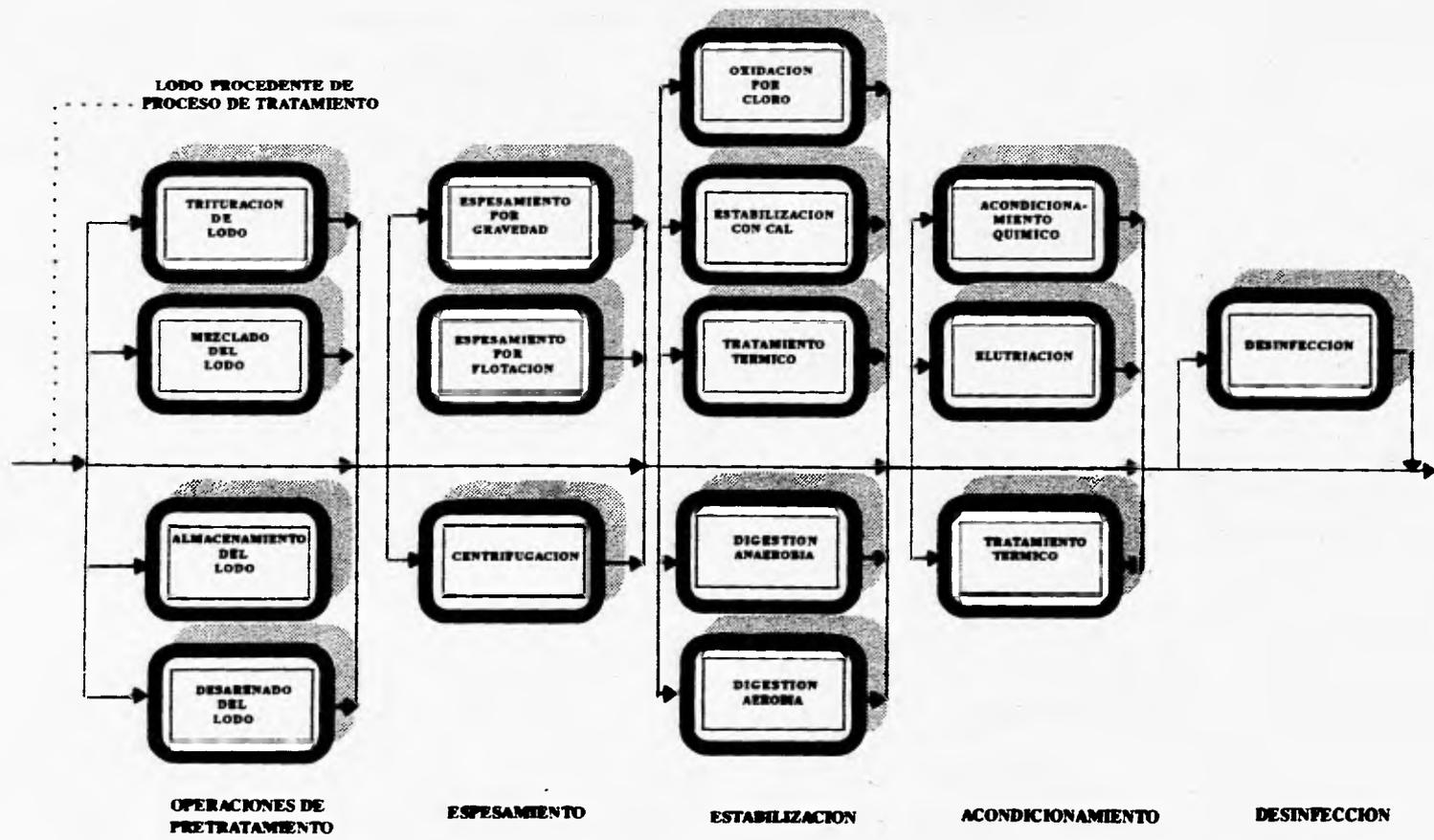


Fig.2A DIAGRAMA GENERAL DE FLUJO, PARA EL TRATAMIENTO Y DISPOSICION DEL LODO

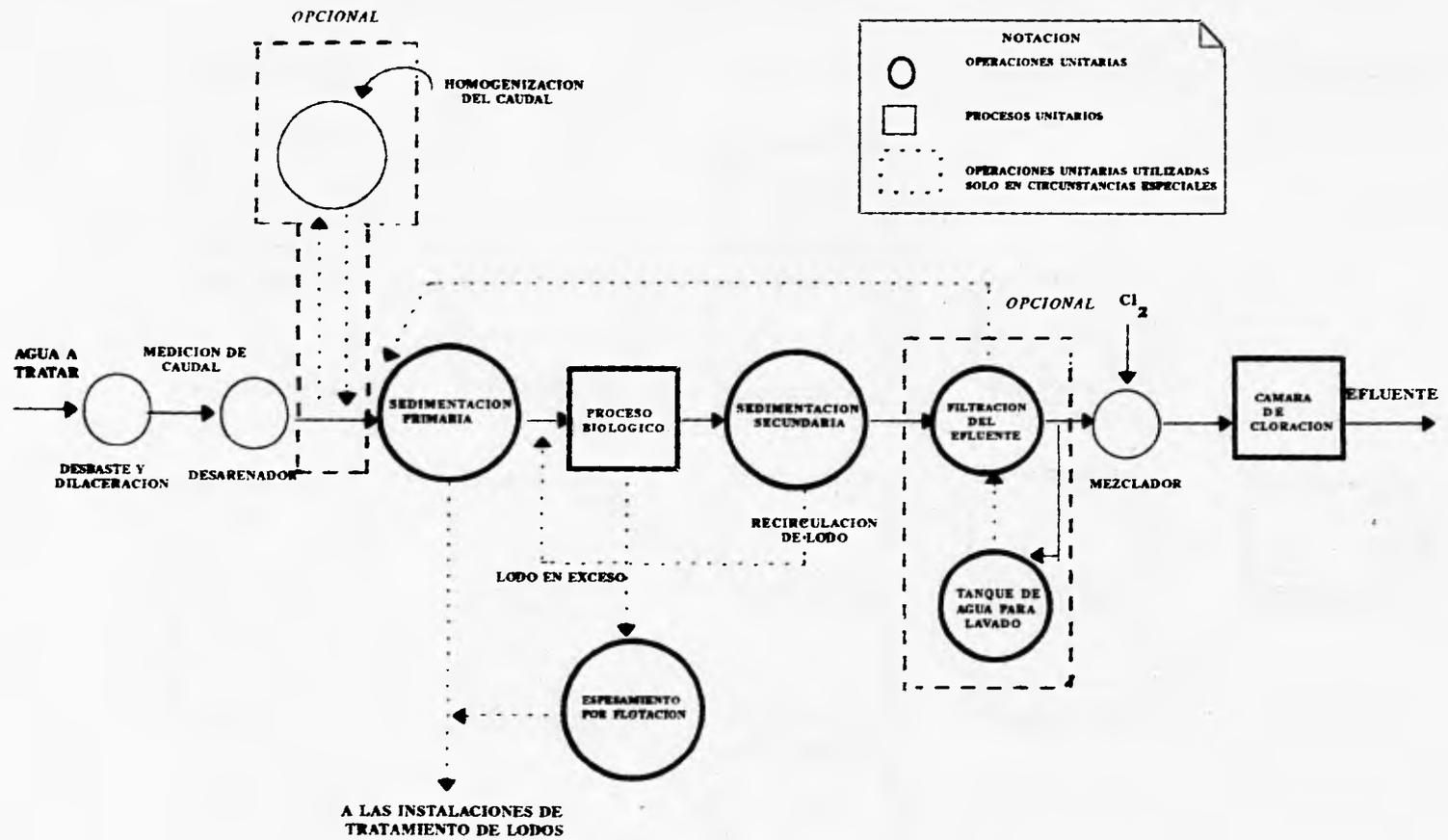


Fig.3 SITUACION DE LAS OPERACIONES FISICAS UNITARIAS EN EL DIAGRAMA DE FLUJO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

II.1.1 OPERACIONES UNITARIAS

Las operaciones unitarias comúnmente utilizadas en el tratamiento de las aguas residuales incluyen: 1) desbaste; 2) dilaceración; 3) homogeneización del caudal; 4) mezclado; 5) floculación; 6) sedimentación; 7) flotación y 8) filtración.

En la tabla II-3⁶ se exponen las principales aplicaciones de las operaciones físicas unitarias en el tratamiento del agua residual. Dentro de la figura 3⁷ se presenta la ubicación de las operaciones unitarias dentro de una planta de tratamiento de aguas residuales.

APLICACIONES DE LAS OPERACIONES FISICAS UNITARIAS EN EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES	
OPERACION	APLICACION
Desbaste	Eliminación de sólidos gruesos y sedimentables por intercepción (retención en superficie)
Dilaceración	Trituración de sólidos gruesos hasta conseguir un tamaño más o menos uniforme
Homogeneización del caudal	Regulación del caudal y de las cargas de DBO y de sólidos en suspensión
Mezclado	Mezclado de los reactivos químicos y gases con el agua residual y, para mantener los sólidos en suspensión
Floculación	Provoca la agregación de pequeñas partículas aumentando el tamaño de las mismas, para mejorar su eliminación por sedimentación por gravedad
Sedimentación	Eliminación de sólidos sedimentables y espesamiento de lodos
Flotación	Eliminación de sólidos en suspensión finamente divididos y de partículas con densidades cercanas a la del agua. También espesa los lodos biológicos
Filtración	Eliminación de los sólidos finos en suspensión que permanezcan tras el tratamiento biológico o químico
Microtamizado	Lo mismo que la filtración, también elimina algas procedentes de los efluentes de estanques de estabilización

TABLA II-3

⁶ METCALF-EDDY. Op. cit. (pág. 198)

⁷ METCALF-EDDY. Op. Cit. (Pág. 197)

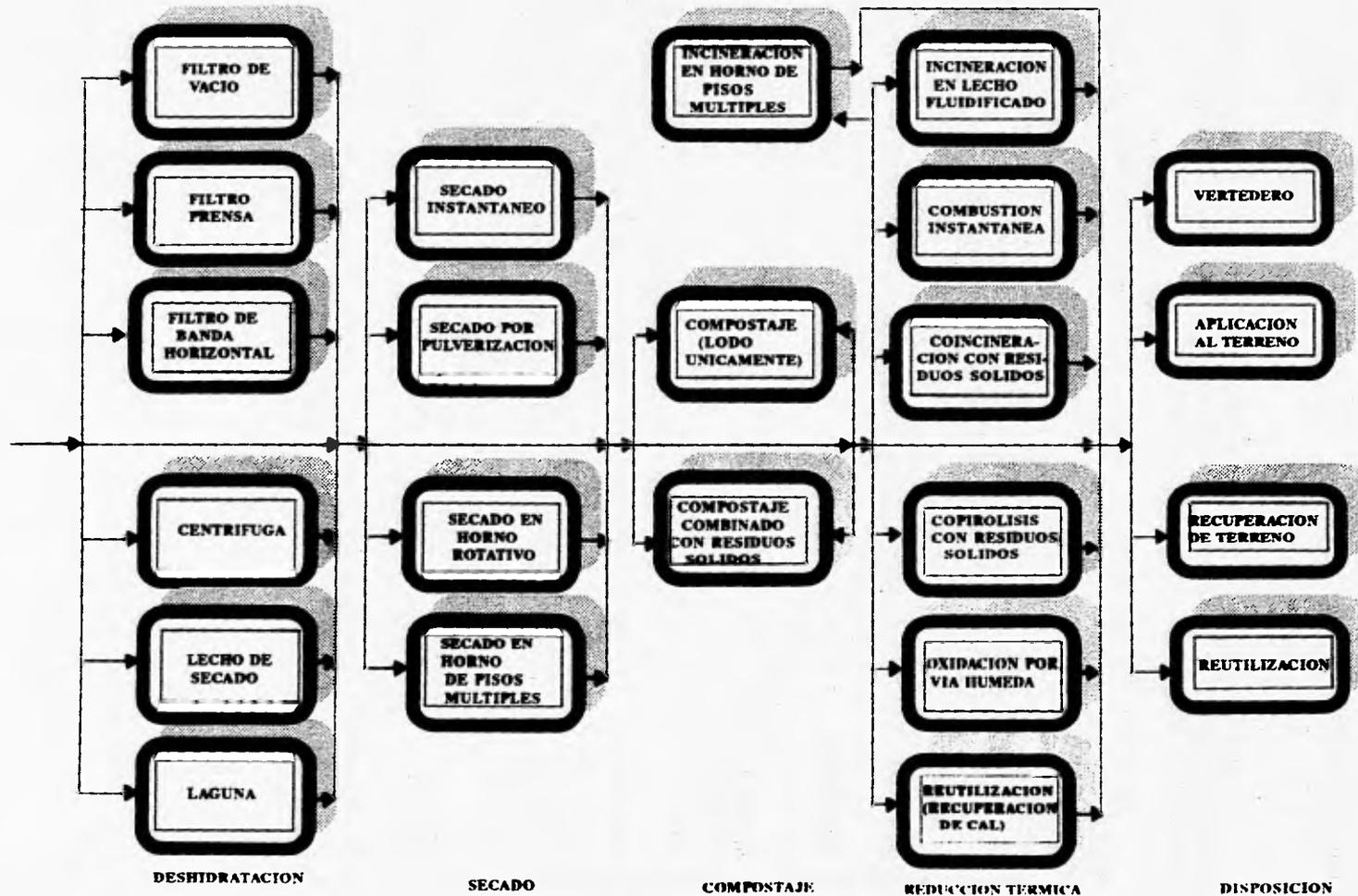


Fig.2B DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL PARA EL TRATAMIENTO Y DISPOSICION DEL LODO (CONTINUACION)

Desbaste

Esta es la primera operación unitaria, dentro del tren de tratamiento de las aguas residuales; consiste en la eliminación de los sólidos de tamaños mas o menos grandes que lleva en suspensión el agua residual.

El desbaste puede realizarse por medio de dispositivos tales como rejillas, rejas o tamices. Una rejilla es un dispositivo con aperturas generalmente de tamaño uniforme, teniendo como elementos separadores alambres. Una reja es aquel dispositivo que tiene como elementos separadores varillas o barras paralelas. Un tamiz es aquel dispositivo formado por una placa perforada o malla metálica, cuyas aberturas pueden tener cualquier forma, aunque generalmente son circulares o rectangulares.

A la función realizada por una reja se le denomina desbaste y al material separado se le conoce como basuras.

Dilaceración

La operación de dilaceración consiste en la trituración de los sólidos de gran tamaño, por dispositivos llamados diceladores, a fin de lograr un tamaño menor y mas uniforme y así poderlos eliminar mas fácilmente por procesos posteriores.

Homogeneización de caudales

La homogeneización del caudal consiste, en la mezcla de los caudales que ingresan a la planta de tratamiento, de manera de obtener una calidad constante o casi constante. Las principales aplicaciones de la homogeneización de caudales son:

- 1.- Homogeneización de caudales en tiempo seco.
- 2.- Homogeneización de caudales procedentes de redes de alcantarillado de sistema separado, en tiempo de lluvias.
- 3.- Homogeneización de caudales mixtos de aguas pluviales y residuales sanitarias.
- 4.- Homogeneización de caudales industriales.

Las instalaciones de tratamiento de aguas residuales son proyectadas en la base de que el agua a tratar posee una calidad mas o menos constante, ya que si se supone una calidad variable, se obtendría una reducción importante en la eficiencia de los procesos de tratamiento. Ahora bien, la homogeneización de caudales se utiliza para superar los problemas operacionales causados por estas variaciones y mejorar la eficiencia de los procesos posteriores.

Floculación

La floculación consiste en poner en contacto las partículas, por medio de agitación, de manera que se formen grumos o flóculos, tras la adición de productos químicos. Sin embargo, la agitación debe controlarse y encontrarse su velocidad adecuada, de manera que los flóculos sean del tamaño adecuado y se depositen rápidamente.

Mezclado

La operación de mezclado consiste en la unión **no** química de dos o más sustancias, esto implica que cada una de ellas conserva sus propiedades originales.

El mezclado puede realizarse de varias formas: 1) en saltos hidráulicos en canales; 2) en tubos tipo Venturi; 3) en conducciones; 4) en bombas, y 5) en recipientes con ayuda de medios mecánicos. En las primeras cuatro formas citadas, el mezclado tiene lugar como resultado de la turbulencia que existe en el régimen de circulación. En la quinta, la turbulencia es inducida por el uso de impulsores giratorios como paletas, turbinas y hélices; gases y bombas de chorro de aire y agua.

El mezclado es una importante operación unitaria utilizada en muchas fases del tratamiento en los cuales se requiera que una sustancia sea incluida en el agua a tratar.

Sedimentación

El procedimiento de sedimentación se basa en el aprovechamiento de la fuerza de gravedad, de modo que las partículas más pesadas se depositen en el fondo. Es una de las operaciones unitarias más utilizadas en el tratamiento de las aguas residuales, siendo aplicada con frecuencia, para la eliminación de arena, de la materia particulada en el tanque de sedimentación primaria, de los flóculos cuando se emplea coagulación química y para la concentración de sólidos en los espesadores de lodo.

Los propósitos de la sedimentación son obtener un efluente clarificado así como la producción de un lodo con una concentración de sólidos adecuada de manera que pueda ser manejado y tratado de manera económica.

Flotación

Es el proceso mediante el cual se separan partículas tanto líquidas como sólidas contenidas en una fase líquida, lo cual se logra al introducir burbujas finas de gas (generalmente aire) en la fase líquida. Las burbujas se adhieren a las partículas y la fuerza ascendente del conjunto partícula-burbuja de gas es tal, que hace que la partícula ascienda a la superficie. De ésta forma se puede lograr el ascenso de partículas de densidad mayor a la del líquido. Sin embargo, aun el ascenso de partículas con densidad menor a la del líquido puede, igualmente, verse facilitada.

La principal ventaja de la flotación sobre la sedimentación es que las partículas muy pequeñas o ligeras que se sedimentan muy lentamente, pueden eliminarse con mayor eficiencia y en menor tiempo. Una vez que las partículas han sido depositadas en la superficie, éstas son captadas mediante un rascado superficial.

Filtración en medio granular

La filtración en medio granular aplicado al tratamiento del agua residual, consiste en hacer pasar el agua residual ya sea con o sin la adición de productos químicos, a través de un lecho filtrante compuesto de material granular. Dentro del lecho filtrante, la eliminación de los sólidos en suspensión se realiza por un complejo mecanismo de eliminación, que incluye uno o más de las siguientes operaciones: tamizado, interceptación, impacto, sedimentación y adsorción.

La filtración con diversos medios granulares es un método para la eliminación de los sólidos residuales presentes en los efluentes procedentes de procesos de tratamiento biológicos o químicos.

II.1.2 PROCESOS QUIMICOS UNITARIOS

Dentro del tratamiento del agua residual, se denominan procesos químicos unitarios a aquellos en los que se transforma la materia orgánica por medio o a través de reacciones químicas.

En la tabla II-4⁶ se presentan los principales procesos químicos en el tratamiento de las aguas residuales y sus aplicaciones.

Precipitación química

La precipitación química consiste en la eliminación de ciertos componentes contenidos en un líquido, por medio de la precipitación de los mismos; provocada por la adición de ciertos productos químicos.

La precipitación química en el tratamiento de las aguas residuales es utilizada con la finalidad de eliminar ciertos componentes contenidos en el agua residual, logrando consecuentemente el mejoramiento del rendimiento de la planta de tratamiento.

Dentro del tratamiento de las aguas residuales, la precipitación química ofrece muchas ventajas:

a) la adición de productos químicos aumenta el grado de eliminación de los sólidos suspendidos y de la DBO,

⁶ METCALF-EDDY. Op. cit. (pág. 282)

b) es muy eficaz en la eliminación del fósforo,
 c) combinada con la adsorción por carbón activo se obtiene un tratamiento completo del agua residual sin necesidad de un tratamiento biológico adicional y aportando, al mismo tiempo, una mejor eliminación de los productos orgánicos del agua que son resistentes al tratamiento biológico.

APLICACIONES DE LOS PROCESOS QUIMICOS UNITARIOS EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL	
PROCESO	APLICACION
Precipitación química	Eliminación de fósforo y aumento de la eliminación de sólidos en suspensión en instalaciones de sedimentación primaria utilizadas en el tratamiento fisicoquímico.
Transferencia de gases	Adición y eliminación de gases.
Adsorción	Eliminación de materia orgánica no eliminada por métodos de tratamiento químicos y biológicos convencionales. También utilizada para la decoloración de agua residual antes del vertido final del efluente tratado.
Desinfección	Eliminación de los organismos causantes de enfermedades (puede realizarse de diversas maneras).
Desinfección con cloro	Eliminación de los organismos causantes de enfermedades. El cloro es el producto químico más comúnmente utilizado.
Decoloración	Eliminación del cloro combinado residual total remanente después de la cloración (puede realizarse de diversas maneras).
Desinfección con ozono	Dstrucción selectiva de los organismos causantes de enfermedades.
Otros	Pueden usarse diversos productos químicos para llevar a cabo objetivos específicos en el tratamiento del agua residual.

TABLA N-4

Transferencia de gases

La transferencia de gases es una operación vital para el funcionamiento de ciertos procesos de tratamiento de las aguas residuales. Específicamente, los procesos en los cuales se utiliza son:

- en los procesos aerobios tales como lodos activados, filtros biológicos y de digestión aerobia; donde su funcionamiento depende de la disponibilidad de oxígeno en cantidades suficientes;

- en la desinfección del agua, en donde el cloro es transferido al agua en forma de gas;

- en el proceso de eliminación de componentes de nitrógeno, que consiste en la conversión del nitrógeno en amoníaco y luego transferir éste del agua al aire;

- en el tratamiento del agua residual séptica, donde se tendrá que añadir aire a fin de eliminar los malos olores y mejorar su tratabilidad.

Adsorción

La adsorción consiste, en la captación a través de una interfase conveniente, de sustancias solubles presentes en una solución. La interfase puede encontrarse entre el líquido y un gas, un sólido u otro líquido. Como ejemplos de utilización de la adsorción en el tratamiento de las aguas residuales se tiene:

- en el proceso de flotación se utiliza la adsorción en la fase aire-líquido.

- en el procesos de adsorción sobre carbón activo, se presenta una adsorción en la interfase líquido-sólido.

El proceso de adsorción sobre carbón activo no había sido utilizado extensivamente en el tratamiento de las aguas residuales, sin embargo, las investigaciones llevadas a cabo sobre el tratamiento de las aguas residuales con carbón activo son muy prometedoras. Este proceso suele considerarse en el tratamiento del agua residual como una fase de pulido final de la calidad del agua tratada por medio de procesos de tratamiento biológico, en cuyo caso, tiene la función de eliminar parte de la materia orgánica residual disuelta. Sin embargo, el tratamiento completo con carbón activo está siendo estudiado como un posible sustituto del tratamiento biológico de las aguas residuales municipales.

Desinfección

La desinfección consiste en la destrucción selectiva de los organismos. La desinfección en el tratamiento de las aguas residuales, suele realizarse mediante agentes químicos, agentes físicos, medios mecánicos y radiación; siendo utilizada para la eliminación de los organismos causantes de enfermedades.

Los agentes químicos utilizados como desinfectantes son: 1) fenol y compuestos fenólicos; 2) alcoholes; 3) yodo; 4) cloro y sus compuestos; 5) bromo; 6) ozono; 7) metales pesados y compuestos afines; 8) colorantes; 9) jabones y detergentes sintéticos; 10) compuestos amoniacales cuaternarios; 11) agua oxigenada y 12) diversos álcalis y ácidos.

Los desinfectantes más corrientes son los productos químicos oxidantes, de los cuales el cloro es el más universalmente utilizado. El bromo y el yodo son, a veces, utilizados en piscinas, pero no en aguas residuales tratadas. El ozono es un desinfectante muy eficaz y, aunque no deja ozono residual, su uso va en aumento; siendo utilizado extensivamente para la eliminación de olores del aire evacuado por las estaciones de bombeo, y en tanques de tratamiento y espesadores cubiertos. También, suele emplearse agua alcalina o muy ácida para destruir bacterias patógenas, ya que el agua con un pH mayor de 11 o inferior a 3 es relativamente tóxica para la mayoría de las bacterias.

Desinfección con cloro

El cloro es el desinfectante químico más universalmente utilizado. La razón es que satisface la mayoría de las características requeridas para los desinfectantes químicos ideales.

Los compuestos de cloro más comúnmente utilizados en las plantas de tratamiento son el gas cloro (Cl_2), el hipoclorito sódico (NaOCl) y el dióxido de cloro (ClO_2). Sin embargo, los hipocloritos cálcico y sódico son los más frecuentemente usados en las plantas de tratamiento de tamaño pequeño, tales como las plantas prefabricadas.

Decloración

La decloración consiste en la eliminación de la totalidad del cloro residual combinado, que resulta tras la cloración. Es importante la eliminación de el cloro residual combinado, para reducir los efectos tóxicos de los efluentes clorados sobre la flora y fauna del cuerpo receptor.

Cuando se requiera utilizar este proceso, ya sea por exigencias de calidad del efluente o como proceso posterior al proceso de cloración para la eliminación del nitrógeno amoniacal, el mejor agente de decloración es el dióxido de azufre, aunque puede utilizarse también el carbón activo. Algunos productos químicos que también pueden ser utilizados son el sulfito sódico (Na_2SO_3) y el metabisulfito sódico ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$).

Desinfección con Ozono

El ozono es un elemento químico oxidante que posee propiedades bactericidas similares al cloro, pero que además es un magnífico agente destructor de virus (inactivación vírica).

II.1.3 PROCESOS UNITARIOS BIOLÓGICOS

Los objetivos que persigue el tratamiento biológico del agua residual son la coagulación y eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica. Aunque cabe recalcar que, dependiendo del origen del agua residual, serán los objetivos del tratamiento biológico, así se tiene que para un agua residual doméstica, los objetivos son: reducir el contenido orgánico y nutrientes tales como nitrógeno y fósforo y en el caso de un agua residual industrial, la finalidad es reducir la concentración de los compuestos orgánicos e inorgánicos.

Para el desarrollo del presente apartado, es necesario definir los siguientes conceptos del tratamiento biológico:

Desnitrificación anóxica. Es el proceso por el cual el nitrógeno de los nitratos se transforma biológicamente en nitrógeno gas en ausencia de oxígeno. Este proceso también es llamado desnitrificación anaerobia.

Eliminación de la DBO carbonosa. Es la conversión biológica de la materia orgánica carbonosa contenida en el agua residual en tejido celular y diversos productos gaseosos.

Nitrificación. Es el proceso biológico consistente en la transformación del amoníaco en nitrito y posteriormente en nitrato.

Desnitrificación. Es el proceso biológico por medio del cual el nitrato se convierte en gas nitrógeno y otros productos gaseosos.

Estabilización. Es el proceso biológico por medio del cual, la materia orgánica contenida en el lodo producido en el proceso de decantación primaria o en cualquier proceso de tratamiento biológico, se estabiliza por medio de su conversión en gases y tejido celular. Según las condiciones en que se lleve a cabo la estabilización, ésta puede ser aerobia o anaerobia.

Sustrato. Es el término que se aplica a la materia orgánica o a los nutrientes que sufren una conversión por algún proceso de tratamiento biológico o, que constituyen un factor limitante de éstos.

Procesos de cultivo en suspensión. Se denomina así a los procesos de tratamiento biológico en los que los microorganismos responsables de la conversión de la materia orgánica u otros constituyentes del agua residual, se encuentran en suspensión en el líquido.

Procesos de cultivo fijo. Son los procesos de tratamiento biológico en los que los microorganismos responsables de la conversión de la materia orgánica u otros constituyentes del agua residual, se encuentran fijos en un medio inerte tal como piedras, escorias o materiales cerámicos o plásticos, diseñados para tal fin. A estos procesos también se les conoce con el nombre de procesos de película fija.

Los procesos de tratamiento biológico se basa en la conversión de la materia orgánica u otros constituyentes del agua residual en diversos gases y tejido celular. Un proceso completo de tratamiento biológico no solo incluye dicha conversión, sino que también, la eliminación del tejido celular resultante, el cual tiene un peso ligeramente mayor que el del agua, por lo que puede eliminarse por medio de decantación del efluente tratado.

En la tabla II-5⁹ aparecen los procesos de tratamiento biológicos más usados actualmente en el tratamiento del agua residual, los cuales se clasifican en: procesos aerobios, anóxicos, anaerobios y una combinación de los procesos aerobios con los anóxicos o con los aerobios.

Como puede verse en la tabla, las aplicaciones principales de los procesos biológicos mencionados son: 1) eliminación de la materia orgánica carbonosa presente en el agua residual, 2) nitrificación, 3) desnitrificación y 4) estabilización.

Los procesos de tratamiento biológico, de acuerdo al tipo de microorganismos responsables del tratamiento de los residuos, se clasifican en: aerobios, anaerobios y aerobios-anaerobios o facultativos.

- **Procesos Aerobios.** El oxígeno se encuentra en cantidades suficientes, por lo que la estabilización de la materia orgánica se encuentra a cargo de organismos aerobios.

- **Procesos Anaerobios.** El oxígeno se encuentra presente en concentraciones escasas o nula, por lo que se tienen presentes tanto microorganismos facultativos como anaerobios.

- **Aerobios-anaerobios o facultativos.** Son los procesos de tratamiento en los que los organismos responsables de el tratamiento son indiferentes a la presencia del oxígeno disuelto, así que se pueden tener presentes los tres tipos de microorganismos: aerobios, anaerobios y facultativos.

⁹ METCALF-EDDY. Op. cit. (págs. 432 y 433)

PRINCIPALES PROCESOS BIOLÓGICOS UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL		
TIPO	NOMBRE COMÚN	USO*
PROCESOS AEROBIOS		
Cultivo en suspensión	Proceso de lodos activados:	
	Convencional (flujo en pistón)	Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación)
	Tanque de mezcla completa	Idem
	Aireación graduada	Idem
	Oxígeno puro	Idem
	Aireación modificada	Idem
	Contacto y estabilización	Idem
	Aireación prolongada	Idem
	Canales de oxidación	Idem
	Nitrificación de cultivos en suspensión:	Nitrificación
	Lagunas aireadas	Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación)
Cultivo fijo	Digestión aerobia:	
	Aire convencional	Estabilización, eliminación de la DBO carbonosa.
	Oxígeno puro	Idem
	Estanques aerobios de alta carga	Eliminación de la DBO carbonosa
Procesos combinados	Filtros percoladores:	
	Baja carga	Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación)
	Alta carga	Idem
	Filtros de pretratamiento	Eliminación de la DBO carbonosa
	Sistemas biológicos rotativos de contacto (bioliscos)	Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación)
Reactores de lecho compacto	Nitrificación	
Procesos combinados	Filtros percoladores, lodos activados	Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación)
	Lodos activados, filtros percoladores	Idem

PRINCIPALES PROCESOS BIOLÓGICOS UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL			
TIPO	NOMBRE COMÚN	USO*	
PROCESOS ANÓXICOS			
Cultivo en suspensión	Desnitrificación con cultivo en suspensión	Desnitrificación	
Crecimiento fijo	Desnitrificación con cultivo fijo	Idem	
PROCESOS ANAERÓBIOS			
Cultivo en suspensión	Digestión anaerobia	Estabilización, eliminación de la DBO carbonosa	
	Baja carga, una etapa		Idem
	Alta carga, una etapa		Idem
	Doble etapa	Idem	
	Proceso anaerobio de contacto	Eliminación de la DBO carbonosa	
Cultivo fijo	Filtro anaerobio	Eliminación de la DBO carbonosa estabilización (desnitrificación)	
	Lagunas anaerobias (estanques)	Eliminación de la DBO carbonosa (estabilización)	
PROCESOS AERÓBIOS ANÓXICOS O ANAERÓBIOS			
Cultivo en suspensión	Fase única nitrificación-desnitrificación	Eliminación de la DBO carbonosa, nitrificación, desnitrificación	
Crecimiento vinculado	Nitrificación-desnitrificación	Nitrificación, desnitrificación	
Procesos combinados de cultivo fijo	Lagunas facultativas	Eliminación de la DBO carbonosa	
	Lagunas de maduración	Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación)	
	Lagunas anaerobias-facultativas	Eliminación de la DBO carbonosa	
	Lagunas anaerobias-facultativas-aerobias	Idem	

* El uso principal se presenta en primer lugar; entre paréntesis se exponen otros usos.

TABLA II-5

PROCESOS DE TRATAMIENTO AEROBIO DE CULTIVO EN SUSPENSION

Los principales procesos de tratamiento biológico de cultivo en suspensión incluye: 1) Lodos activados, 2) Nitrificación de cultivo en suspensión, 3) Lagunas aireadas, 4) Digestión aerobia y 5) Estanques de estabilización de alta carga.

Lodos activados

El nombre de este proceso tiene su origen en el hecho de que el proceso se basa en la producción de una masa activada de microorganismos capaces de degradar la materia orgánica carbonosa por vía aerobia.

La aplicación de este proceso, comienza con la introducción de el agua residual a tratar en un reactor donde se mantiene el cultivo bacteriano aerobio en suspensión, de manera que éstos comiencen a estabilizar la materia. Denominándole al nuevo contenido del reactor, líquido mezcla. Es necesario el empleo de difusores o aireadores mecánicos tanto para mantener las condiciones aerobias en el reactor, como para mantener el líquido mezcla en régimen completo. Una vez completada la estabilización de la materia, tras un período determinado de tiempo, el agua tratada se conduce a un tanque de sedimentación donde las células se separan del agua residual tratada. Una parte de las células sedimentadas se retorna al reactor para mantener la concentración deseada en el mismo, mientras que la otra parte es purgada del sistema. Lo anterior es necesario, ya que de no ser así, la masa de microorganismos podría aumentar a tal grado de hacer inutilizable el sistema; el nivel al cual debe mantenerse la masa biológica depende de la eficiencia requerida del tratamiento y de la cinética de su crecimiento.

Nitrificación en cultivos en suspensión

Dentro del tratamiento de las aguas residuales, no solo es necesaria la degradación biológica de la materia orgánica carbonosa, sino que a menudo es también deseable estabilizar aquellos compuestos orgánicos que pueden ejercer una demanda de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno). Dentro de éstos compuestos inorgánicos, el mas importante es el amoníaco, ya que su presencia estimula la disminución del oxígeno disuelto a través del proceso biológico de nitrificación. La nitrificación consiste en la oxidación biológica del amoníaco a nitrato, siendo éste último un producto estabilizado ya que constituye el estado de oxidación final de los compuestos de nitrógeno.

En la práctica, el proceso de nitrificación puede llevarse a cabo en el mismo reactor utilizado en el tratamiento de la materia orgánica carbonosa, identificando al proceso como **nitrificación de fase única**, o bien, en un reactor separado conteniendo cultivos en suspensión. Cuando se utiliza una instalación por separado para la nitrificación, ésta incluye, normalmente, un reactor y un tanque de sedimentación.

La oxidación del amoníaco a nitrato puede llevarse a cabo por medio de aire u oxígeno puro.

Lagunas aireadas aerobias

El proceso de lagunas aireadas es, esencialmente, el mismo que el de lodos activados, excepto que el reactor deberá ser un depósito excavado en el terreno. En una laguna aerobia se mantienen en suspensión la totalidad de los sólidos y el aire requerido por el proceso, al igual que en el sistema de lodos activados, es suministrado por aireadores de superficie o mediante difusores.

La microbiología de este proceso, resulta ser similar a la empleada en el proceso de lodos activados.

A pesar de su similitud con el proceso de lodos activados, existen características específicas que marcan su diferencia, una de ellas es que la gran superficie asociada a las lagunas aireadas puede dar lugar a efectos térmicos más pronunciados que aquellos que se encuentran asociados al proceso de lodos activados.

En los sistemas de lagunas aireadas, es posible realizar una nitrificación tanto estacional como continua. El grado de nitrificación, dependerá tanto del diseño y de las condiciones de operación dentro del sistema, como de la temperatura del agua residual.

Digestión aerobia

La digestión aerobia es un proceso utilizado para tratar los lodos orgánicos. Ahora bien, los digestores aerobios pueden emplearse para tratar: a) únicamente lodos activados o lodos provenientes de filtros percoladores; b) mezcla de lodos activados o lodos provenientes de filtros percoladores con lodos primarios; c) lodo biológico en exceso, proveniente de plantas de tratamiento de lodos activados sin sedimentación primaria.

El funcionamiento del proceso, se basa en lo siguiente: al agotarse el suministro del alimento disponible, los microorganismos comienzan a consumir su propio protoplasma para obtener la energía para las reacciones de mantenimiento celular (fase endógena), posteriormente, el tejido celular se oxida por vía aerobia a dióxido de carbono, agua y amoníaco. El amoníaco producido en esta fase, es oxidado para formar nitrato a medida que progresa la digestión.

La finalidad de mezclar lodo activado o lodo proveniente de los filtros percoladores con lodo primario, para su digestión conjunta, es que se produzca tanto la oxidación directa de la materia orgánica del lodo primario como la oxidación endógena del tejido celular.

Estanques de estabilización aerobia

En su forma más simple, los estanques de estabilización aerobia se encuentran formados por grandes depósitos excavados en el terreno de poca profundidad y son utilizados para el tratamiento del agua residual con la utilización, tanto de algas como de bacterias.

En éste proceso, el oxígeno es suministrado por aireación natural de la superficie y por fotosíntesis de las algas. El oxígeno liberado por las algas a través del proceso de fotosíntesis es utilizado por las bacterias en la degradación aerobia de la materia orgánica. Los nutrientes y el dióxido de carbono producto de esta degradación son, a su vez, utilizados por las algas. También existen animales superiores como rotíferos y protozoos, cuya función principal consiste en mejorar el efluente.

PROCESOS AEROBIOS DE TRATAMIENTO DE CULTIVO FIJOS

Filtro percolador

El filtro percolador es un estanque impermeable que contiene un lecho formado por un medio sumamente permeable en el cual se encuentran adheridos los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica y a través del cual se filtra el agua residual. El medio filtrante consiste generalmente en piedras, aunque también pueden utilizarse medios filtrantes plásticos. El lecho del filtro es generalmente circular y el residuo líquido es distribuido sobre el lecho mediante un distribuidor giratorio. La recolección del líquido tratado y los sólidos biológicos que se hayan separado del medio se lleva a cabo mediante un sistema de desagüe en la parte inferior del filtro.

La materia orgánica presente en el agua residual, es adsorbida por la película o capa viscosa, en cuyas capas externas es degradada por los microorganismos aerobios. Cuando los microorganismos crecen, el espesor de la película aumenta, provocando que el oxígeno sea consumido totalmente en las capas superficiales, creándose un ambiente anaerobio cerca de la superficie del medio.

Filtros de pretratamiento

Dentro del tratamiento de las aguas residuales, los filtros de pretratamiento tienen como objetivo de su empleo, el reducir la carga orgánica aplicada a un proceso biológico situado a continuación o para mejorar un proceso de nitrificación posterior.

La actividad biológica en un filtro de pretratamiento es esencialmente la misma que para un filtro percolador. No obstante, existirán algunas diferencias a causa del efecto de arrastre más fuerte, resultado de los mayores caudales hidráulicos aplicados a estas unidades.

La materia orgánica que no es rápidamente biodegradable se ve escasamente afectada por este sistema, dado el relativo corto tiempo de retención hidráulica característico de este sistema.

Sistemas biológicos rotativos de contacto (biodiscos)

Un sistema biológico rotativo de contacto consiste en una serie de discos circulares concéntricos de poliestireno o cloruro de polivinilo separados unos de otros a muy corta distancia; los cuales se encuentran parcialmente en el seno de la misma.

La descripción del proceso es la siguiente: los crecimientos biológicos se adhieren a las superficies de los discos formando una película biológica que se le denomina biomasa. La rotación de los discos pone alternativamente en contacto la biomasa con la materia orgánica presente en el agua residual y con la atmósfera para la adsorción del oxígeno. La rotación es así mismo, el mecanismo de eliminación del exceso de sólidos adheridos a los discos por medio de las fuerzas cortantes que crea y mantiene la materia en suspensión, de manera que ésta pueda ser transportada al tanque clarificador.

Los biodiscos suelen utilizarse como proceso de tratamiento secundario, aunque también pueden emplearse para obtener una nitrificación estacional o continua.

Reactores de lecho compacto

Un reactor de lecho compacto consiste en un tanque (reactor) en el cual existe un medio al cual se adhieren los microorganismos responsables del proceso. El agua a tratar, así como el aire u oxígeno puro se introducen y distribuyen por la parte inferior del tanque.

Este tipo de reactores puede ser utilizado tanto para la eliminación de la materia orgánica carbonosa como para el proceso de nitrificación.

PROCESOS ANOXICOS DE CULTIVOS EN SUSPENSION Y FIJOS

Se conoce con el nombre de desnitrificación al proceso de eliminación del nitrógeno en forma de nitrato por medio de su conversión a gas nitrógeno. El proceso de nitrificación puede realizarse de forma biológica bajo condiciones anóxicas (en ausencia de oxígeno). El término de condiciones anóxicas surge, porque las principales reacciones bioquímicas que tienen lugar no son aerobias, sino más bien una modificación de las aerobias.

Los principales procesos anóxicos de desnitrificación se clasifican en proceso de cultivo en suspensión y de cultivo fijo.

Desnitrificación con cultivos en suspensión

El proceso de desnitrificación con cultivos en suspensión, se lleva a cabo, necesariamente a continuación de cualquier proceso de conversión del amoníaco y nitrógeno orgánico en nitrato (nitrificación).

Las bacterias incluidas en éste proceso obtienen energía para su crecimiento a partir de la conversión del nitrato en gas nitrógeno. Debido a que los efluentes nitrificados poseen un bajo contenido de materia carbonosa, es necesaria una fuente externa de carbono, de las cuales, las empleadas mas comúnmente son el metanol y algunos residuos industriales de bajo contenido en nutrientes.

Es recomendable que este proceso conste de tres unidades, cuyas funciones son las siguientes:

- a) En la primera, se lleva a cabo la desnitrificación,
- b) en esta segunda unidad, debe eliminarse el gas nitrógeno producido en la reacción de la etapa anterior, ya que de lo contrario, éste entorpece el proceso de sedimentación del líquido mezcla. Además, en ésta segunda unidad puede eliminarse la DBO residual inducida por el metanol.
- c) esta tercera unidad se encuentra formada por un clarificador, en el cual se lleva a cabo la sedimentación del efluente tratado.

Desnitrificación en capa fija

Este proceso se lleva a cabo en un reactor vertical de columna, el cual contiene piedras u otros medios sintéticos en los cuales se encuentran adheridas las bacterias. Dependiendo del tamaño del medio, este proceso puede necesitar o no un proceso de clarificación posterior.

Al igual que en el proceso de cultivo en suspensión, generalmente se necesita una fuente externa de carbono.

PROCESOS ANAEROBIOS DE TRATAMIENTO DE CULTIVOS EN SUSPENSION

Digestión anaerobia

Las principales aplicaciones de este proceso han sido y siguen siendo en la actualidad la estabilización de los lodos provenientes del tratamiento del agua residual y de ciertos residuos industriales. Sin embargo, se ha demostrado recientemente que los residuos orgánicos diluidos pueden también ser tratados anaeróbicamente.

Este proceso se lleva a cabo dentro de un reactor completamente cerrado, dentro del cual la materia orgánica contenida en la mezcla de lodos primarios y biológicos se convierten biológicamente, bajo condiciones anaerobias, en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). El lodo estabilizado que resulta del proceso no es putrescible y posee un bajo contenido de organismos patógenos.

En la actualidad se poseen dos tipos de digestores, de baja y alta carga. En el proceso de baja carga, el contenido del digestor no se calienta ni se mezcla y los tiempos de retención

van de 30-60 días. En un proceso de alta carga, el contenido del digestor se calienta y se mezcla completamente, y los tiempos de retención son menores o iguales a 15 días.

Proceso anaerobio de contacto

Se ha descubierto que algunos residuos industriales de alto contenido de DBO pueden ser estabilizados de forma muy efectiva, por medio del tratamiento anaerobio.

En el proceso anaerobio de contacto, se utiliza un reactor sellado para impedir la entrada de aire, al cual se introducen mezclados los residuos a tratar con los sólidos del lodo recirculado para ser digeridos. Una vez completada la digestión, el contenido del reactor se mezcla completamente, separándose posteriormente el residuo digerido en un clarificador o unidad de flotación al vacío, para ser conducido posteriormente a otro tratamiento posterior. El lodo anaerobio sedimentado es retornado al reactor para servir de siembra al agua residual entrante.

Dada la baja tasa de síntesis de los microorganismos anaerobios, el exceso de lodo a evacuar resulta mínimo.

PROCESOS ANAEROBIOS DE TRATAMIENTO DE CULTIVO FIJO

Filtro anaerobio

Este proceso es utilizado tanto para el tratamiento de residuos tanto domésticos como industriales; resultando ideal para el tratamiento de residuos de baja concentración a temperatura ambiente.

El filtro anaerobio es una innovación reciente que consiste en una columna rellena de diversos tipos de medio sólidos. El agua a tratar fluye a través de la columna en sentido ascendente, entrando en contacto con el medio sobre el que se desarrollan y fijan las bacterias anaerobias, las cuales no resultan ser arrastradas por el flujo de agua.

Estanques anaerobios

Este proceso es utilizado para el tratamiento de aguas residuales de alto contenido orgánico y con una alta concentración de sólidos.

Un estanque anaerobio, generalmente está constituido por un estanque profundo excavado en el terreno, dotado sistemas de conducciones tanto de entrada como de salida de flujo.

Generalmente, estos estanques son anaerobios en toda su profundidad excepto en una estrecha zona de la superficie. La estabilización del residuo se consigue por un proceso combinado de precipitación y de conversión anaerobia de los residuos orgánicos en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) y otros productos gaseosos finales así como ácidos orgánicos

y tejidos celulares. Los residuos a tratar en el estanque, sedimentan en el fondo del mismo y el efluente parcialmente clarificado es extraído para otro proceso posterior de tratamiento.

Por medio del uso de estos estanques es posible conseguir eficiencias de eliminación de DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días) entre 70 y 85 %.

COMBINACION DE PROCESOS DE TRATAMIENTO AEROBIOS, ANOXICOS O ANAEROBIOS

Estanques facultativos

Se denominan estanques facultativos, aquellos donde se lleva a cabo la estabilización de la materia orgánica bajo la acción de bacterias aerobias anaerobias y facultativas.

Un estanque facultativo está formado por tres zonas: 1) una zona superficial donde existen bacterias anaerobias y algas en relación simbiótica; 2) una zona intermedia parcialmente aerobia y anaerobia, donde se lleva a cabo la descomposición de los residuos orgánicos a cargo de bacterias facultativas; 3) una zona inferior anaerobia en la que los sólidos acumulados se descomponen activamente por efecto de las bacterias anaerobias.

En la práctica, las condiciones aerobias se mantienen por la presencia de algas o por el uso de aireadores de superficie.

Estanques de maduración o terciarios

Este tipo de estanques están diseñados para mejorar la calidad de los efluentes secundarios y para la nitrificación estacional. Su funcionamiento se basa en la respiración endógena de los sólidos biológicos residuales y la conversión del amoníaco en nitrato mediante el uso del oxígeno suministrado a partir de la aireación superficial y de las algas. Para mantenerse las condiciones aerobias, la carga orgánica a que trabajen los estanques debe ser muy baja.

II.2 TRATAMIENTO Y DISPOSICION DEL LODO

II.2.1 TRATAMIENTO DEL LODO

El proceso completo de tratamiento de las aguas residuales, debe abarcar tanto del tratamiento de la fase líquida del agua, como el de los residuos sólidos subproducto de dichos procesos, los cuales incluyen arenas, basuras y lodo. Sin embargo el lodo representa el sólido de mayor volumen y su tratamiento y disposición es, quizás, el problema más complejo del tratamiento de las aguas residuales. El lodo tiene forma líquida o líquida semisólida, cuyo contenido de sólidos varía del 0.25 al 12 %.

Los principales métodos utilizados en la actualidad para el tratamiento y disposición de los lodos se encuentran plasmados en la tabla II-6¹⁰.

Los procesos de espesamiento (concentración), el acondicionamiento, la deshidratación y el secado, tienen como finalidad el eliminar la humedad del lodo; mientras que la digestión, la incineración y la oxidación por vía húmeda se utilizan primordialmente para eliminar la materia orgánica presente en el lodo.

Procedencia del lodo

Dentro de una planta de tratamiento, el lodo podrá ser originado por distintos procesos, dependiendo del tipo de planta de que se trate y de los procesos involucrados en el tren de tratamiento, así se tienen en la tabla II-7¹¹, los principales procesos productores de lodos, así como el tipo de lodo que producen.

¹⁰ METCALF-EDDY. Op.cit. (pág. 629)

¹¹ METCALF-EDDY. Op. cit.(pag. 631)

MÉTODOS DE TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LODOS	
OPERACION UNITARIA, PROCESO UNITARIO, O MÉTODO DE TRATAMIENTO	FUNCIÓN
OPERACIONES DE PRETRATAMIENTO	
Trituración	Reducción de tamaño
Desarenado	Eliminación de arenas
Mezclado	Mezclado
Almacenamiento	Almacenamiento
ESPESAMIENTO	
Por gravedad	Reducción de volumen
Por flotación	Idem
Por centrifugación	Idem
ESTABILIZACIÓN	
Oxidación con cloro	Estabilización
Estabilización con cal	Idem
Tratamiento térmico	Idem
Digestión anaerobia	Estabilización, reducción de masa
Digestión aerobia	Idem
ACONDICIONAMIENTO	
Acondicionamiento químico	Acondicionamiento del lodo
Nutrición	Lixiviación
Tratamiento cabeza	Acondicionamiento del lodo
DESINFECCIÓN	
Desinfección	Desinfección
DESHIDRATACIÓN	
Filtro de vacío	Reducción de volumen
Filtro prensa	Idem
Filtro de banda horizontal	Idem
Centrífuga	Idem
Era de secado	Idem
Laguna	Almacenamiento, reducción de volumen

METODOS DE TRATAMIENTO Y DISPOSICION DE LODOS	
OPERACION UNITARIA, PROCESO UNITARIO, O METODO DE TRATAMIENTO	FUNCION
SECADO	
Instantáneo	Reducción de peso, reducción de volumen
Por pulverización	Idem
En horno rotativo	Idem
En horno de pisos múltiples	Idem
COMPOSTAJE	
Compostaje (solo lodo)	Recuperación de productos, reducción de volumen
Compostaje combinado con residuos sólidos	Idem
REDUCCION TERMICA	
Horno de pisos múltiples	Reducción de volumen, recuperación de calor
Horno de lecho fluidificado	Reducción de volumen
Combustión instantánea	Idem
Coíncineración con residuos sólidos	Idem
Copirólisis con residuos sólidos	Reducción de volumen, recuperación de calor
Oxidación por vía húmeda	Reducción de volumen
DISPOSICION	
A vertedero	Evacuación final
Aplicación al terreno	Idem
Regeneración de tierras	Evacuación final, regeneración del terreno
Reutilización	Evacuación final, recuperación de recursos

TABLA II-6

ORIGEN DE LOS SÓLIDOS Y LODO DENTRO DE LAS INSTALACIONES DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO		
OPERACION O PROCESO UNITARIO	TIPO DE SÓLIDOS O LODO	OBSERVACIONES
DEBASTE	Sólidos gruesos	A menudo los sólidos gruesos se trituran y se retornan al agua residual para su eliminación en las instalaciones de tratamiento siguientes.
DESARENADO	Arenas y espumas	A menudo no se incluyen instalaciones de eliminación de espumas en las de eliminación de arenas.
PREAIREACION	Espumas	En algunas plantas, no se incluyen instalaciones de eliminación de espuma en los tanques de aireación.
DECANTACION PRIMARIA	Lodo primario y espumas completa	Las cantidades tanto de lodo como de espumas dependen del tipo de red de alcantarillado y de si los vertidos industriales se descargan en la misma.
TANQUES DE AIREACION	Sólidos suspendidos	Los sólidos suspendidos se producen por conversión de la DBO. Si la purga se realiza desde el tanque de aireación, se utilizan generalmente el espesamiento por flotación para espesar el lodo activado en exceso.
SEDIMENTACION SECUNDARIA	Lodo secundario y espumas	En la actualidad, es obligatorio la instalación de un sistema de eliminación de espumas en los tanques de sedimentación secundaria.
INSTALACIONES DE TRATAMIENTO DE LODOS	Lodos y cenizas	Las características y contenido de humedad del lodo y de las cenizas dependen de las operaciones y procesos unitarios

TABLA II-7

Los principales procedentes de sólidos y lodos, así como los tipos generados se resumen en la tabla II-8¹².

¹² METCALF-EDDY. Op. cit. (págs. 636, 637)

CARACTERISTICAS DEL LODO PRODUCIDO DURANTE EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL	
SOLIDOS O LODO	DESCRIPCION
Residuos del desbaste	Incluyen todo tipo de materiales orgánicos e inorgánicos de tamaño suficientemente grande para ser eliminados por rejas de barras. El contenido de materia orgánica varía dependiendo de la naturaleza del sistema y la estación del año.
Arena	Las arenas están constituidas, normalmente por los sólidos inorgánicos más pesados que sedimentan con velocidades relativamente altas. Dependiendo de las velocidades de funcionamiento, la arena puede también contener cantidades significativas de materia orgánica, específicamente grasas.
Espumas	La espuma está formada por los materiales flotantes recogidos en la superficie de los tanques de sedimentación primarios y secundarios....
Lodo primario	El lodo de los tanques de decantación primaria es generalmente gris y, en la mayoría de los casos, produce un olor extremadamente molesto. Puede digerirse fácilmente si se adoptan condiciones adecuadas de funcionamiento.
Lodo de precipitación química	El lodo procedente de los tanques de precipitación química es generalmente de color oscuro, aunque su superficie puede ser roja si contiene mucho hierro. Su olor puede ser molesto, pero no tanto como el del lodo de decantación primaria. Aunque es algo grasiento, los hidratos de hierro o aluminio contenidos en él lo hacen gelatinoso. Si se deja suficiente tiempo en el tanque, se produce su descomposición como en el caso del lodo de decantación primaria, pero a una velocidad menor. Produce gas en cantidades sustanciales y su densidad aumenta con el tiempo.
Lodo activo	El lodo activo tiene generalmente una apariencia flocluenta de color marrón. Si el color es muy oscuro puede estar próximo a volverse séptico. Si el color es más claro de lo normal puede estar aireado insuficientemente y los sólidos tienen tendencia a sedimentar lentamente. El lodo en buenas condiciones tiene un olor no molesto característico. Tiende a convertirse en séptico con bastante rapidez y luego adquiere un olor desagradable de putrefacción. Se digiere fácilmente solo o mezclado con lodos primario frescos.
Lodo de filtros percoladores	El humus de los filtros percoladores es pardusco flocluento y relativamente inodoro cuando está fresco. Experimenta generalmente la descomposición más lentamente que otros lodos crudos pero cuando contiene muchos gusanos puede convertirse rápidamente en molesto. Se digiere fácilmente.

CARACTERISTICAS DEL LODO PRODUCIDO DURANTE EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL	
SOLIDOS O LODO	DESCRIPCION
Lodo digerido (aerobio)	El lodo digerido por vía aerobia es de color marrón oscuro y tiene apariencia floculenta. El olor de este tipo de lodo no es molesto. El lodo aerobio bien digerido se deshidrata fácilmente, y los sólidos secos resultantes son inodoros.
Lodo digerido (anaerobio)	El lodo digerido por vía anaerobia es de color marrón oscuro-negro y contiene una cantidad excepcionalmente grande de gas. Cuando está totalmente digerido, no es molesto, siendo su olor relativamente débil y parecido al alquitrán caliente, goma quemada o lacre. Cuando se dispone a eras de secado en capas de poco espesor, los sólidos no transportados en primer lugar a la superficie por la acción de los gases que contiene dejando en la parte inferior una lámina de agua relativamente clara, que se drena rápidamente y permite que los sólidos sedimenten lentamente sobre el lecho. A medida que progresa el secado, los gases escapan dejando una superficie muy agrietada con un olor que recuerda el compost de jardín.
Residuos de fosas sépticas	El lodo de las fosas sépticas es negro. A menos que esté bien digerido como consecuencia de un largo tiempo de almacenamiento, es molesto a causa del sulfuro de hidrógeno y de otros gases que desprende. El lodo puede sacarse sobre eras de secado si se extiende en capas de poco espesor, pero cabe esperar olores desagradables mientras se drena a menos que haya sido bien digerido.

TABLA II-8

Características del lodo

Las características del lodo son variables, dependiendo del origen de los sólidos contenidos, del tiempo transcurrido desde su producción y del tipo de proceso que les dió origen.

En la tabla II-9⁹ se presentan algunos datos típicos de la composición química de los lodos tanto crudos como digeridos. Las características químicas de los lodos, son útiles para elegir la alternativa adecuada para su disposición y para efecto de la eliminación de el agua contenida en el mismo. La medida de su pH de la alcalinidad y del contenido de ácidos orgánicos, es importante para el control de el proceso de digestión anaerobia. El poder calorífico del lodo es importante cuando se proyecte utilizar la incineración o algún proceso para su combustión.

⁹ METCALF-EDDY. Op. cit. (pág. 638)

COMPOSICION QUIMICA TIPICA DEL LODO CRUDO Y DIGERIDO				
CARACTERISTICAS	LODO PRIMARIO CRUDO		LODO DIGERIDO	
	INTERVALO	VALOR TIPICO	INTERVALO	VALOR TIPICO
Sólidos secos totales (ST), %	2-8	5	6-12	10
Sólidos volátiles (% de ST)	60-80	65	30-60	40
Grasas y aceites (solubles en éter, % de ST)	6-30	-	5-20	-
Proteínas (% en ST)	20-30	25	15-20	18
Nitrógeno (N, % de ST)	1.5-6	4	1.6-6	4
Fósforo (P₂O₅, % de ST)	0.8-3	2	1.5-4	2.5
Potasio (K₂O, % de ST)	0-1	0.4	0-3	1
Celulosa (% de ST)	8-15	10	8-15	10
Hierro (no como sulfuro)	2-4	2.5	3-8	4
Silice (SiO₂, % de ST)	15-20	-	10-20	-
pH	5-8	6	6.5-7.5	7
Alcalinidad (mg/l como CaCO₃)	500-1500	600	2500-3500	3000
Acidos orgánicos (mg/l como HAc)	200-2000	500	100-600	200
Poder calorífico (MJ/kg)	14-23	16.5 ^a	6-14	9 ^b

^a Basado en el 65% de materia volátil. ^b Basado en el 40% de materia volátil.

TABLA II-9

OPERACIONES DE PRETRATAMIENTO

La dilaceración, desarenado, mezclado y almacenamiento de lodo, son procesos necesarios para garantizar una alimentación constante y homogénea de lodo a las instalaciones de tratamiento. El mezclado y almacenamiento del lodo pueden llevarse a cabo en una unidad única o en unidades separadas.

Dilaceración del lodo

La dilaceración dentro del tratamiento de los lodos consiste en la trituración o desmenuzamiento de los sólidos grandes a fin de reducir su tamaño. Algunos de los procesos que deben ir precedidos de diceladores, así como los objetivos de la dilaceración se muestran en la tabla II-10¹⁰.

La dilaceración dentro del tratamiento de los lodos se puede lograr por medio de dos técnicas: pulverización con molinos de martillos o corte.

PROCESOS QUE REQUIEREN LA TRITURACIÓN PREVIA DEL LODO	
PROCESO	OBJETO DE LA TRITURACIÓN
Tratamiento térmico	Para prevenir la obturación de las bombas de alta presión y los intercambiadores de calor
Centrífugas del tipo de disco y de camisa maciza	Para prevenir la obturación de las toberas y entre los discos. Las unidades de discos puede requerir también tamices de malla fina
Oxidación con cloro	Para mejorar el contacto del cloro con las partículas de lodo
Bombeo con bombas de cavidad progresiva	Para prevenir la obturación y reducir el calor

TABLA II-10

Desarenado del lodo

El proceso de desarenado de lodos es utilizado cuando dentro del tren de tratamiento de las aguas residuales no se hayan incluido instalaciones para la eliminación de arenas antes de los tanques de sedimentación primaria, o cuando las cantidades de arena sean muy grandes.

El método más efectivo para el desarenado del lodo consiste en la aplicación de fuerzas centrífugas para conseguir la separación de las partículas de arena del lodo orgánico. Dicha separación puede lograrse por el empleo de hidrociclones que carecen de partes móviles. El funcionamiento de dichos hidrociclones es el siguiente:

¹⁰ METCALF-EDDY. Op. cit. (pág. 653)

- 1) El lodo se aplica tangencialmente a una zona de alimentación cilíndrica, impartándole, en consecuencia, una fuerza centrífuga.
- 2) Las partículas más pesadas de arena se desplazan hacia el exterior de la zona cilíndrica, donde son recogidas.
- 3) El lodo orgánico ya separado es extraído por una salida independiente a la de las arenas.

Para obtener una separación efectiva de la arena, el lodo debe diluirse, ya que el tamaño de las partículas que pueden eliminarse es inversamente proporcional a la concentración del lodo.

Mezclado del lodo

El mezclado es una operación muy importante dentro del tratamiento de los lodos, la cual se aplica para mezclar lodos de distintos orígenes, a fin de obtener una mezcla uniforme de alimentación a los procesos de tratamiento que así lo requieran.

CONCENTRACION (ESPESADO)

El espesado de lodos es un procedimiento cuya finalidad es la concentración de la fracción sólida del lodo por la eliminación de parte de la fracción líquida. Este proceso se consigue generalmente por medio físicos tales como gravedad, flotación y centrifugación.

Dentro de las plantas de tratamiento, este proceso se lleva a cabo en los decantadores primarios, en las instalaciones de digestión de lodos o en unidades independientes proyectadas para tal fin.

La reducción del volumen de los lodos, es beneficiosa para los procesos de tratamiento subsiguientes, ya que presenta las siguientes ventajas: 1) reducción de capacidad necesaria de los tanques y equipos para su tratamiento; 2) reducción de la cantidad de productos químicos necesarios para el acondicionamiento del lodo y 3) reducción de calor y cantidad de combustible requerido para los procesos de digestión y secado térmico o incineración.

ESTABILIZACION: PROCESOS QUIMICOS Y TERMICOS

El objetivo que busca la estabilización de los lodos, consiste en la estabilización de la fracción volátil u orgánica del lodo, ya que, la supervivencia de los patógenos, la formación de malos olores y la putrefacción del lodo se suscitan cuando se permite el desarrollo de los microorganismos sobre la fracción orgánica del lodo. Hay cuatro medios de estabilización para reducir los efectos perjudiciales mencionados anteriormente: 1) la reducción biológica del contenido volátil, 2) la oxidación química de la materia volátil, 3) la adición de productos químicos al lodo para hacerlo inadecuado para la supervivencia de los microorganismos y 4) la desinfección o esterilización del lodo por medio de la aplicación de calor.

Las tecnologías disponibles para la estabilización del lodo son: 1) la oxidación con cloro, 2) la estabilización con cal, 3) el tratamiento térmico, 4) la digestión anaerobia y 5) la digestión aerobia.

Oxidación con cloro

La oxidación del lodo con cloro, consiste en la oxidación química del lodo mediante la aplicación de dosis elevadas de gas cloro.

Este proceso se lleva a cabo en un reactor cerrado donde después de introducir el lodo a tratar, se añade el gas cloro durante un corto período de tiempo. El proceso debe ir seguido por la deshidratación.

La mayoría de unidades de oxidación con cloro son de diseño modular prefabricadas, constituyendo unidades completas fácilmente transportables.

Como resultado de la reacción del gas cloro con el lodo, se forma una gran cantidad de ácido clorhídrico, el cual puede producir la solubilización de metales pesados. En consecuencia, los sobrenadantes y el filtrado de los lodos oxidados con cloro, pueden contener una alta concentración de metales pesados, asimismo, altas concentraciones de cloraminas.

El proceso puede utilizarse para el tratamiento de cualquier lodo biológico, para residuos de fosas sépticas y como medio auxiliar de estabilización suplementaria de instalaciones de estabilización sobrecargadas.

Estabilización con cal

Este proceso se basa en la adición de cal en cantidades suficientes al lodo crudo, de manera de elevar su pH a un valor mayor o igual a 12 o mayor, lo cual provoca un medio no adecuado para la supervivencia de los microorganismos. En consecuencia, el lodo no sufrirá putrefacción, ni desprenderá olores y no constituirá un peligro sanitario en tanto que el pH se mantenga a ese nivel. Dado que la estabilización con cal no destruye la materia orgánica necesaria para el crecimiento bacteriano, el lodo debe disponerse antes de que el pH sufra una disminución considerable, en cuyo caso puede activarse la reproducción bacteriana y comenzar la putrefacción.

Tratamiento térmico

El tratamiento térmico se basa en el calentamiento del lodo a temperaturas superiores a 260°C en un depósito a presión, con presiones por encima de 2.75 MN/m², durante un corto tiempo. Cuando el lodo se somete a altas temperaturas y presiones, la actividad térmica libera el agua ligada a los sólidos, provocándose la coagulación de los mismos. Además, se produce la hidrólisis de los materiales protéicos, provocando la destrucción de las células, liberándose compuestos orgánicos solubles y nitrógeno en forma de amoníaco.

Este proceso es utilizado tanto para el proceso de estabilización como el de acondicionamiento, ya que favorece la deshidratación de los sólidos sin la necesidad de utilizar productos químicos.

ESTABILIZACION: PROCESO DE DIGESTION ANAEROBIA DEL LODO

El proceso de digestión aerobia ya fue expuesto con anterioridad dentro de el apartado de procesos anaerobios de tratamiento de cultivos en suspensión, correspondiente al tratamiento convencional de las aguas residuales. Los métodos utilizados para la digestión anaerobia de los lodos son los siguientes:

Digestión convencional

La digestión convencional del lodo se lleva a cabo mediante un proceso de digestión de una sola fase y se basa en la digestión, el espesamiento del lodo y la formación de sobrenadante en forma simultanea.

Digestión de alta carga

Este proceso difiere del convencional de una sola fase, en que la carga de sólidos que maneja es mucho mayor y se tiene un mejor mezclado del lodo.

Digestión de dos fases

En este proceso, la primera fase está formada por un primer tanque donde se lleva a cabo la digestión del lodo. La segunda fase consta de un segundo tanque que se utiliza para el almacenamiento y concentración del lodo digerido, así como para la formación de una capa de sobrenadante relativamente clarificada.

ESTABILIZACION: PROCESOS DE DIGESTION AEROBIA DEL LODO

La digestión aerobia constituye otro método de estabilización de lodos orgánicos. Los digestores aerobios son utilizados para tratar lodo activado en exceso, mezcla de lodo activado o de lodos provenientes de filtros percoladores con lodos primarios o lodo activado en exceso procedente del proceso de lodos activados sin sedimentación primaria.

Las ventajas de la digestión aerobia sobre la anaerobia son: 1) una reducción de sólidos volátiles comparables a la obtenida por vía anaerobia; 2) menores concentraciones de DBO en el líquido sobrenadantes; 3) formación de un producto final inodoro, biológicamente estable y que puede ser fácilmente eliminado; 4) producción de un lodo con excelentes características de deshidratación; 5) recuperación de los valores fertilizantes básicos del lodo; 6) menores problemas de funcionamiento; 7) menores costes asociados. Sin embargo, existen también

inconvenientes en la aplicación de dicho proceso, tales como el elevado coste asociado al suministro del oxígeno y en que un subproducto útil, como el metano, no pueda ser recuperado.

El funcionamiento del proceso se expuso con anterioridad en el apartado de procesos de tratamiento aerobio de cultivos en suspensión, dentro de los tratamientos convencionales del agua residual.

ACONDICIONAMIENTO

Dentro del tratamiento de los lodos, el acondicionamiento es un proceso que se utiliza con la finalidad de mejorar su características para su deshidratación posterior. El acondicionamiento suele lograrse mas frecuentemente por medio de dos métodos que se basan en la adición de productos químicos y el tratamiento térmico.

Acondicionamiento químico

En este procesos, el acondicionamiento del lodo se logra con la adición de productos químicos, lo cual da como resultado la coagulación de los sólidos y la liberación del agua absorbida. Los productos químicos empleados pueden ser cloruro férrico, cal, sulfuro de alúmina o polímeros orgánicos. Dentro del tren de tratamiento de los lodos, este proceso se usa antes de el proceso de filtración al vacío y de la centrifugación. Este proceso resulta económico por sus altos rendimientos y su flexibilidad.

Elutriación

La elutriación consiste en mezclar un sólido o mezcla de un sólido y un líquido, con otro fluido, con lo que se busca transferir ciertos componentes al fluido.

Este proceso es utilizado para lixiviar del lodo digerido diversos compuestos químicos, que de no ser así, dificultarían o encarecerían el tratamiento posterior del lodo.

La operación usual de lixiviación, consta de dos etapas: 1) una buena mezcla del sólido o de la mezcla sólido-líquido con el fluido de lavado, y 2) la separación del fluido de lavado.

Este proceso ha caído en desuso, debido a que los sólidos finamente divididos resultantes del lavado del lodo no pueden ser completamente eliminados en las instalaciones de tratamiento del agua residual a las que son retornados.

Tratamiento térmico

Como se mencionó con anterioridad, este proceso se basa en el acondicionamiento del lodo por su calentamiento durante períodos cortos de tiempo a altas temperaturas y bajo presión.

El proceso de tratamiento térmico tiene mayor aplicación a los lodos biológicos difíciles de estabilizar o acondicionar por otros medios. Los altos costes asociados a la inversión del equipo utilizado limitan, generalmente su uso a grandes plantas.

Otros procesos

Existen otros procesos tales como la **congelación** y la **irradiación** que han arrojado buenos resultados en el acondicionamiento del lodo. Ambos procesos han mostrado efectividad para mejorar la filtrabilidad del lodo, solo que la irradiación no resulta ser una opción económicamente competitiva.

DESINFECCION

Debido a que el lodo ha estado adquiriendo gran importancia debido al uso potencial de la materia, se requiere la desinfección del mismo para evitar problemas de salud pública.

Existen varios métodos para destruir los organismos patógenos presentes en los lodos líquidos y deshidratados. A continuación se señalan aquellos métodos de desinfección con los que se puede obtener una mayor eficiencia en la reducción de organismos patógenos que la obtenida por algún método de estabilización:

- 1) Pasteurización durante 30 minutos a 70°C.
- 2) Tratamiento a pH elevado, normalmente con cal a un pH por encima de 12 durante 3 horas.
- 3) Almacenamiento a largo plazo del líquido digerido (60 días a 20°C o 120 días a 4°C).
- 4) Compostaje completo a temperaturas superiores a 55°C y curado por almacenamiento en montones durante un mínimo de 30 días.
- 5) Adición de cloro para estabilizar y desinfectar el lodo.
- 6) Desinfección con otros productos químicos.
- 7) Desinfección por radiación de alta energía.

Algunos procesos de estabilización producen asimismo la desinfección. Estos procesos son: la oxidación con cloro, la estabilización con cal, el tratamiento térmico y la digestión aerobia termófila.

Los procesos de digestión aerobia y anaerobia, únicamente reducen el número de organismos patógenos, a excepción de la digestión aerobia, la cual si desinfecta el lodo. Los mejores sistemas de desinfección de los lodos líquidos por vía aerobia y anaerobia, son la pasteurización y el almacenamiento a largo plazo. Los procesos de almacenamiento a largo plazo y el compostaje resultan ser los medios más efectivos de desinfección de los lodos digeridos deshidratados aerobios y anaerobios.

Pasteurización

La pasteurización es un proceso utilizado para desinfectar los lodos.

Los dos métodos comúnmente utilizados para la pasteurización de lodos líquidos son: 1) la inyección directa de vapor y 2) el intercambio directo de calor.

La pasteurización, en plantas pequeñas puede realizarse por inyección directa de vapor directamente en los camiones de transporte del lodo al lugar de disposición.

Almacenamiento a largo plazo

En este proceso, el lodo líquido digerido es almacenado generalmente en lagunas excavadas previamente en el terreno.

DESHIDRATACION

La deshidratación dentro del tratamiento de los lodos es una operación física (mecánica) unitaria que consiste en la reducción de el contenido de humedad del lodo.

Algunas de las conveniencias de deshidratación del lodo son:

- 1) Para reducir los costes de transporte al reducir su volumen.
- 2) El lodo deshidratado es, generalmente, más fácil de manipular que el lodo espesado o líquido.
- 3) La deshidratación del lodo es necesaria antes de su incineración, con la finalidad de incrementar su poder calorífico al eliminar el exceso de humedad.
- 4) En algunos casos, para lograr que el lodo sea totalmente inodoro e imputrescible.
- 5) Cuando se pretende disponer el lodo en vertederos controlados, la deshidratación se precisa para reducir la producción de lixiviados en la zona del vertedero.

Los dispositivos de deshidratación se basan en varias técnicas; algunos dependen de los procesos de evaporación y filtración naturales, mientras que los aparatos de deshidratación mecánica utilizan medios físicos asistidos mecánicamente.

Entre los procesos de deshidratación se tienen: los filtros de vacío, las centrifugas, los filtros prensa, los filtros de banda horizontales, los lechos de secado y las lagunas.

SECADO TERMICO

El secado del lodo es una operación consistente en la reducción del contenido de agua por vaporización de ésta. El objeto del secado térmico es el de extraer la humedad del lodo,

de modo que pueda incinerarse o bien procesarse para su utilización posterior. El secado es necesario en la fabricación de fertilizantes para poder triturar el lodo, reducir su peso y evitar la continuación de la actividad biológica. El contenido de humedad del lodo seco es inferior al 10%.

COMPOSTAJE

Es el proceso mediante el cual la materia orgánica presente en el lodo es degradada biológicamente hasta formar un producto final estable, sin problemas de carácter sanitario, exento de olores y de características similares al humus. Dado que el lodo se procesa, generalmente en un intervalo de temperaturas termófilas, el producto final resulta también pasteurizado, además del 20 al 30 % de los sólidos volátiles se convierte en dióxido de carbono y agua. El compost formada a partir del lodo puede utilizarse como acondicionador del suelo.

El proceso de formación de compost consta de tres etapas básicas:

1) Preparación de los residuos a tratar. Dentro de esta etapa se hace la recepción, clasificación, separación, reducción de tamaños, adición de humedad y nutrientes.

2) Descomposición de los residuos preparados. Para esta etapa se han desarrollado varias técnicas. En el compostaje por apilado, los residuos preparados son acumulados formando montones dipuestos en un campo abierto. Como alternativa al compostaje por apilado, se han desarrollado varios sistemas mecánicos, dentro de los cuales se incluye el proceso de pilas aireadas. Una vez formado el compost, éste es extraído, tamizado y curado.

3) Preparación y comercialización del producto. Esta etapa incluye la trituración fina, mezclado con diversos aditivos, granulado, introducción en sacos, almacenamiento, transporte y comercialización.

REDUCCION TERMICA

El objetivo principal de la reducción térmica consiste en la reducción de la cantidad de materiales sólidos a desechar. La reducción térmica de los lodos puede llevarse a cabo por dos métodos:

1) Por medio de la incineración y oxidación por vía húmeda se lleva a cabo la transformación total o parcial de los sólidos orgánicos en productos finales oxidados, tales como dióxido de carbono y agua.

2) Por medio de pirólisis, se produce la volatilización y oxidación parcial de los sólidos orgánicos a productos finales con poder calorífico.

Los lodos procesados por reducción térmica, son normalmente lodos crudos deshidratados. Los métodos mas comúnmente utilizados en este proceso incluyen la incineración en hornos de pisos múltiples, la incineración en lecho fluidificado, la combustión instantánea, la incineración conjunta, la pirólisis conjunta, la oxidación por vía húmeda y la recalcinación.

II.2.2 DISPOSICION DE LOS LODOS Y SOLIDOS RESIDUALES

La disposición del lodo y sólidos procedentes de las instalaciones de tratamiento pueden llevarse a cabo de tres maneras:

- 1) Disposición al terreno;
- 2) Disposición al mar;
- 3) Reutilización del lodo. Uno de los usos más extendido es como acondicionador o fertilizador del suelo.

A continuación se expondrán las alternativas más comunes de disposición al terreno.

Aplicación al terreno

Consiste en la extensión del lodo deshidratado sobre las tierras de labranza, procediendo con la movilización de la tierra una vez que haya secado con la finalidad de su completa incorporación al terreno. El humus contenido en el lodo acondiciona la tierra y mejora su capacidad de retención de la humedad. El lodo deshidratado húmedo puede incorporarse directamente al terreno por inyección.

Lagunas

Este método se basa en el depósito del lodo crudo o digerido en un estanque de tierra construido para tal fin. Las lagunas de lodos digeridos no presentan problema alguno, sin embargo aquellas que trabajan con lodos crudos debido a que en ellas se da la descomposición anaerobia y aerobia, se producen malos olores. Los sólidos estabilizados se sedimentan en el fondo de la laguna donde se acumulan y podrán extraerse posteriormente por medio de drenado y secado. El líquido sobrante de las lagunas, si es que hubiese alguno, se devuelven a la planta para su tratamiento.

Disposición como relleno

Este método es recomendable únicamente para lodos y sólidos previamente estabilizados, de manera que no se produzcan condiciones de descomposición u otras molestias. Este método de disposición puede aplicarse tanto al lodo digerido, la arena limpia y el residuo de incineración.

Vertedero Controlado

Este método consiste en la conducción y disposición de los residuos en una zona prefijada, donde son compactados con un tractor o apisonadora, y se cubren con una capa de 0.30 m de tierra limpia. Después de varios años, durante los cuales se producen las descomposición y compactación de los residuos, el terreno resultante puede usarse como lugar de esparcimiento u otras finalidades.

Este método es aconsejable cuando al mismo tiempo puede utilizarse para la eliminación de basuras y otros residuos sólidos de la comunidad.

La selección de el lugar de vertido debe tener en cuenta las molestias y los riesgos a la salud que puedan causarse. Es asimismo importante el construir un buen drenaje de la zona elegida a fin de que se elimine toda posibilidad de contaminación del agua subterránea o de corrientes superficiales.

II.3 TRATAMIENTO AVANZADO DEL AGUA RESIDUAL

Los procesos y operaciones de tratamiento convencionales poseen serias deficiencias ya que éstos ofrecen escasa o nula influencia en muchas de las sustancias contenidas en el agua residual. Dichas sustancias van desde iones inorgánicos relativamente simples, tales como calcio, potasio, sulfato, nitrato y fosfato, hasta un número, siempre creciente de compuestos complejos orgánicos sintéticos. La influencia de dichas sustancias en el medio ambiente no se ha estudiado extensivamente, mas se espera que en unos cuantos años esta situación cambie, con lo que aumentarán las exigencias de tratamiento y se fijarán los niveles tolerables de concentración de dichas sustancias en los efluentes de las plantas depuradoras.

Efectos de los elementos químicos presentes en el agua residual

En la tabla II-11¹¹ se presentan algunos de los compuestos químicos presentes en las aguas residuales y las concentraciones en las que pueden causar problemas al ser evacuadas al medio ambiente.

Dada la importancia real y potencial en promover el crecimiento de organismos acuáticos, son de gran importancia considerar los compuestos que contienen nitrógeno y fósforo.

¹¹ METCALF-EDDY. Op. cit. (pág. 764)

CONCENTRACIONES MAXIMAS DE LOS COMPONENTES QUIMICOS PRESENTES EN LAS AGUAS RESIDUALES		
COMPONENTE	EFFECTO	CONC. MAX. mg/l
BIORGANICO		
Amoníaco	Aumenta la demanda de cloro; tóxico para los peces; puede convertirse en nitratos y agotar los recursos de oxígeno; con el fósforo puede llevar al desarrollo de crecimientos acuáticos indeseables.	Cualquier Cualquier Variable ^a Cualquier cantidad
Calcio y Magnesio	Aumenta la dureza y los sólidos totales disueltos.	Por encima de 100
Cloruro	Imparte sabor salado; Interfiere en los usos agrícolas e industriales.	250 75-200
Mercurio	Tóxico para los seres humanos y la vida acuática.	0.00005
Nitrato	Estimula el crecimiento acuático y de las algas; puede causar metahemoglobinemia en los niños (niños azules)	0.5 ^b 10
Fosfato	Estimula el crecimiento acuático y de las algas; Interfiere con la coagulación; Interfiere con el ablandamiento cal-sosa.	0.015 ^b 0.2-0.4 0.3
Sulfato	Acción catártica.	600-1000
ORGANICO		
DDT	Tóxico para peces y la vida acuática en general	0.001
Hexacloruro	Pueden ser cancerígenos y causar problemas de sabor y olor en el agua.	0.02
Petroquímicos	Idem.	0.005-0.1
Comp. fenólicos	Idem.	0.0005-0.001
Agentes tensioactivos	Provocan espumas y pueden interferir con la coagulación.	1.0-3.0

^a Depende del pH y de la temperatura.

^b Para lagos de aguas tranquilas.

TABLA II-11

II.3.1 PROCESOS Y OPERACIONES UNITARIOS

Las operaciones y procesos unitarios aplicados al tratamiento avanzado del agua residual se clasifican en físicos, químicos y biológicos. Dentro de la tabla II-12¹² y con la facilidad de facilitar una comparación general de los distintos procesos y operaciones, se incluyen datos sobre: 1) tipos de aguas residuales a tratar, 2) tipos de elementos afectados y 3) la forma de los residuos finales que han de ser diluidos.

CONVERSION Y ELIMINACION DEL NITROGENO

El nitrógeno puede encontrarse en el medio acuático procedente de fuentes tanto naturales como artificiales. Las fuentes naturales incluyen la precipitación, el polvo, la escorrentía rural y la fijación biológica aunque debido a las actividades humanas, han aumentado las cantidades de nitrógeno contenidas en la precipitación, el polvo y en la escorrentía rural. Otras fuentes que se derivan de las actividades humanas incluyen la escorrentía en zonas urbanas, las aguas residuales municipales, el drenaje de tierras de cultivo y pastos, los residuos industriales y las filtraciones de las fosas sépticas.

NITRIFICACION

Las bases principales de este proceso se encuentran contenidas en el apartado de Nitrificación en cultivos en suspensión dentro de los procesos de tratamiento convencional de las aguas residuales.

La mayor parte del nitrógeno presente en el agua residual tratada se encuentra en forma amoniacal. En este apartado se considera la aplicación del proceso de nitrificación a la conversión del amoníaco contenido en el agua residual.

Como se presentó con anterioridad, los procesos biológicos utilizados para la nitrificación se identifican como procesos aerobios de cultivo suspendido y de cultivo fijo. Así mismo, la nitrificación puede llevarse a cabo en el mismo reactor utilizado para la eliminación de la DBO carbonosa o en un reactor independiente.

¹² METCALF-EDDY. Op. cit. (págs. 768, 769)

OPERACIONES Y PROCESOS DE TRATAMIENTO AVANZADO DEL AGUA RESIDUAL			
DESCRIPCION	TIPO DE AGUA RESIDUAL TRATADA	USO PRINCIPAL	RESIDUO PARA DISPOSICION
OPERACIONES FISICAS USUARIAS			
Arrastre de amoníaco con aire	ETS	Eliminación de nitrógeno amoniacal	Ninguno
Filtración			
• Con medio múltiple	ETS	Eliminación de sólidos suspendidos	Líquido y lodo
• Lecho de diatomeas	ETS	Eliminación de sólidos suspendidos	Lodo
• Microtamices	ETB	Eliminación de sólidos suspendidos	Lodo
Destilación	ETS nitrificado + filtración	Eliminación de sólidos disueltos	Líquido
Electrodialisis	ETS + filtración + adsorción con carbón	Eliminación de sólidos disueltos	Líquido
Flotación	ETP, ETS	Eliminación de sólidos suspendidos	Lodo
Fraccionamiento de espumas	ETS	Eliminación de materia orgánica refractaria, agentes tensoactivos y metales	Líquido
Congelación	ETS + filtración	Eliminación de sólidos disueltos	Líquido
Separación de fases gaseosas	ETS	Eliminación de nitrógeno amoniacal	Ninguno
Aplicación al terreno	ETP, ETS	Nitrificación, desnitrificación eliminación de nitrógeno amoniacal y fósforo	Ninguno
Osmosis inversa	ETS + filtración	Eliminación de sólidos disueltos	Líquido
Absorción	ETB	ODS	Líquido y lodo
PROCESOS QUIMICOS USUARIOS			
Cloración al breakpoint	ETS (filtración)	Eliminación de nitrógeno amoniacal	Líquido

OPERACIONES Y PROCESOS DE TRATAMIENTO AVANZADO DEL AGUA RESIDUAL			
DESCRIPCION	TIPO DE AGUA RESIDUAL TRATADA	USO PRINCIPAL	RESIDUO PARA DISPOSICION
Adsorción con carbón	ETB, ETS (filtración) ^b	Eliminación de materia orgánica disuelta, metales pesados y cloro	Líquido
Precipitación química	ETB	Precipitación de fósforo, eliminación de metales pesados, eliminación de sólidos coloidales	Lodo
Precipitación química en lodo activado	ETP	Eliminación de fósforo	Lodo
Intercambio iónico	ETS + filtración	Eliminación de nitrógeno amoniacal y nitratos	Líquido
Tratamiento electroquímico	No tratada	Eliminación de sólidos disueltos	Líquido y lodo
Oxidación	ETS	Eliminación de materia orgánica refractaria	Ninguno
PROCESOS BIOLÓGICOS UNITARIOS			
Asimilación bacteriana	ETP	Eliminación de nitrógeno amoniacal	Lodo
Desnitrificación	Agua de drenaje de la agricultura	Reducción de nitrato	Ninguno
Cultivo de algas	ETB	Eliminación de nitrógeno amoniacal	Algas
Nitrificación	ETP, ETB	Oxidación del amoníaco	
Nitrificación-desnitrificación	ETP, ETB	Eliminación de nitrógeno total	Lodo

^a ETP= efluente de tratamiento primario; ETB= efluente de tratamiento biológico;

ETS= efluente de tratamiento secundario.

^b Opcional.

TABLA H-12

Proceso combinado de oxidación del carbono y nitrificación

Este proceso se fundamenta en la base de que los organismos nitrificantes se encuentran presentes en casi todos los procesos aerobios de tratamiento biológico, por lo cual, la nitrificación puede llevarse a cabo en cualquiera de los procesos de lodos activados de cultivo suspendido, al igual que en los procesos de cultivo fijo tales como filtros percoladores y los biodiscos. Todo lo que se requiere es mantener las condiciones adecuadas para el crecimiento de organismos nitrificantes.

Nitrificación por fases independientes

Tanto los procesos de cultivo fijo como los de cultivo suspendido se pueden emplear para realizar la nitrificación por fases independientes.

En la tabla II-13¹³ se exponen las ventajas e inconvenientes de los diversos procesos de nitrificación.

DESNITRIFICACION Y NITRIFICACION-DESNITRIFICACION

Este proceso ya fue tratado con anterioridad en el apartado de procesos anóxicos de cultivos en suspensión y fijos; dentro de los procesos de tratamiento convencionales del agua residual.

La eliminación de nitrógeno con este proceso puede lograrse en una o dos etapas, dependiendo de la naturaleza del agua residual, así, si el agua residual a tratar contiene el nitrógeno en forma de amoníaco, son necesarias dos etapas. En la primera, el amoníaco se convierte, por vía aerobia en Nitrito (nitrificación). En la segunda etapa, los nitritos se convierten en gas nitrógeno (desnitrificación). Ahora bien, si el nitrógeno del agua residual se encuentra en forma de nitrato, solamente se precisa la etapa de desnitrificación.

De los procesos para la eliminación del nitrógeno, el proceso de nitrificación-desnitrificación, resulta ser el mejor debido a las siguientes razones: 1) alta eficiencia de eliminación; 2) estabilidad y confiabilidad del proceso; 3) fácil control del proceso; 4) bajas necesidades de superficie y 5) coste moderado.

¹³ METCALF-EDDY. Op. cit. (pág. 778)

COMPARACION DE SISTEMAS ALTERNATIVOS DE NITRIFICACION		
TIPO DE SISTEMA	VENTAJAS	INCREMENTOS
PROCESO COMBINADO DE OXIDACION DE CARBON Y NITRIFICACION		
Cultivo suspendido	Tratamiento combinado de carbono y amoníaco en una sola fase posible bajo contenido de amoníaco en el efluente; control estable del líquido mezcla debido a la alta relación DBO_5/NKT	Protección nula contra tóxicos; estabilidad de operación sólo moderada; estabilidad vinculada a la operación del clarificador secundario para el retorno de la biomasa; se requieren grandes reactores en climas fríos
Cultivo fijo	Tratamiento combinado de carbono y amoníaco en una fase única; estabilidad no vinculada al clarificador secundario al estar los organismos fijados al medio.	Protección nula contra tóxicos; estabilidad de operación sólo moderada; contenido de amoníaco en el efluente generalmente entre 1 y 3 mg/l (excepto en biodiscos); funcionamiento inviable en climas fríos en la mayoría de los casos
NITRIFICACION POR FASES INDEPENDIENTES		
Cultivo suspendido	Buena protección contra la mayoría de tóxicos; operación estable; posible bajo contenido de amoníaco en el efluente	Se requiere un cuidadoso control del lodo cuando la relación DBO_5/NKT es baja; estabilidad de operación vinculada a la operación del clarificador secundario para el retorno de la biomasa; se requiere un mayor número de procesos unitarios que en la combinación de oxidación de carbón y nitrificación
Cultivo fijo	Buena protección contra la mayoría de tóxicos; operación estable; estabilidad no vinculada al clarificador secundario al estar los organismos fijados al medio	Amoníaco en el efluente generalmente entre 1 y 3 mg/l. Se requiere un mayor número de procesos unitarios que en la combinación de oxidación de carbón y nitrificación

TABLA N-13

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

De los procesos para la eliminación del nitrógeno, el proceso de nitrificación-desnitrificación, resulta ser el mejor debido a las siguientes razones: 1) alta eficiencia de eliminación; 2) estabilidad y confiabilidad del proceso; 3) fácil control del proceso; 4) bajas necesidades de superficie y 5) coste moderado.

Como se expuso en el apartado correspondiente los procesos de desnitrificación pueden ser de cultivo fijo anóxico y de cultivo suspendido anóxico; los cuales a su vez pueden realizarse de dos formas distintas: 1) en reactores independientes usando como fuente adicional de carbono orgánico metanol o algún otro compuesto y 2) en sistemas combinados de oxidación del carbono y nitrificación-desnitrificación utilizando como fuente adicional de carbono orgánico aguas residuales o fuentes de carbono endógenas.

En la tabla II-14¹⁴ se presenta una comparación general de los diversos procesos de desnitrificación.

ELIMINACION DEL NITROGENO POR PROCESOS FISICOS Y QUIMICOS

Los principales procesos físicos y químicos utilizados para la eliminación del nitrógeno son: el arrastre con aire, la cloración al breakpoint y el intercambio iónico selectivo.

Separación del amoníaco por arrastre con aire (air stripping)

Este proceso, resulta ser una modificación al proceso de aireación empleado en la eliminación de gases disueltos en el agua. El planteamiento del proceso se basa en lo siguiente:

- 1) Inicialmente se tiene que, los iones de amonio se encuentran en equilibrio con el amoníaco dentro de un agua residual, luego
- 2) cuando el pH del agua residual aumenta a valores superiores a 7, el ion amonio se convierte en amoníaco, ahora bien,
- 3) el amoníaco puede extraerse como un gas al agitar el agua residual siempre en presencia de aire, lo cual puede lograrse en una torre de arrastre equipada con un aireador artificial.

Algunos de los problemas que se han suscitado en la aplicación de éste proceso han sido: formación de incrustaciones de carbonato de calcio dentro de la torre y tuberías, así como un bajo rendimiento cuando el proceso es utilizado en climas fríos.

¹⁴ METCALF-EDDY. Op. cit. (pág. 795,796)

COMPARACION DE SISTEMAS DE DESNITRIFICACION ALTERNATIVOS		
TIPO DE SISTEMAS	VENTAJAS	INCONVENIENTES
CRECIMIENTO SUSPENDIDO UTILIZANDO METANOL DESPUES DE UNA FASE DE NITRIFICACION	Rápida desnitrificación; instalaciones de pequeño tamaño; estabilidad de funcionamiento; pocas limitaciones en las operaciones de la secuencia de tratamiento; puede incorporarse fácilmente una etapa de oxidación del metanol en exceso; cada proceso puede optimizarse independientemente; es posible conseguir alto grado de eliminación de nitrógeno.	Se requiere metanol; estabilidad de funcionamiento vinculada al clarificador para el retorno de la biomasa; se precisa un mayor número de procesos unitarios para la nitrificación-desnitrificación que en sistemas combinados.
CRECIMIENTO DE CULTIVO FIJO (COLUMNA) UTILIZANDO METANOL DESPUES DE UNA FASE DE NITRIFICACION	Rápida desnitrificación; se precisan instalaciones de pequeño tamaño; estabilidad de funcionamiento demostrada; estabilidad no vinculada al clarificador al estar los organismos fijados al medio; pocas limitaciones en las opciones de la secuencia de tratamiento; posible alto grado de eliminación de nitrógeno; cada proceso del sistema puede optimizarse por separado.	Se requiere metanol; no es fácil incorporar el proceso de oxidación del metanol en exceso; se precisa un mayor número de procesos unitarios para la nitrificación-desnitrificación que en sistemas combinados.

COMPARACION DE SISTEMAS DE DESNITRIFICACION ALTERNATIVOS		
TIPO DE SISTEMAS	VENTAJAS	INCONVENIENTES
OXIDACION DEL CARBONO-NITRIFICACION COMBINADOS EN UN REACTOR DE CULTIVO SUSPENDIDO UTILIZANDO UNA FUENTE DE CARBON ENDOGENA	No se necesita metanol; se precisa un menor número de procesos unitarios.	Tasas de desnitrificación muy bajas; se precisan instalaciones de nitrógeno menor que en el sistema basado en el metanol; estabilidad de funcionamiento vinculada al clarificador para el retorno de la biomasa; opciones de la secuencia de tratamiento limitado cuando se precisa eliminar tanto N como P, no existe protección de los nitrificantes contra los tóxicos; difícil de optimizar la nitrificación y desnitrificación independientemente.
OXIDACION DEL CARBONO Y NITRIFICACION COMBINADAS EN REACTOR DE CRECIMIENTO SUSPENDIDO UTILIZANDO EL AGUA RESIDUAL COMO FUENTE DE CARBONO	No se necesita metanol; se precisa menor número de procesos unitarios.	Tasas de desnitrificación muy bajas; se precisan instalaciones de nitrógeno menor que en el sistema basado en el metanol; estabilidad de funcionamiento vinculada al clarificador para el retorno de la biomasa; tendencia a la formación de bulking del lodo; opciones de la secuencia de tratamiento limitado cuando se precisa eliminar tanto N como P, no existe protección de los nitrificantes contra los tóxicos; difícil de optimizar la nitrificación y desnitrificación independientemente.

TABLA II-14

Cloración al breakpoint

Este proceso consiste en la adición de una cantidad suficiente de cloro al agua a tratar, de manera de oxidar el nitrógeno amoniacal en disolución a gas nitrógeno y otros compuestos estables.

Este proceso presenta dos ventajas fundamentales en su aplicación: 1) con un adecuado control y homogeneización del caudal, puede eliminarse totalmente el nitrógeno amoniacal presente; 2) simultáneamente se consigue la desinfección del agua.

Este proceso puede utilizarse para la eliminación del nitrógeno amoniacal de los efluentes de las plantas de tratamiento, tanto en forma independiente como en combinación con otros procesos. A causa de los problemas de toxicidad potencial que pueden crearse por la descarga de compuestos clorados al medio ambiente, es necesario declorar el efluente.

Intercambio iónico

El intercambio iónico es un proceso unitario por medio del cual se ponen en contacto un material sólido y una sustancia líquida, insolubles entre sí; buscando que los iones contenidos en el material sólido sean desplazados por los iones contenidos en solución en la sustancia líquida.

Dentro de el tratamiento de las aguas residuales, las operaciones de intercambio iónico pueden ser de tipo continuo o discontinuo. En un proceso continuo, el material del intercambio es dispuesto en un lecho o una torre por donde el agua se hace circular. En un proceso discontinuo, el material de intercambio se agita con el agua a tratar dentro de un reactor, luego se deja sedimentar y se extrae con el fin de ser regenerado y reutilizado.

Los materiales de intercambio utilizados en el tratamiento del agua residual pueden ser resinas de origen natural o sintético; aunque se prefieren estas últimas debido a su durabilidad.

Se ha suscitado un grave problema en la aplicación de este proceso a los efluentes de algún proceso de tratamiento biológico, donde se ha observado el aglutinamiento de la resina, causado por la materia orgánica residual. Este problema puede ser aminorado si se filtra previamente el agua residual, o bien, si se utilizan resinas intercambiadoras eliminadoras, antes de la aplicación del proceso.

Para reducir costos en la aplicación de este proceso, se deben buscar productos regeneradores y restauradores para las resinas agotadas, que eliminen tanto los aniones inorgánicos como la materia orgánica. Los restauradores físicos y químicos que ofrecen los mejores resultados con hidróxido de sodio, ácido clorhídrico, metanol y bentonita.

ELIMINACION DEL FOSFORO

El agua residual doméstica y el agua de drenaje de zonas agrícolas son las principales fuentes de fósforo.

El fósforo contenido en el agua residual puede presentarse en tres formas: ortofosfato, polifosfato y fósforo orgánico. El fósforo contenido en las aguas residuales tiene su origen en los residuos del cuerpo humano, en los vertidos de residuos alimenticios vertidos a las alcantarillas, en los compuestos de lavado y limpieza comercial.

Operaciones y procesos para la eliminación del fósforo

Por medio de procesos convencionales de tratamiento del agua residual, aproximadamente el 10 % del fósforo correspondiente a la parte insoluble puede ser eliminado por decantación primaria. Por medios biológicos convencionales, solamente una cantidad mínima de fósforo contenido en el tejido celular puede ser eliminada.

Ninguna de las formas de fósforo presente en el agua residual es gaseosa a temperaturas y presiones normales, de ahí que para su eliminación sea necesario conseguirse la formación de un precipitado insoluble que pueda ser eliminado por gravedad en un proceso de sedimentación. Para formar dicho precipitado es necesaria la adición de productos químicos tales como: cal, sulfato de alúmina o bien cloruro o sulfato férrico. También se pueden emplear polímeros conjuntamente con cal y sulfato de alúmina.

El punto de aplicación de los productos químicos dentro del tren de tratamiento, puede variar ampliamente, pero en forma general se dice que la adición de sales de aluminio o hierro después del tratamiento secundario, suele dar los mejores resultados.

Dentro de la tabla II-15¹⁵ se plantean las ventajas e inconvenientes de la eliminación de fósforo por adición de productos químicos en diversos puntos del tren de tratamiento.

ELIMINACION DE MATERIA ORGANICA REFRACTARIA

La eliminación de los compuestos de materia orgánica refractaria que no pudieron ser transformados durante el tratamiento biológico convencional, pueden ser eliminados mediante procesos tales como la adsorción sobre carbón activo, oxidación o mediante su aplicación al terreno.

¹⁵ METCALF-EDDY, Op. cit. (pág. 822)

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA ELIMINACION DE FOSFORO EN DIVERSOS PUNTOS DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO		
NIVEL DE TRATAMIENTO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
PRIMARIO	Aplicable a la mayoría de las plantas; eliminación superior de DBO y de sólidos suspendidos; mínimo trato de pérdidas de producto químico; posibilidad demostrada de recuperación de la cal.	Mínima eficiencia del uso del metal de producto químico; pueden requerirse polímeros para la floculación; todo más difícil de deshidratar que el primario.
SECUNDARIO	Mínimo coste; menores dosis de productos químicos que el primario; mejora de la estabilidad del lodo activado; no se precisan polímeros.	La sobredosis de metal puede causar la toxicidad a bajo pH; con aguas residuales de baja alcalinidad, puede ser necesario un sistema de control del pH; no puede utilizar la cal a causa del excesivo pH; sólidos inertes añadidos al líquido mezcla del lodo activado, reduciendo el porcentaje de sólidos volátiles.
AVANZADO (TERCIARIO)	Mínimo fósforo en el efluente; máxima eficacia del uso del producto químico; recuperación de cal demostrada.	Máximo coste de inversión; máxima pérdida de metal del producto químico.

TABLA II-15

Adsorción sobre carbón

Este método es el más utilizado para la eliminación de los compuestos refractarios del agua residual.

El proceso de adsorción sobre carbón activo no había sido utilizado extensivamente en el tratamiento de las aguas residuales, sin embargo, las investigaciones llevadas a cabo al respecto resultan muy prometedoras. Este proceso, suele considerarse en el tratamiento del agua residual como una fase de pulido final de calidad de un agua tratada por medio de procesos de tratamiento biológico, en cuyo caso, tiene la función de eliminar parte de la materia orgánica residual disuelta. Sin embargo, el tratamiento completo con carbón activo está siendo estudiado, como un posible sustituto del tratamiento biológico de las aguas residuales municipales.

Oxidación química

Dentro del tratamiento avanzado del agua residual, la oxidación química se utiliza para eliminar el amoníaco, reducir la concentración de materia orgánica residual y el contenido bacteriano y vírico de las aguas residuales.

Para reducir la materia orgánica residual puede emplearse tanto el cloro como el ozono, los que además ofrecen la ventaja adicional de la desinfección. Este proceso puede mejorarse si se emplea radiación ultravioleta.

La eliminación del nitrógeno amoniacal suele llevarse a cabo por medio de cloración, sin embargo, un problema asociado a este proceso consiste en que cuando se tienen presente en el agua residual compuestos orgánicos e inorgánicos, éstos provoca una demanda adicional de cloro.

ELIMINACION DE SUSTANCIAS INORGANICAS DISUELTAS

Los procesos físicos que se mencionan a continuación, aunque resultan ser técnicamente realizables, otros factores como el costo, necesidades operacionales y consideraciones estéticas se oponen a su uso.

Precipitación química

Este proceso es comúnmente utilizado para la precipitación del fósforo contenido en el agua residual, mediante la adición de coagulantes, tales como el sulfato de alúmina, cal o sales de hierro y polielectrolitos. Aunado a la eliminación del fósforo también se produce la eliminación de diversos iones orgánicos, principalmente metales pesados.

Uno de los inconvenientes de la aplicación de éste proceso es que se da un intercambio neto de los sólidos disueltos totales en el agua residual tratada.

Intercambio iónico

Como se expuso con anterioridad, este proceso se basa en que los iones de una especie dada son desplazados de un material insoluble de intercambio por iones de una especie en disolución.

El uso más extendido de este proceso se da en el ablandamiento del agua doméstica, en que los iones sodio procedentes de una resina de intercambio catiónica, sustituyen a los iones magnesio y calcio presentes en el agua, reduciendo por tanto su dureza. También este proceso puede utilizarse para la reducción de los sólidos totales disueltos, donde se utilizan resinas de intercambio catiónicas y aniónicas, en las cuales los sólidos disueltos son reemplazados por iones de hidrógeno e hidróxilo que reaccionan entre sí para formar moléculas de agua.

Los intercambiadores de iones, generalmente, del tipo de columna de lecho compacto de flujo descendente. No todos los iones disueltos se eliminan por igual, cada resina se caracteriza por una selectividad de eliminación.

El proceso de desmineralización puede tener lugar en columnas de intercambio independientes, dispuestas en serie, o ambas resinas mezcladas en un reactor único.

Utilizando este proceso para el tratamiento de agua de abastecimiento, se han logrado eficiencias de eliminación de sólidos totales disueltos del 90 al 99%, utilizando sistemas convencionales de intercambiadores de dos etapas. Incluso son posibles eliminaciones mayores con intercambiadores de lecho mezclado.

Osmosis Inversa

La osmosis invesa es un proceso mediante el cual se pueden eliminar ciertas sustancias contenidas en solución en el agua, por medio de la filtración de la misma a través de una membrana semipermeable, a una presión mayor que la osmótica. Este proceso es utilizado para la eliminación de ciertas sales disueltas contenidas en el agua residual. Este procesos de una de las diversas técnicas de desmineralización aplicables a la producción de agua de calidad adecuada para su reutilización.

Sin embargo, este proceso tiene sus limitaciones, ya que el agua residual a ser tratada mediante este proceso, deberá recibir un tratamiento previo, tal como adsorción sobre carbón activo o precipitación química, seguido de alguna de las formas conocidas de filtración, para eliminar la materia orgánica y coloidal, que de lo contrario ocasionarían baja eficiencia de producción de agua, al acumularse y taponear los poros de la membrana. Este proceso no es recomendable para aguas que contengan sales de niveles bajos de solubilidad, ya que éstas se precipitan sobre la membrana, provocando la reducción de su tasa de producción. La eliminación del hierro y magnesio también es, algunas veces, necesaria para disminuir el potencial de incrustaciones; también el pH deberá ajustarse entre 4 y 7.5 para impedir la formación de incrustaciones.

Electrodialisis

Por medio de este proceso, los componentes iónicos de una solución, son separados por medio del uso de membranas con semipermeabilidad selectiva de iones. La aplicación de un potencial eléctrico entre los dos electrodos, causa una corriente eléctrica que atraviesa la solución, la cual, a su vez, origina una migración de cationes hacia el electrodo negativo y de aniones hacia el electrodo positivo. Dado el espaciado alternado de las membranas permeables a los cationes y aniones, se forman células de sales concentradas y diluidas.

Existen algunos problemas derivados de la aplicación de este proceso en el tratamiento del agua residual, los cuales incluyen la precipitación química de sales de poca solubilidad en la superficie de la membrana y la obstrucción de la membrana por la materia orgánica coloidal

residual presente en el agua residual. Para evitar la obturación de las membranas, se recomienda dar un tratamiento previo al agua con carbón activo, precedido por algún otro tipo de proceso tal como precipitación química y filtración.

II.3.2 DISPOSICION DE LOS CONTAMINANTES

Hasta este momento unidamente se han presentado los métodos de tratamiento del agua residual; resulta pertinente, sin embargo, exponer los métodos de evacuación final de los contaminantes producto de la aplicación de dichos procesos, al tratamiento de aguas residuales. En la tabla II-3⁷ aparecen los principales métodos aplicados a la evacuación final de dichos contaminantes.

En forma general y de acuerdo a la tabla II-15¹⁶, se dice que existen tres grandes grupos de sistemas de evacuación: a) vertido directo al mar y/o al terreno; b) tratamiento y conversión de subproductos previo vertido al mar y/o al terreno; 3) tratamiento y conversión previo con recuperación de productos, para luego vertido al terreno y/o al mar.

II.4 SISTEMAS DE TRATAMIENTO POR APLICACION AL TERRENO

Los sistemas de tratamiento por aplicación al terreno, se basan en los efectos combinados de las plantas, la superficie y las capas del suelo, para la eliminación de los contaminantes presentes en las aguas residuales a tratar.

Los principales procesos de tratamiento de aguas residuales por aplicación al terreno son: 1) El riego; 2) La infiltración rápida y 3) Las corrientes superficiales. Otros procesos de uso menos extendidos por ser aplicables a proyectos de pequeña escala, incluyen la aplicación a tierras pantanosas, la aplicación subsuperficial y la acuicultura.

Mecanismos de tratamiento

La superficie y perfil del suelo pueden proporcionar el tratamiento físico y químico del agua residual, a la vez que un hábitat propicio para los microorganismos que pueden promover el tratamiento biológico. También los sistemas de aplicación al terreno poseen la capacidad de eliminar materia orgánica, nitrógeno, fósforo, cationes intercambiables, elementos a nivel traza y microorganismos presentes en el agua residual; pero esto estará superditado por una gran variedad de factores.

¹⁶ METCALF-EDDY, Op. cit. (pág. 830)

MÉTODOS PARA LA DISPOSICIÓN DE CONTAMINANTES	
MÉTODO	OBSERVACIONES
LÍQUIDO	
Estanques de evaporación	Se tendrá cuidado en evitar la contaminación del agua subterránea.
Extensión sobre el terreno	Se tendrá cuidado en evitar la contaminación del agua subterránea.
Inyección en pozo poco profundo	Se tendrá cuidado en evitar la contaminación del agua subterránea.
Inyección en pozo profundo	Deberá haber cavidades artificiales, naturales o estratos porosos.
Releno Sanitario	Líquido utilizado como agente humectante para aumentar la compactación.
Evaporación controlada	Depende del volumen del líquido, costes de energía y condiciones locales.
Vertido al mar	Es necesario el transporte mediante camiones, ferrocarril o tuberías.
LODO	
Extensión sobre el terreno	El lodo debe pretratarse para facilitar la deshidratación o eliminar los componentes desagradables.
Lagunas	Se tendrá cuidado en evitar la contaminación del agua subterránea.
Releno Sanitario	Se usa el lodo como agente humectante para aumentar la compactación.
Recuperación de productos	Depende de las características del lodo, tecnología de la recuperación y costes.
Combustión por vía húmeda	Se recupera el valor térmico para su aplicación.
Incineración	Necesaria la eliminación de cenizas.
Disposición al mar	Necesaria la concentración del lodo. Se requiere la eliminación de la cenizas. Quizás se prohíba en el futuro.
CENIZA	
Releno Sanitario	Mezclada con basuras para aumentar la densidad compactada.
Acondicionador de suelos	Depende de las características del residuo.
Evacuación al mar	Quizá se prohíba en el futuro.

TABLA II-15

Materia orgánica. El suelo proporciona un sistema de tratamiento biológico muy efectivo en la eliminación de la materia orgánica. Esta es filtrada por la hierba y la capa superficial del suelo, y es reducida por oxidación biológica. Dado que las altas cargas orgánicas pueden crear condiciones anaerobias en las capas del suelo y darse por consecuencia la formación de olores, debe utilizarse un ciclo de cargas intermitentes. Ello permite que el aire penetre en el suelo y suministre oxígeno a las bacterias que oxidan la materia orgánica.

Nitrógeno. El nitrógeno puede eliminarse en la aplicación al terreno por medio de los efectos de incorporación al cultivo y/o por desnitrificación, dependiendo del tipo de sistema de aplicación al terreno de que se trate, predominará alguno de los dos efectos.

Fósforo. Los procesos principales de eliminación del fósforo en sistemas de aplicación al terreno son la precipitación y adsorción química, aunque también es importante la adsorción de ciertas cantidades por medio de las plantas.

Elementos a nivel traza. Muchos de los elementos a nivel traza son esenciales para el crecimiento de las plantas, pero algunos resultan tóxicos a concentraciones altas tanto para las plantas como para los microorganismos. La retención en las capas del suelo de los elementos traza, especialmente los metales pesados, se produce a través de la sorción (adsorción y precipitación) y del intercambio iónico.

Microorganismos. Los mecanismos de eliminación de las bacterias comunes a la mayoría de los métodos de aplicación al terreno incluyen la retención, muerte, sedimentación, atrapamiento y la adsorción. En los sistemas de riego por aspersión, algunas bacterias son interceptadas por la vegetación, donde son eliminadas por desecación, muerte y la acción de los depredadores.

Acción de la vegetación

Las plantas son utilizadas en los sistemas de aplicación al terreno para los siguientes fines: 1) captar el nitrógeno y el fósforo del agua residual aplicada; 2) mantener e incrementar las tasas de filtración de agua y la permeabilidad del suelo; 3) reducir la erosión; 4) servir como medio para los microorganismos (circulación superficial en lámina) y 5) su uso principal en los sistemas de regadío consiste en la eliminación de nutrientes.

Salud pública

Los riesgos sanitarios asociados con la aplicación del agua residual al terreno son: 1) posible transmisión de enfermedades por agentes bacteriológicos; 2) filtración de productos químicos hasta el agua subterránea, lo cual plantea riesgos para la salud si son ingeridos y 3) degradación de la calidad de los cultivos regados con este tipo de aguas.

1) RIEGO

Es el proceso de aplicación al terreno más utilizado actualmente, ya que ha reportado los mejores resultados en términos de seguridad y calidad del agua tratada. Consiste en la aplicación del efluente al terreno para su tratamiento y para adicionar ciertos compuestos para el desarrollo y crecimiento de las plantas. El agua residual es captada por las plantas, evaporada parcialmente (evapotranspiración) y filtrada a través del suelo. El agua aplicada sufre un tratamiento por medios físicos, químicos y biológicos al filtrarse en el suelo. Puede ser aplicada tanto a los cultivos como a la vegetación, utilizando técnicas de riego como la aspersión o alguna otra técnica de riego superficial.

Los beneficios que pueden lograrse de la aplicación del agua residual al terreno utilizando los sistemas de riego son: 1) tratamiento del agua residual aplicada, 2) aprovechamiento económico del agua y sus nutrientes para la producción de cultivos comercializables, 3) conservación y mantenimiento de los recursos acuíferos y 4) preservación y desarrollo de zonas verdes y espacios abiertos.

Requisitos de tratamiento previo

El grado de tratamiento requerido antes de la aplicación del agua residual al terreno depende de numerosos factores, entre ellos las normas de salud pública respectivas, la carga aplicada (referida a las características críticas del agua residual) y el sistema de riego de cultivos estará basado en las normas sanitarias respectivas, tipo de cultivo, uso a que se destine el producto, el grado de contacto entre la población y el agua de riego y el sistema de riego empleado.

2) INFILTRACION RAPIDA

Los sistemas de infiltración rápida se basan en la aplicación del agua al suelo a tasas elevadas (de 100 a 210 cm/semana). La mayoría del agua residual aplicada se filtra a través del suelo, y el efluente tratado llega, finalmente, hasta el agua subterránea. El agua residual suele aplicarse a suelos altamente permeables, tales como arenas y arenas limosas, utilizando métodos como la extensión en lagunas o por aspersión. Al igual que en los sistemas de riego, el agua es tratada al atravesar la matriz de suelo.

Las principales aplicaciones de este sistema son:

- a) Tratamiento del agua residual.
- b) Recarga de acuíferos.
- c) Recuperación del agua renovada por pozos o drenes para la reutilización o su disposición subsiguiente.
- d) Recarga de corrientes superficiales por flujo subsuperficial natural.
- e) Almacenamiento temporal del agua renovada en el acuífero.

Requisitos de tratamiento previo

De manera general, la reducción de los sólidos suspendidos es el criterio de tratamiento previo más importante para los sistemas de infiltración rápida, lo cual tiene como objetivo primordial evitar al máximo la obstrucción de los poros del suelo y el desprendimiento de malos olores. En muchos casos se utiliza el tratamiento biológico con este propósito.

La infiltración rápida reduce eficazmente el número de bacterias patógenas, por lo que la desinfección previa no es necesaria, excepto, para sistemas de aspersión.

3) RIEGO POR CIRCULACION SUPERFICIE EN LAMINA .

Este sistema consiste en la aplicación del agua residual sobre las zonas superiores de terrazas dispuestas con pendiente, fluyendo a través de la superficie vegetada hasta las zanjas de recogida de los volúmenes de escorrentía. La eliminación de los contaminantes del agua residual se logra por una conjugación de efectos físicos, químicos y biológicos que se lleva a cabo en la lámina superior de la superficie de escorrentía; la cual, además se caracteriza por ser relativamente impermeable.

Los objetivos del riego por circulación superficial en lámina son: 1) el tratamiento del agua residual (en menor medida), 2) la producción de cultivos, 3) producción de pastos de forraje y 4) preservación de zonas verdes y espacios abiertos.

Son amplios los alcances de tratamiento que pueden lograrse por medio de la aplicación de este sistema de riego. Puede, por consecuencia obtenerse un efluente secundario o de calidad mejorada, a partir de un efluente de un procesos primario o de lagunas. También pueden conseguirse altos niveles de eliminación de nitrógeno y DBO comparables con los obtenidos con tratamientos avanzados convencionales. El agua tratada es recogida y puede dársele un nuevo uso, o bien, disponerse a algún cuerpo de agua superficial.

Requisitos de tratamiento previo

Cuando se utiliza este sistema de riego para dar un nivel secundario de tratamiento, el influente deberá contar con un nivel previo de tratamiento, el cual como mínimo deberá estar formado por el desbaste y la eliminación de arenas y grasas para evitar el taponamiento de los sistemas de distribución. Cuando el influente aplicado es desinfectado previa su aplicación, podrá ser usado cualquier sistema de distribución.

4) OTROS SISTEMAS

Existen otros sistemas de reciente investigación, los cuales han reportado muy buenos resultados, tales como el uso de tierras pantanosas artificiales, naturales y turberas, en el tratamiento de aguas residuales municipales. Dado que se ha demostrado que los organismos acuáticos (animales y vegetales), pueden utilizarse para tratar el agua residual, se cree que en un futuro podrán utilizarse organismos acuáticos tanto para el tratamiento de las aguas residuales, como con fines de acuicultura (producción de fibras y alimentos aprovechables).

II.4.1 APLICACION DEL LODO AL TERRENO

Los objetivos principales de la aplicación del lodo al terreno son: 1) su disposición como producto residual y 2) el uso de nutrientes y materia orgánica como fertilizante en cultivos y regenerador del suelo.

El método de aplicación del lodo al terreno dependerá del estado físico en que éste encuentre, así se tiene que el lodo líquido puede aplicarse por métodos similares a los utilizados para la aplicación del agua residual, por ejemplo: aspersores, sistema de surcos o pueden ser extendidos directamente mediante camiones cisterna. La aplicación del lodo en estado líquido es muy atractiva dada su simplicidad, ya que no se precisa la deshidratación y pueden usarse sistemas económicos de transporte. La aplicación del lodo deshidratado es similar a la de un abono animal semisólido, lo cual constituye una gran ventaja, ya que las granjas privadas podrían hacer la aplicación directa sobre tierras usando sus propios equipos.

CAPITULO III LEGISLACION REFERENTE AL USO DEL AGUA

INTRODUCCION

En México al igual que en muchos otros países, los recursos acuíferos se consideran propiedad de la Nación, por lo que su uso y aprovechamiento se encuentran debidamente legislados.

Como se especificó con anterioridad, el nivel de tratamiento requerido por un agua dentro de un proyecto específico, estará supeditado por las características del agua a tratar y por los requerimientos de calidad del agua tratada. Dentro de estos requerimientos se tienen los requisitos legales, los cuales fijarán las condiciones particulares de las descargas, a fin de evitar problemas de contaminación posteriores a su disposición final.

De lo anterior, se puede concluir que todo aprovechamiento de aguas residuales, deberá observar el cumplimiento de una serie de normas que restringen el aprovechamiento, así como aquellas que reglamentan su calidad. A pesar de lo anterior, no existe en nuestro país, hasta la fecha, ningún reglamento específico para el aprovechamiento de las aguas residuales. Existen escasamente dos Normas Oficiales Mexicanas (NOM), las cuales se discutirán más adelante, las que establecen las condiciones bajo las cuales se podrá verificar el reuso de las aguas residuales urbanas o municipales en riego agrícola.

III.1 ANTECEDENTES

El objetivo general del presente capítulo es la descripción general de la legislación dentro de nuestra país referente al uso del agua.

En nuestro país, al igual que en la mayoría de los países del mundo, la legislación del agua se encuentra orientada primordialmente al establecimiento de los lineamientos generales para su uso y para evitar el deterioro de los recursos hídricos existentes. Centrando nuestra atención de manera especial en la legislación referida al uso del agua, se puede decir que ésta surge sobre el fundamento de que la fuente de abastecimiento no está contaminada, o al menos se encuentra en un grado aceptable de contaminación. De lo anterior se desprende la siguiente aseveración, la cual establece que dicha legislación únicamente es aplicable a fuentes de abastecimiento que involucren aguas de primer uso (recursos hídricos naturales); consecuentemente dicha legislación **no puede de ningún modo ser aplicable al reuso de aguas residuales tratadas**, ya que aunque éstas representan una fuente de abastecimiento de agua, ya han sufrido un primer uso.

El primer antecedente de legislación del uso del agua, lo constituye la Ley Federal de Aguas y el Código Sanitario. Sin embargo, en el año de 1970 el Estado mexicano asumió la responsabilidad de **mejorar y proteger el medio ambiente**, y estableció medidas técnicas y jurídicas para evitar el deterioro de los recursos agua, suelo y aire.

Para la protección de los cuerpos de agua en el país, se visualizó la necesidad insoslayable de crear una legislación integral, es decir, un conjunto de ordenamientos jurídicos que hoy en día regulan la administración del agua tanto en cantidad como en calidad, incluyendo disposiciones de carácter fiscal que obligan cabalmente a los usuarios a pagar por su uso y aprovechamiento y por la contaminación que generan.

En la actualidad, existen diversos cuerpos jurídicos como son: la Ley de Aguas Nacionales o Ley Federal de Aguas, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Ley General de Salud, las Normas Oficiales Mexicanas y para el caso específico de la Ciudad de México, se tiene además, el Reglamento del Servicio de Agua y Drenaje para el Distrito Federal.

Es de gran importancia destacar las recientes reformas a la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, publicadas en el Diario Oficial de la Federación del 25 de mayo de 1992, mediante las cuales la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) sustituye a la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE). Por lo anterior, todas las atribuciones correspondientes a la SEDUE pasan a ser ingerencia de la SEDESOL; así mismo se establece que toda la documentación y ordenamientos que anteriormente se referían a la SEDUE son aplicables a la SEDESOL.

Como medida para atender de manera más eficaz y con mayor capacidad de respuesta el despacho de los asuntos encomendados a la SEDESOL, se crearon el Instituto Nacional de

Ecología y la Procuraduría Federal de Protección del Ambiente. El Instituto Nacional de Ecología tiene facultades técnico normativas y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente cuenta con facultades de control y atención de las demandas ciudadanas en la prevención y restauración de la contaminación ambiental y la conservación del equilibrio ecológico.

A continuación se expondrá de manera general el origen y evolución de los principales ordenamientos referentes al uso y aprovechamiento de los recursos acuíferos, poniendo una mayor atención a aquellos apartados que se refieran al uso y manejo de las aguas residuales.

III.2 LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y PROTECCION DEL AMBIENTE (SEDUE)

Las disposiciones jurídicas relativas a la contaminación de aguas tuvieron su origen en la Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación del Ambiente y su respectivo Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación de Aguas. Estos ordenamientos surgieron en 1973, posteriormente, el 11 de febrero de 1982 entró en vigor la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la cual abrogó a la Ley antes mencionada, mientras que el Reglamento correspondiente aún tiene vigencia a la fecha. El 28 de enero de 1988 apareció la nueva Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.

Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección del Ambiente (1988)

A continuación se presentan los apartados contenidos dentro de la presente referidos al uso racional de los recursos acuíferos y la prevención y control de la contaminación de los mismos.

Dentro del Título tercero y Capítulo I, se establecen los lineamientos para el aprovechamiento racional del agua y los ecosistemas acuáticas.

Dentro de los artículos 88 y 89 se establece como asunto de interés de la Federación, el aprovechamiento racional y la prevención y el control de la contaminación de las aguas de jurisdicción federal, conforme a la Ley Federal de Aguas.

En el artículo 117 párrafo II se establece que el agua usada en actividades productivas susceptibles de producir su contaminación, conlleva la responsabilidad de tratamiento de las descargas a fin de adecuar su calidad para uso posterior y no alterar el equilibrio de los ecosistemas. Dentro del mismo artículo párrafo IV, se establece que las aguas residuales de origen urbano deben de recibir tratamiento previo a su descarga en cualquier cuerpo de agua.

Dentro del artículo 119 se establece entre otros aspectos, como atribuciones de la SEDUE (Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología): 1) expedir en coordinación con la SARH y las demás autoridades competentes, las normas técnicas para el vertido de aguas residuales a cuerpos receptores. 2) el fijar las condiciones particulares de descarga cuando se trate de aguas

residuales generadas en bienes y zonas de jurisdicción federal, así como aquellas vertidas en cuerpos de agua de propiedad nacional; 2) determinar los procedimientos de tratamiento de las aguas residuales, de acuerdo a los criterios sanitarios que en materia de salud pública emita la Secretaría de Salud, en función del destino de esas aguas y de las condiciones del cuerpo receptor.

El artículo 121 establece que no se podrán descargar o infiltrar en cualquier cuerpo de agua, aguas residuales que contengan contaminantes sin previo tratamiento y el permiso de la autoridad federal o local correspondiente.

Los artículos 122 y 123, determinan que todas las aguas residuales provenientes de usos municipales, públicos o domésticos y las de usos industriales o agropecuarios, deberán satisfacer las Normas Técnicas Ecológicas (actualmente Normas Oficiales Mexicanas NOM) que para tal efecto se expidan, y en su caso, las condiciones particulares de descarga que determine la Secretaría o las autoridades locales, antes de ser vertidas a los cuerpos receptores.

A continuación se expondrán los lineamientos referentes al reuso del agua residual, contenidos en la presente ley.

El artículo 92 establece que, con el propósito de asegurar la disponibilidad del agua y abatir los niveles de desperdicio, las autoridades competentes deberán promover el tratamiento de las aguas residuales y su reuso.

Dentro del artículo 119 sección I, se emite como atribuciones de la SEDUE: 1) emitir los criterios ecológicos para el manejo y uso o aprovechamiento de las aguas residuales, para evitar contaminación que afecte el equilibrio de los ecosistemas; 2) promover el reuso de las aguas residuales tratadas en actividades agrícolas e industriales. En el mismo artículo, sección II, establece como jurisdicción de la SEDUE en coordinación de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) y la Secretaría de Salud (SS): 1) expedir las Normas Técnicas Ecológicas (NTE) (actualmente NOM) para el uso o aprovechamiento de las aguas residuales; 2) expedir las NTE (actualmente NOM) que deberán observarse para el tratamiento de las aguas residuales de origen urbano que se pretendan reutilizar en la industria y/o la agricultura.

III.3 LEY FEDERAL DE AGUAS (COMISION NACIONAL DEL AGUA CNA)

Para los efectos de esta Ley, se consideran como Aguas Nacionales, las aguas propiedad de la Nación, definidas en los términos del párrafo quinto del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, las aguas del subsuelo, las que corresponden en virtud de los tratados internacionales y las residuales provenientes del uso de las aguas de propiedad nacional.

Este ordenamiento jurídico fue publicado en el Diario Oficial de la Federación el 11 de enero de 1972, reformado y adicionado por primera vez el 13 de enero de 1986 y por último el 10. de diciembre de 1992.

Esta ley constituye un cuerpo normativo que vino a substituir y sumarizar cinco leyes que de manera dispersa regulaban la explotación, uso y aprovechamiento de las aguas nacionales. El avance de la legislación en la materia fue notorio, ya que recogió el contenido y abrogó la Ley de Aguas de Propiedad Nacional del 30 de agosto de 1934; la Ley de Riego del 30 de diciembre de 1946; la Ley Federal de Ingeniería Sanitaria del 30 de diciembre de 1947; la Ley de Cooperación para Dotación de Agua Potable a los Municipios del 15 de diciembre de 1956 y la Ley Reglamentaria del párrafo quinto del artículo 27 Constitucional, en materia de Aguas del Subsuelo, del 29 de diciembre de 1956.

La nueva Ley Federal de Aguas, relaciona las disposiciones de la ley de Aguas con otros ordenamientos en materia agraria, ambiental y de salud, con el objetivo de respetar el principio de legalidad, al establecer la coordinación de las funciones entre la SARH y las demás dependencias del Ejecutivo Federal.

El **artículo 1o.**, establece que la Ley de Aguas Nacionales es de observancia general en todo el territorio nacional, sus disposiciones tienen por objeto regular la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas residuales, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad. Además, dentro del artículo 2o. se establece que dichas disposiciones son aplicables a todas las aguas nacionales, sean superficiales o del subsuelo.

El **artículo 4o.**, establece que la autoridad y administración en materia de aguas nacionales compete al Ejecutivo Federal, el cual ejercerá directamente a través de la Comisión Nacional del Agua (CNA).

Dentro del **artículo 16** se menciona que al igual que las aguas naturales propiedad de la Nación, las aguas residuales provenientes del uso de éstas, también serán propiedad de la Nación.

El **artículo 17** expone que "es libre la explotación, uso y aprovechamiento de las aguas nacionales superficiales por medios manuales para fines domésticos y abrevadero, siempre que no se desvíen de su cauce ni se produzca una alteración en su calidad o una disminución significativa en su caudal, en los términos del reglamento."

El **artículo 18**, sin embargo establece que la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas del subsuelo causará las contribuciones fiscales que señale la ley.

El **artículo 20** habla de las Concesiones de la siguiente forma: "la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales por parte de personas físicas o morales, se realizará por medio de concesiones a través de la CNA. Asimismo, la explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales por dependencias y organismos descentralizados de la administración pública federal, estatal o municipal, se podrá llevar a cabo por asignación otorgada por la CNA.

El **título quinto** versa acerca de las zonas de extracción reglamentadas, de veda o de reserva. Específicamente, el artículo 38 establece que el Ejecutivo Federal podrá reglamentar

la extracción y utilización de las aguas nacionales, establecer zonas de veda o declarar la reserva de cuerpos de agua, en los casos de disminución, escasez o contaminación de las fuentes de abastecimiento y para proteger los servicios de agua potable.

El título sexto por su parte, se refiere a la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas para diversos usos, los cuales podrán otorgarse por medio de concesiones y/o asignaciones.

El título séptimo se encuentra referido a la Prevención y Control de la Contaminación de las aguas. Dentro del artículo 86 se establece entre otras atribuciones de la CNA: 1) establecer y vigilar el cumplimiento de las condiciones particulares de descarga que deben satisfacer las aguas residuales que se generen en bienes y zonas de jurisdicción federal o bien de aguas vertidas en aguas y bienes nacionales en términos de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Ambiente; 2) vigilar, en coordinación con las demás autoridades competentes, que el agua suministrada para consumo humano cumpla con las normas de calidad correspondientes, al igual que el uso de las aguas residuales.

El artículo 87 declara que, es atributo de la CNA el determinar los parámetros que deberán cumplir las descargas en base a la capacidad de asimilación y dilución de los cuerpos de aguas nacionales y las cargas de contaminantes que pueden recibir los cuerpos de agua que recibirán la descarga.

El artículo 88, establece que las personas físicas o morales requieren permiso de la CNA para descargar sus aguas residuales a cuerpos de agua nacionales o bienes nacionales. En el artículo 89 se dice que, para otorgar el permiso correspondiente, la CNA se basará en las características de los cuerpos receptores donde sean vertidas, en las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes y las condiciones particulares que requiera cumplir la descarga.

III.4 SECRETARIA DE SALUD (SS)

Este ordenamiento, regula la prevención y control de la contaminación de las aguas, desde el punto de vista del uso y consumo humano.

El artículo 117 indica que corresponde a la SEDUE en coordinación con la SS, la formulación y conducción de la política de saneamiento ambiental, en lo referente a la salud humana. Sin embargo, corresponde a la Secretaría de Salud emitir las Normas Técnicas a que deberá sujetarse el tratamiento del agua para uso y consumo humano; establecer los criterios sanitarios para el uso, tratamiento y disposición de aguas residuales, para evitar riesgos y daños a la salud pública.

El artículo 122 prohíbe la descarga de aguas residuales o de contaminantes en cualquier cuerpo de agua superficial o subterráneo, cuyas aguas se destinen para uso o consumo humano. Los usuarios que aprovechen en cuerpos de agua que posteriormente serán utilizadas para uso

o consumo de la población, estarán obligados a darles el tratamiento correspondiente a fin de evitar riesgos para la salud humana, de conformidad con las disposiciones aplicables.

III.5 NORMAS TECNICAS ECOLOGICAS (SEDUE) / NORMAS OFICIALES MEXICANAS (SEDESOL octubre 1993)

Las Normas Técnicas Ecológicas (NTE) surgieron por dictamen de la Ley del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, la cual establece que las actividades y servicios que originen descargas de aguas residuales que puedan causar desequilibrio ecológico o producir daños en el bienestar de la población, deberían satisfacer las Normas Técnicas Ecológicas que al respecto se fijaran, las cuales establecen los límites máximos permisibles de contaminación de dichas descargas. Las NTE fueron publicadas en el Diario Oficial de la Federación (D.O.F.) en el momento de su expedición y posteriormente fueron recopiladas y editadas por la Gaceta Ecológica de SEDUE. Sin embargo en recientes fechas (octubre 1993), dichas Normas Técnicas Ecológicas tomaron el carácter de Normas Oficiales, denominándoseles actualmente Normas Oficiales Mexicanas (NOM).

En el anexo I contiene la relación de las NOM referentes a la prevención y control de la contaminación del agua.

Normas Oficiales Mexicanas referidas al reuso del agua

NOM-CCA-032-ECOL/1993 (Fecha de publicación en el D.O.F. el 18/10/93)

Límites máximos permisibles de los parámetros de los contaminantes en las aguas residuales de origen urbano o municipal para su disposición mediante Riego Agrícola.

La presente Norma se basa en el hecho de que la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección del Ambiente señala que las aguas residuales provenientes de los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal podrán utilizarse en la agricultura si cumplen con las NOM correspondientes.

Considerando que en la actualidad las aguas residuales de origen urbano o municipal sin tratar o mezcladas son utilizadas para el riego agrícola y en una importante proporción para el cultivo de hortalizas y otros productos que se consumen crudos; para prevenir el deterioro ecológico y para asegurar la calidad de agua para el bienestar de la población, es necesario controlar, entre otros, los parámetros físicos, químicos y bacteriológicos.

El objetivo de la presente es fijar los límites máximos permisibles de los parámetros físicos y químicos que deben cumplir las aguas de origen urbano o municipal para su disposición mediante riego agrícola.

NOM-CCA-033-ECOL/1993 (Fecha de publicación en el D.O.F. el 18/10/93)

La presente establece las condiciones bacteriológicas para el uso de aguas residuales de origen urbano o municipal o de la mezcla de estas con la de los cuerpos de agua, en el riego de hortalizas y productos hortofrutícolas.

La presente Norma, al igual que la NOM-CCA-032-ECOL/1993, se basa en el hecho de que la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección del Ambiente señala que las aguas residuales provenientes de los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal podrán utilizarse en la agricultura si cumplen con las NOM correspondientes.

Conscientes de que en la actualidad las aguas residuales de origen urbano o municipal sin tratar o mezcladas son utilizadas en el riego agrícola; se establece que como medida de prevención del deterioro ecológico y para evitar problemas sanitarios, es necesario controlar, entre otros, los parámetros bacteriológicos de dichas aguas.

III.6 CRITERIOS ECOLOGICOS DE CALIDAD DEL AGUA (SEDUE)

Los Criterios Ecológicos de Calidad de agua (CE-CCA-001-89) (GACETA ECOLOGICA No. 6; Enero 1990), salieron publicados en el D.O.F. el 2 de diciembre de 1989. Dentro de éstos se precisan los niveles de los parámetros y de las sustancias que se encuentran en el agua, o sus efectos como son color, olor o sabor, potencial de hidrógeno (pH) y sus niveles permisibles; por medio de los cuales, las autoridades competentes podrán calificar a los cuerpos de agua, como aptos para los siguientes usos: como fuente de abastecimiento de agua potable, en actividades recreativas con contacto primario, para riego agrícola, para uso pecuario, para uso en la acuicultura o bien, para el desarrollo y la conservación de la vida acuática.

Para "establecer los niveles de los parámetros y de las sustancias que se encuentran en el agua, se tomó en consideración que, en el país, las condiciones naturales de los cuerpos de agua varían ampliamente en calidad y cantidad; el avanzado deterioro que presentan algunos de estos cuerpos; las condiciones ambientales necesarias para la existencia y desarrollo normal de los organismos en un ecosistema y los diversos efectos que ocasiona la variación de las características físicas, químicas y biológicas del agua, entre especies y aun entre individuos de la misma especie, así como los principales usos del agua."

"Los criterios ecológicos de calidad del agua en la fuente de abastecimiento para agua potable y con fines recreativos, se enfocan a la protección de la salud humana, basándose en las propiedades carcinógenas, tóxicas u organolépticas (color, olor o sabor) de las sustancias, así como en los efectos que éstas puedan causar a los organismos que se encuentran presentes en el agua. En este caso, los criterios no se refieren a la calidad que debe tener el agua para ser ingerida, sino a los niveles permisibles en el cuerpo de agua que se pretenda utilizar para proveer agua para consumo humano."

"Que tratándose de los criterios ecológicos de calidad del agua, para uso recreativo con contacto primario, también se tomó en cuenta, que los cuerpos de agua se utilizan como área de recreación pueden sostener o de hecho sostienen vía acuática y que por tanto deben reunir condiciones que aseguren la protección de la vida de agua dulce o de agua marina, según sea el caso."

"Los criterios ecológicos de calidad del agua para riego agrícola, se definieron considerando su aplicación a todo tipo de cultivo."

"Los criterios ecológicos de calidad del agua para uso pecuario, se establecieron considerando la protección de la salud de los animales domésticos y los destinados a la alimentación del hombre, previendo las posibilidades de bioacumulación de sustancias tóxicas que pudieran afectar la salud humana."

"Los criterios ecológicos del agua para la protección de la vida de agua dulce y agua marina, se fijaron sobre la base de garantizar la sobrevivencia de los organismos acuáticos y evitar el peligro de bioacumulación, previniendo el daño a las especies que forman parte de la cadena alimenticia."

"Los criterios ecológicos de calidad del agua para uso en acuicultura, se establecieron sobre la base de garantizar el crecimiento y el desarrollo de ciertas especies sujetas a cultivo o semicultivo, previendo las posibilidades de bioacumulación de sustancias que pudieran afectar la salud humana por su consumo."

La formulación de dichos criterios ecológicos estuvo a cargo de la SEDUE en coordinación con las Secretarías de Marina, de Agricultura y Recursos Hidráulicos, a través de la Comisión Nacional del Agua, de Salud y de Pesca.

Dentro del artículo 2o. de dichos Criterios Ecológicos se encuentran varias definiciones útiles para el presente trabajo, por lo cual se transcriben enseguida:

Calidad para la protección de la vida de agua dulce: Grado de calidad del agua, requerido para mantener las interacciones e interrelaciones de los organismos vivos, de acuerdo al equilibrio natural de los ecosistemas de agua dulce continental.

Calidad para la protección de la vida de agua marina: Grado de calidad del agua, requerido para mantener las interacciones e interrelaciones de los organismos vivos, de acuerdo al equilibrio natural de los ecosistemas de agua marina.

Calidad para uso en la acuicultura: Grado de calidad del agua, requerido para la prácticas acuiculturales, que garantiza el óptimo crecimiento y desarrollo de las especies cultivadas, así como para proteger su calidad para el consumo humano.

Calidad para riego agrícola: Grado de calidad del agua, requerido para llevar a cabo prácticas de riego sin restricción de tipos de cultivo, tipos de suelo y métodos de riego.

Calidad para uso como fuente de abastecimiento de agua potable: Grado de calidad del agua, requerido para ser utilizada como abastecimiento de agua para consumo humano, debiendo ser sometida a tratamiento, cuando no se ajuste a las disposiciones sanitarias sobre agua potable.

Calidad para uso pecuario: Grado de calidad del agua, requerido para ser utilizada como abastecimiento de agua para consumo por los animales domésticos, que garantiza la protección de su salud y la calidad de los productos para consumo humano.

Calidad para uso recreativo con contacto primario: Grado de calidad del agua, requerido para ser utilizada en actividades de esparcimiento, que garantiza la protección de la salud humana por contacto directo.

III.7 NORMATIVIDAD EN MEXICO PARA LA CALIDAD DEL AGUA USADA PARA RIEGO

Calidad Físico-Química

Por lo que se refiere a la normatividad establecida en México, relativa a la calidad Físico-Química del agua para riego, en la tabla III-1¹ se establecen los límites máximos permisibles de diversos parámetros, basados en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua emitidos por la SEDUE y complementados internamente por la CNA.

Por otra parte, SEDESOL emitió la Norma Oficial Mexicana (NOM-CCAM-032/ECOL/1993) que establece los límites máximos permisibles de diversos parámetros presentes en las aguas residuales de origen urbano o municipal para su disposición mediante riego agrícola, Tabla III-2².

La presente norma establece que "en el caso de que se identifiquen descargas que a pesar del cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos en esta norma causen efectos negativos en el cuerpo receptor (entendiéndose a éste como el terreno de cultivo), la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos a través de la Comisión Nacional del Agua, fijará condiciones particulares de descarga para señalar límites máximos permisibles más estrictos de los parámetros de la tabla anterior, además podrá establecerse límites máximos permisibles si lo considera necesario, en los siguientes parámetros: Demanda química de oxígeno, Fósforo total, Grasas y aceites, Nitrógeno total, Metales pesados que no se incluyen en la tabla anterior,

¹ ING. CALDERON BARTHENEUF JOSE LUIS. Reuso de Aguas Residuales en la Agricultura. Revista de Ingeniería Ambiental año 5 No. 15. Enero 1992.

² Revista de Ingeniería Ambiental. Op. cit.

Relación de adsorción de sodio, Sustancias activas al azul de metileno, Temperatura, Tóxicos orgánicos y Unidades de toxicidad aguada con *Daphna magna*.*

LIMITES MAXIMOS DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS RESIDUALES PARA EL RIEGO AGRICOLA			
PARAMETRO	NIVEL MAXIMO	PARAMETRO	NIVEL MAXIMO
Acroelina	0.1	Fluoruro (como F)	1.0
Aldrín	0.02	Fosfato total*	5.0
Aluminio	5.0	Heptacloro	0.02
Antimonio	0.1	Niquel	0.2
Arsénico	0.1	Nitratos*	30.0
Bicarbonatos*	100.0	Nitrógeno total*	30.0
Berilio	0.1 - 0.5	Plomo	5.0
Boro	0.7 - 3.0	Potasio	250.0
Cadmio	0.01	Potencial de hidrógeno	4.5 - 9.0
Carbonato de sodio residual (meq/l)*	2.5	Relación de adsorción de sodio (meq/l)*	18.0
Cianuro	0.02	Salinidad efectiva (meq/l)*	15.0
Clordano	0.003	Salinidad potencial (meq/l)*	15.0
Cloruros	147.5	Selenio (como selenato)	0.02
Cobre	0.20	Sodio*	250.0
Conductividad eléctrica (umhos/cm)	1000.0	Sólidos disueltos	500.0
Cromo hexavalente	1.0	Sólidos suspendidos	50.0
DDE	0.04	Sulfatos	130.0
Dieldrín	0.02	Toxafeno	0.005
Hierro	5.0	Zinc	2.0
RADIATIVIDAD			
Alfa total (Bq/l)	0.1	Beta total (Bq/l)	1.0

* MANUAL TECNICO PARA EL USO, APROVECHAMIENTO Y MANEJO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN EL RIEGO AGRICOLA. Gerencia de Reutilización del Agua, CNA. México 1990.

TABLA III-1

LIMITES MAXIMOS DE CONTAMINANTES PARA LAS AGUAS RESIDUALES DE ORIGEN URBANO O MUNICIPAL, QUE SE DISPONGAN MEDIANTE RIEGO AGRICOLA		
PARAMETROS FISICOS Y QUIMICOS	UNIDAD DE MEDIDA	LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES
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	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

TABLA III-2

Calidad Bacteriológica

De acuerdo a los estudios realizados en la materia, puede asegurarse que existen daños potenciales a la salud, si los cultivos que se consumen sin cocer son regados con aguas crudas o deficientemente tratadas.

Ante esta problemática, la SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social), la SS (Secretaría de Salud) y la SARH (Secretaría de Recursos Hidráulicos), emitieron la NOM-CCA-033-ECOL/1993 que establece las condiciones para el uso del agua residual de origen urbano y municipal, en el riego agrícola.

Esta NOM califica y condiciona el aprovechamiento del agua residual, restringiendo los cultivos permisibles en función del tipo de riego y la calidad bacteriológica del agua, definida ésta por la presencia de coliformes totales o fecales y huevos de helmintos.

Asimismo, considerando el efecto que provoca la irradiación solar y la falta de humedad en suelos y productos agrícolas, se establecen períodos mínimos entre el último riego y la cosecha, para los cultivos permitidos.

Para los efectos de esta NOM, se consideran las siguientes definiciones:

Hortalizas: Acelga, ajo, apio, berro, betabel, brócoli, cebolla, cilantro, col, coliflor, epazote, espinaca, frijol ejotero, hierbabuena, hongo, lechuga, pápalo, perejil, quelite, quintonil, rábano, zanahoria, pepino pickle, pepino, calabacita, jitomate, tomatillo y tomate verde o de cáscara, con excepción de las cinco últimas cuando se siembren con espaldera. Se equiparan a las hortalizas los siguientes frutos: fresa, jícama, melón, sandía y zarzamora.

Hortifrutícolas: Las señaladas en el párrafo anterior y todas las demás hortalizas y frutos en general."

Dentro de esta Norma, a fin de poder restringir la clase de cultivos regados por este tipo de aguas, éstas se clasifican en base a sus características biológicas, de la siguiente manera:

Tipo 1. La que contenga menos de 1000 coliformes totales por cada 100 ml y ningún huevo de helminto viable por litro de agua.

Tipo 2. La contiene de 1 a 1000 coliformes fecales por cada 100 ml y cuando mas un huevo viable de helminto por litro de agua.

Tipo 3. La que contiene de 1001 a 100,000 coliformes fecales por cada 100 ml.

Tipo 4 . La que contiene más de 100,000 coliformes fecales por cada 100 ml.

Ahora bien, en la tabla III-3, se presentan las restricciones de los tipos de cultivos a regar con estas aguas, de acuerdo a las concentraciones máximas admisibles de coliformes fecales, tipo de riego empleado y el intervalo de tiempo entre el último riego y la cosecha.

RESTRICCIONES DE LOS TIPOS DE CULTIVOS A REGAR CON AGUAS RESIDUALES DE ORIGEN URBANO O MUNICIPAL			
TIPO DE REGO	TIPO DE AGUA	INTERVALO MÍNIMO ENTRE EL ÚLTIMO REGO Y LA COSECHA (días)	CULTIVOS NO PERMITIDOS
INUNDACION	1	20	Los señalados en el art. 3o. fracción III, excepto ajo, pepino, jícama, melón y sandía.
	2	20	Los señalados en el art. 3o. fracción III, excepto el melón y la sandía.
	3	20	Los señalados en el art. 3o. fracción III.
	4	20	Los señalados en el artículo 3o. fracción IV.
SURCO	1	15	Los señalados en el artículo 3o. fracción III, excepto ajo, pepino, jícama, melón y sandía, así como el tomate verde o de cáscara.
		20	Libre cultivo.
	2	20	Los señalados en el artículo 3o. fracción III, excepto ajo, pepino, jícama, melón y sandía, así como el tomate verde o de cáscara.
	3	20	Los señalados en el artículo 3o. fracción III, excepto melón y sandía.
	4	20	Los señalados en el artículo 3o. fracción IV.
	ASPERSION	1	20
2,3,4		20	Los señalados en el artículo 3o. fracción IV.

TABLA III-B

III.8 REGLAMENTO DEL SERVICIO DE AGUA Y DRENAJE PARA EL D.F. (DDF)

El presente reglamento fue expedido por la Asamblea de Representantes del Distrito Federal y publicado en el Diario Oficial de la Federación el 25 de enero de 1990 y en la Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal el 29 de enero de 1990.

De acuerdo con el artículo 1o., "las disposiciones del presente Reglamento son de orden público e interés general y social, y tienen como objeto regular los servicios de agua potable, tratamiento de aguas, drenaje y alcantarillado del Distrito Federal.

En breve se hará la recopilación de aquellos artículos contenidos en el presente Reglamento y que se refieran al uso racional y eficiente del agua potable, así como también aquellos que regulan el aprovechamiento de las aguas residuales.

TITULO SEGUNDO**Del servicio público de agua potable**

Los que a continuación se transcriben, se refieren a las prioridades de uso del agua disponible para uso potable.

"Artículo 6o. El agua de que disponga el Departamento deberá aprovecharse conforme al siguiente orden de prelación:

- I Usos domésticos y unidades hospitalarias;
- II Servicios públicos urbanos;
- III Industria y Comercio;
- IV Agricultura;
- V Acuicultura;
- VI Abrevadero de ganado;
- VII Usos recreativos y
- VIII Otros."

"Artículo 7o. Cuando exista escasez de agua o se presente cualquier otra situación contingente que exija restricciones en su suministro, el Departamento limitará el servicio a la satisfacción de necesidades mínimas. En estos casos, las restricciones se harán siguiendo un orden inverso al señalado en el artículo anterior, previa información a la población afectada."

Del uso responsable, racional y eficiente del agua

Los artículos contenidos dentro de este apartado señalan las medidas que deberán tomarse a nivel domiciliario para hacer un uso eficiente y racional del agua.

De manera especial, es importante transcribir el artículo 31, ya que éste obliga el uso del agua residual tratada en algunos usos específicos.

"Artículo 31. Se prohíbe el uso de agua potable en los procesos de compactación, riego de parques y jardines públicos, así como campos deportivos. En estos casos, se deberá solicitar el suministro de agua residual tratada al Departamento."

TITULO CUARTO **Del Servicio Público de tratamiento de agua**

Los artículos contenidos en este apartado se encuentran encaminados a regular el manejo de las aguas residuales tratadas, lo cual estará a cargo del Departamento del Distrito Federal.

Los artículos citados a continuación, están referidos específicamente a la descripción del tipo de aguas que deberán recibir tratamiento para adecuar su calidad para el reuso, así como la escala de prioridad de aprovechamiento de las aguas residuales.

"Artículo 62. Serán materia de tratamiento, las aguas residuales de origen doméstico e industrial y las pluviales que transporten en suspensión materia orgánica e inorgánica, con el fin de incrementar y diversificar su aprovechamiento."

"Artículo 64. El agua residual que suministre el Departamento, para su reuso o tratamiento, para su reuso o tratamiento proveniente de servicio públicos, comerciales, industriales y domésticos vertida al sistema de alcantarillado del Distrito Federal, deberá aprovechar conforme al siguiente orden de prelación:

- I Servicios públicos; para el riego de áreas verdes y llenado de lagos recreativos;
- II Abrevaderos y vida silvestre;
- III Acuacultura;
- IV Giros mercantiles;
- V Riego de terrenos de cultivo de forrajes y pastura;
- VI Riego de terrenos de productos agrícolas que se consumen crudos que no requieren preparación para su consumo. Esta agua deberá estar libre de contaminantes tóxicos y de organismos patógenos;
- VII Recarga de acuíferos mediante pozos de inyección o estanques de infiltración, previo cumplimiento de las normas de calidad de agua potable y específicamente que fije la autoridad competente en función del origen de las aguas residuales y del uso potencial del acuífero subterráneo;
- VIII Riego de terrenos particulares y limpieza de patios;
- IX Industrial, con fines de equipamiento y limpieza de áreas de servicio;
- X Lavado de vehículos automotores, y
- XI Otros."

El siguiente artículo señala la obligatoriedad de uso de aguas residuales para ciertos procesos industriales que no requieran agua potable.

"Artículo 75. En caso de que algún proceso industrial no requiera agua potable, los usuarios públicos o privados quedan obligados al aprovechamiento de las aguas residuales derivadas del proceso industrial. Para el efecto, instalarán equipos y dispositivos de recirculación o tratamiento de dichas aguas y se obligarán a presentar semestralmente al Departamento, el reporte de los usos y aprovechamiento de las mismas."

Recarga de acuíferos

Este apartado contiene un artículo único, donde se recomienda el uso de aguas pluviales y residuales debidamente tratadas para la recarga de acuíferos. Las aguas residuales tratadas para tal fin, deberán cumplir con las Normas Técnicas correspondientes.

Usos industriales del agua residual tratada

A continuación se cita el artículo único contenido en este apartado, el cual tiene como finalidad el dar a conocer los usos del agua residual tratada autorizados y recomendados por las autoridades dentro del rubro industrial.

"Artículo 77. El agua residual tratada producida en las plantas de tratamiento, libre de compuestos tóxicos y orgánicos patógenos que pongan en peligro la salud, podrá ser empleada por los establecimientos, giros mercantiles y la industria ubicados en el Distrito Federal para los procesos de limpieza, transporte, enfriamiento, generación de vapor, lavado de maquinarias, de unidades automotrices y riego de áreas verdes."

Requerimientos previos y de operación

El único artículo contenido en la presente sección, destaca la necesidad de presentar un estudio de ingeniería aprobado por el Departamento del Distrito Federal, por parte de los interesados en darles un uso directo a las aguas residuales tratadas.

De las Concesiones

Los artículos contenidos dentro de esta sección, exponen los requisitos necesarios para que las autoridades consientan la concesión de las plantas de tratamiento de aguas residuales y pluvial, captadas en el sistema de alcantarillado del Distrito Federa, para que las puedan operar y reutilizar su efluente las particulares.

CAPITULO IV ALTERNATIVAS DE REUSO

INTRODUCCION

El agua constituye un recurso potencialmente inagotable; la naturaleza lo tiene todo perfectamente dispuesto de tal manera que este líquido se renueva mediante su ciclo natural (ciclo hidrológico); no obstante, el progresivo aumento de la población y el rápido proceso de industrialización, han provocado la demanda creciente del agua, lo que, unido al deterioro de la calidad de los recursos existentes, generan una situación generalizada de escasez de recursos, tanto en cantidad como en calidad, y que el tema de la reutilización pase a un primer plano y se incluya como un elemento muy importante dentro del ciclo del agua.

La reutilización del agua no constituye una novedad para el hombre, sino que al contrario, constituye una consecuencia natural de un hecho básico: la cantidad de agua existente en la actualidad en el planeta es, esencialmente la misma que cuando éste se formó. Por tanto, el agua se mueve dentro de un ciclo estrictamente cerrado (sin posibilidad de aportaciones externas).

No obstante, hasta épocas relativamente recientes, la práctica del reuso dentro del ciclo del agua tenía un carácter inintencional, indirecto y de muy poca cuantía. Es tiempo de dar un giro completo a la política del agua y considerar el reuso tanto directo como indirecto de las aguas residuales tratadas, como una alternativa de solución a la problemática del agua.

En el párrafo anterior aparecen los conceptos de reuso directo y reuso indirecto de las aguas residuales, por lo que es necesario definir estos conceptos:

Se entenderá por **reuso directo** de las aguas residuales tratadas, aquella alternativa que involucra el aprovechamiento directo del efluente de la planta de tratamiento, ya sea por medio de su conducción hasta el sitio de utilización, o bien, mediante su inyección en la red de abastecimiento de agua residual.

Un **reuso indirecto** de las aguas residuales tratadas involucra el uso como fuente de abastecimiento de las aguas provenientes de recursos acuíferos recargados con aguas residuales tratadas, como también la utilización de corrientes naturales que contengan efluentes tratados diluidos previamente en dichos cuerpos de agua.

Adicional a los conceptos anteriores, es necesario definir el concepto de **recirculación** de aguas residuales, el cual se aplica a la operación de reuso de un agua residual para el mismo fin o proceso que la generó. La recirculación es comúnmente empleada en algunos procesos industriales.

El objetivo del presente capítulo es la presentación y evaluación de las distintas alternativas de reuso. Los capítulos precedentes conforman la base técnica y legal para la evaluación de dichas alternativas.

El desarrollo del presente capítulo comienza con la presentación en forma general, de las diversas alternativas de reuso, así como de los principales problemas potenciales que pudieran suscitarse en su aplicación. Posteriormente, se procede al análisis sistemático de las diversas alternativas.

El análisis comparativo de las diversas alternativas contendrá en términos generales la siguiente información: requisitos de calidad, requisitos sanitarios y legales y las ventajas y /o desventajas que ofrece dicha alternativa en su implantación.

IV.1 ALTERNATIVAS DE REUSO

Durante mucho tiempo ha sido tema de alto interés de muchos países la búsqueda de fuentes alternas para el aprovisionamiento de agua, ya que el acelerado crecimiento poblacional obliga a que se tomen medidas drásticas en cuanto a su uso, aprovechamiento y reutilización. El tratamiento y reuso del agua, constituirá por ende en los próximos años la salida más viable para satisfacer la demanda del vital líquido en zonas críticas.

Las principales ventajas derivadas del aprovechamiento de las aguas residuales, en términos generales son las siguientes:

- 1) Coadyuva en forma importante al abatimiento de los caudales de aguas residuales por disponer, por lo que se reducen de manera importante los problemas que acarrea su alejamiento y disposición.
- 2) Alivia la escasez del recurso hidráulico en aquellas zonas que poseen conflictos de agua.
- 3) Debido a que el aspecto de usos del agua es muy amplio, los niveles de calidad requeridos para cada uso también poseen un gran margen de variabilidad.
- 4) Constituye una fuente adicional, segura y creciente que garantiza la satisfacción de la demanda de agua en la zona.
- 5) En muchas zonas y casos particulares es más económico utilizar aguas residuales que aguas blancas.
- 6) Se retarda la saturación de la capacidad de los sistemas de drenaje y se disminuyen los costos de construcción y operación.

IV.1.1 EVALUACION DE POSIBILIDADES DE REUSO

La evaluación de las posibilidades de reuso se puede llevar a cabo mediante un análisis de costo-efectividad en lugar de un análisis costo-beneficio. La principal razón de aplicación de tal análisis a problemas de este tipo, es que algunas de las metas que se fijan no son cuantificables fácilmente en términos económicos, tales como los riesgos a la salud, la aceptación o rechazo del público a ciertos usos del agua tratada y la preservación del medio ambiente. A continuación se mencionan las medidas de efectividad utilizadas, las cuales permitirán identificar la prioridad de implantación, de acuerdo con su potencial.

1) Beneficio económico

Dentro de esta etapa se estiman los costos de producción de agua, sometida a diferentes niveles de tratamiento y se compara con los costos de extracción y conducción del agua desde las fuentes de abastecimiento alternas.

2) Costo económico

Los costos referidos a esta etapa son aquellos que se encuentran asociados al logro del nivel de tratamiento requerido para las aguas residuales.

3) Riesgos de daños al ambiente

Se evalúa el impacto que producen en el ambiente los contaminantes no eliminados en las aguas tratadas, así como las acciones involucradas en la implantación del proyecto.

4) Contribución al abastecimiento de agua

Cada alternativa se evalúa en función de su potencial de aprovechamiento.

5) Diversificación de los usos

Con esta medida se pretende evaluar la capacidad de cada alternativa para ampliar su uso en un momento determinado.

6) Riesgos a la salud

Se evalúan los riesgos de dañar la salud de los usuarios durante las prácticas usuales en el manejo del agua.

7) Caudal de aguas residuales utilizado

Se califica de cierta manera, además del volumen de aprovechamiento, el aumento creciente de dicho volumen, contribuyendo de tal manera al control de la contaminación.

8) Nivel de tratamiento requerido

El nivel de tratamiento requerido se refiere al grado de tratamiento necesario para alcanzar el nivel de calidad requerido al uso al que se destina. En esta etapa se evalúa la dificultad que representa el lograr dicha calidad, de acuerdo a la tecnología disponible.

9) Confiabilidad del sistema de tratamiento

Esta medida determina la confiabilidad del sistema de tratamiento para producir un efluente con la calidad establecida, dentro de un cierto rango de variación.

10) Cumplimiento con los criterios de calidad

Se evalúa la dificultad que enfrenta el sistema de tratamiento para alcanzar la calidad requerida, de forma que pueda asegurarse un aprovechamiento seguro y confiable de las aguas.

11) Tecnología requerida para el tratamiento

Esta etapa consiste en la evaluación de la disponibilidad de tecnología y equipo necesario para el tratamiento del agua residual, a fin de asegurar que se cumpla con los criterios de calidad requeridos.

12) Recursos humanos

Evalúa la disponibilidad de personal preparado en todas las áreas relacionadas con el establecimiento, administración y control del sistema, para cada una de las posibilidades analizadas.

13) Aceptación pública

La aceptación pública interviene de manera decisiva en la puesta en marcha de los proyectos de reuso, de ahí que deba realizarse un análisis exhaustivo dentro de la comunidad, principalmente entre los usuarios potenciales, con la finalidad de definir y asegurar el mercado de las aguas tratadas.

Dentro de la tabla IV-1¹ se presentan de manera general las diversas alternativas de reuso, así como los problemas potenciales que puedan presentarse en cada una de ellas. Aunque, todos ellos son factibles desde el punto de vista técnico, sin embargo existen otro tipo de factores (económicos, legales, sanitarios, aceptación pública, etc.), que influyen de manera decisiva en la elección y puesta en marcha de los proyectos de reuso.

IV.2 RIEGO AGRICOLA

Antecedentes

El uso de las aguas residuales crudas para riego agrícola, es una práctica que se ha venido desarrollando sin ningún control en varias naciones. Las épocas modernas reclaman sin embargo, que dichas prácticas se lleven a cabo dentro de un marco de control y rigor científico para eliminar efectos adversos. Para evitar o disminuir dichos efectos adversos, es necesario sustituir las aguas residuales crudas por aguas residuales tratadas, por lo que, el uso de las aguas residuales tratadas reduce por un lado el déficit de aportaciones hídricas que padece la agricultura de muchas regiones, y a la vez añade al terreno elementos fertilizantes, completa la depuración de las aguas por la acción conjunta de cultivos-suelos y mejora la estructura del suelo.

IV.2.1 Calidad del agua para Riego

El grado de depuración que exigen las aguas residuales que serán utilizadas para riego depende, en primer lugar, de la clase de cultivos y del tipo de suelo que se deseen regar, pero también de las condiciones climatológicas de la zona de estudio, del sistema de riego, época de lluvias y otros factores de menor importancia. Debido a ello, caben según las condiciones particulares de cada proyecto, todos los grados de depuración desde la aplicación directa al terreno de las aguas residuales crudas, aun sin desinfección previa, hasta el tratamiento terciario mas completo.

¹ METCALF-EDDY. Tratamiento, Evacuación y Reutilización de las aguas residuales. Edit. Labor. 3a. Edición. (pág 1143)

ALTERNATIVAS DE REUSO	
CATEGORIAS DE REUSO	PROBLEMAS POTENCIALES
RIEGO AGRICOLA Riego de cultivos Viveros comerciales RIEGO DE AREAS VERDES Parques Jardines públicos Campos de golf Cementerios Residencias	Contaminación de corrientes superficiales y acuíferos subterráneos. Rechazo y problemas de comercialización de los productos cosechados. Disminución de calidad de los cultivos. Alteración de las características del suelo. Riesgo a la salud pública por contaminación de virus patógenos. Algunos proyectos de riego requieren una zona de amortiguamiento para minimizar los riesgos de los aerosoles para la salud pública, lo cual pudiera significar altos costos de inversión.
REUSO Y RECICLAJE INDUSTRIALES Sistemas de enfriamiento Agua de alimentación a la caldera Agua de procesos Construcción pesada	Algunos elementos presentes en el agua residual tratada pueden causar problemas de incrustación, corrosión, crecimientos biológicos y putrefacción, en las instalaciones industriales. Se puede causar problemas sanitarios por la transmisión en forma de aerosoles de agentes patógenos contenidos en el agua de enfriamiento.
RECARGA DE ACUIFEROS Recarga de acuíferos subterráneos Control de intrusión salina Control de hundimiento del terreno	Toxicidad producto de compuestos presentes en el agua residual. Acarreo de sólidos disueltos totales, nitratos y gérmenes patógenos hasta el agua subterránea.
USOS RECREATIVOS Lagos y Lagunas Mantenimiento y/o aumento de zonas pantanosas Aumento de caudales en corrientes superficiales Zonas pesqueras Fábrica de hielo o nieve	Problemas sanitarios por la presencia de bacterias y virus en el agua. Eutroficación debido al Nitrógeno y Fósforo. Presencia de algunos elementos tóxicos para la vida acuática.
USOS MUNICIPALES NO POTABLES Control de incendios Sistema de aire acondicionado Excusados de fluxómetro	Problemas sanitarios por la transmisión de gérmenes patógenos a través de los aerosoles. Efectos de incrustación, corrosión, crecimientos biológicos y polución en las instalaciones.
REUSO POTABLE Como fuente adicional de suministro de agua potable Como fuente de suministro de agua potable	La presencia de algunos elementos tóxicos, principalmente elementos traza. Rechazo por parte del público consumidor por factores estéticos. Problemas sanitarios debidos a la presencia de micro organismos, patógenos, principalmente los virus.

TABLA IV-1

Es importante, por lo tanto, establecer los criterios generales que determinan en qué casos y bajo qué condiciones proceden los distintos niveles de calidad del agua de riego²:

a) No se precisa, en términos generales, tratamiento alguno en el riego de otoño e invierno de barbechos, plantaciones de frutos secos, cosechas para semilla y grano y cuando se emplee la sub-irrigación. Hay que advertir, sin embargo, que puede haber razones especiales que, aún tratándose de los aprovechamientos mencionados, se precise de una calidad diferente. El uso de este tipo de aguas es recomendable en zonas con alta o buena pluviometría.

b) Las aguas residuales con un grado de tratamiento primario pueden usarse para el riego de vegetales que no sean consumidos frescos; además, el terreno deberá contar con un sistema de drenaje adecuado. Este tipo de uso es recomendable en regiones con alta o buena precipitación.

c) Se precisa un agua con nivel de tratamiento secundario para el riego de forrajes, árboles frutales y ciertas hortalizas; siempre que se cumplan las correspondientes normas sanitarias y se deje transcurrir un determinado tiempo, según el producto o cultivo, entre el último riego y la recolección.

d) Las aguas sometidas a un tratamiento terciario, pueden usarse para regar cualquier clase de plantas y cultivos, siempre que se respeten para cada cosecha o aprovechamiento, los intervalos necesarios entre el último riego y la recolección.

1) Calidad físico-química

Es de vital importancia el cuidado de la calidad del agua que se utilizará para riego, primordialmente en zonas áridas donde se tengan temperaturas extremas, baja humedad ambiental y consecuentemente una tasa alta de evapotranspiración. Lo anterior se debe a que la calidad del agua viene dada primordialmente por el tipo y cantidades de sales contenidas en solución en el agua de riego, las cuales como consecuencia de la evapotranspiración tienden a acumularse en las capas del suelo, alterando sus propiedades tanto físicas como mecánicas. Por lo anterior, es importante considerar estos aspectos cuando se pretenda utilizar el agua residual tratada para el riego.

En la tabla IV-2³ se presenta a manera de ejemplo una guía práctica de la calidad del agua para el riego, desarrollada por el Comité de Consulta de la Universidad de California, la cual es aplicable tanto para el uso del agua potable como del agua residual tratada. Dentro de la tabla los parámetros de control se encuentran clasificados en cuatro categorías principales de acuerdo a los problemas potenciales que se pudieran ocasionar.

² Dr. JOSE BAQUERO DE LA CRUZ. Reutilización de aguas residuales con destino al riego. Conferencia Nacional sobre Hidrología General y aplicada SMAGUA-78 Zaragoza, España.

³ METCALF-EDDY. Op. Cit. (Pág. 1146)

CALIDAD DE AGUA PARA RIEGO				
PARAMETRO DE CONTROL	UNIDAD	GRADO DE RESTRICCIÓN DE USO		
		NINGUNO	ESCASO A MODERADO	ALTO
SALINIDAD (disminuye la disponibilidad de agua para los cultivos)				
CE (Salinidad del agua de irrigación; medida en términos de conductividad eléctrica)	dS/m o mmho/cm	< 0.7	0.7 - 3.0	> 3.0
SDT (Sólidos disueltos totales)	mg/l	< 450	450 - 2,000	> 2,000
PERMEABILIDAD (afecta la tasa de infiltración de agua en el suelo. Comúnmente se evalúa en base de la CE y RAS (Relación de absorción de sodio) o adj. R_{Na} (Relación ajustada de absorción de sodio))				
RAS: 0 - 3	y CE	≥ 0.7	0.7 - 0.2	< 0.2
3 - 6		≥ 1.2	1.2 - 0.3	< 0.3
6 - 12		≥ 1.9	1.9 - 0.5	< 0.5
12 - 20		≥ 2.9	2.9 - 1.3	< 1.3
20 - 40		≥ 5.0	5.0 - 2.9	< 2.9
TOXICIDAD POR IONES ESPECIFICOS (afecta la sensibilidad de los cultivos)				
Sodio (Na)				
Riego superficial	RAS	< 3	3 - 9	> 9
Riego por aspersión	mg/l	< 70	> 70	
Cloro (Cl)				
Riego superficial	mg/l	< 140	140 - 350	> 350
Riego por aspersión	mg/l	< 100	> 100	
Boro (B)	mg/l	< 0.7	0.7 - 3.0	> 3.0
OTROS (afectan a cultivos sensibles)				
Nitrógeno total	mg/l	< 5	5 - 30	> 30
Bicarbonato (HCO_3)	mg/l	< 90	90 - 500	> 500
pH	unidad	Rango normal 6.5 - 8.4		
Cloro residual	mg/l	< 1.0	1.0 - 5.0	> 5.0

TABLA IV-2

2) Salinidad

Es el parámetro más importante de evaluación de un recurso acuífero para el riego. La salinidad de un agua se cuantifica mediante el análisis de su conductividad eléctrica; cabe recalcar que éste análisis también puede ser usado como sustituto en la determinación del contenido total de sólidos disueltos. La conductividad eléctrica (CE) suele ser expresada en mmho/scm, decisiemens por metro (dS/m) o sólidos disueltos totales (SDT) en mg/l. Un mmho/cm es equivalente a un dS/m.

La presencia de sales en el agua de riego afecta el crecimiento de los cultivos, produciendo efectos tales como: a) alteración de los efectos osmóticos, b) concentración de iones tóxicos y c) dispersión de las partículas del suelo.

Las sales contenidas en el agua de riego tienden a concentrarse en la zona radicular, como consecuencia de la evapotranspiración. Cuando ésta adquiere valores elevados, la fuerza de succión de las raíces no puede vencer conjuntamente al potencial del suelo y al potencial osmótico de las sales, lo que se traduce en la falta de absorción de alimentos y elementos vitales para la planta, así como en una serie de trastornos fisiológicos y morfológicos que llegan a ocasionar su marchitez y muerte o cuando menos, un desarrollo irregular con el consiguiente descenso del rendimiento en la producción.

Para dar solución al problema de concentración de sales, es necesario que se establezca un flujo descendente de agua debajo de la zona radicular, de manera que también sea acarreada la concentración excedente de sales.

De todo lo expuesto anteriormente resulta la imperiosa necesidad de que toda área que pretenda ser regada con aguas residuales tratadas, deberá contar con un sistema de drenaje adecuado.

3) Toxicidad por iones específicos

El agua residual en algunas ocasiones tiene presente algunos iones como son: sodio, cloruro y boro. Ahora bien, si éstas aguas pretenden ser utilizadas para riego y se tienen presentes concentraciones elevadas de dichos iones, esto provocará el intoxicamiento de los cultivos, lo cual se manifiesta en un decaimiento de los mismos. El ion tóxico más comúnmente encontrado en las aguas recicladas de origen municipal es el boro (B), el cual tiene su origen en los detergentes domésticos y en las descargas de algunas plantas industriales. Las concentraciones de cloro (Cl) y sodio (Na) se han estado incrementando, como consecuencia de algunos productos domésticos y en especial los ablandadores de agua.

El exceso de Na da lugar a quemaduras en los bordes y nervios de las hojas que, extendiéndose más tarde, llegan a destruirlas por completo; los cloruros producen la defoliación y caída prematura del follaje; el exceso de B origina el moteado y sequedad de los tejidos, observándose, asimismo, gomosis y exudaciones en las ramas y en el tronco; demasiadas

dosis o cantidades de bicarbonatos forman depósitos blanquecinos en hojas y frutos; y el exceso de oligoelementos causa efectos análogos o más nocivos en las plantas.

El problema de toxicidad por iones específicos se ve acrecentado en climas calurosos y secos debido a los altos valores de evapotranspiración. En la tabla IV.3⁴ se presentan los límites máximos de concentración de elementos traza recomendables para aguas de riego. Los efectos que pudiesen presentarse si se tienen niveles de concentración mas altos que los presentados en la tabla, son: acumulación de elementos en las plantas y suelo que pudieran resultar peligrosos a la salud, tanto de humanos como de animales y ser letal para los cultivos.

CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS TRAZA RECOMENDABLES EN AGUAS DE RIEGO		
ELEMENTO	CONCENTRACION MAXIMA RECOMENDADA (mg/l)	OBSERVACIONES
Al (Aluminio)	5.0	Puede provocar Improductividad en suelos ácidos (pH < 5.5). En suelos alcalinos (pH > 5.5) se produce su precipitación, eliminándose cualquier riesgo de toxicidad.
As (Arsénico)	0.10	Tóxico para los cultivos. Su toxicidad varía de 12 mg/l a 0.05 de acuerdo a la sensibilidad de los cultivos.
Be (Berilio)	0.10	Tóxico para los cultivos. Su toxicidad varía de 5 mg/l a 0.5 mg/l de acuerdo a la sensibilidad de los cultivos.
Cd (cadmio)	0.10	Tóxico a ciertos cultivos en concentraciones tan bajas como 0.1 mg/l. Su acumulación en cultivos y suelos puede resultar peligroso para los seres humanos.
Co (Cobalto)	0.05	Tóxico a las plantas de tomate en concentraciones tan bajas como 0.1 mg/l. Es inactivado en suelos neutros y alcalinos.
Cr (Cromo)	0.10	No es un elemento necesario para el crecimiento de los cultivos. Se desconoce su efecto tóxico en las plantas.
Cu (Cobre)	0.20	Tóxicos para algunos cultivos en concentraciones que van desde 0.1 a 10 mg/l.
F (Fluor)	1.0	Inactivados en suelos neutros y alcalinos.
Fe (Hierro)	5.0	Tóxico a los cultivos, excepto en suelos aireados, donde además contribuye a la acidificación del suelo y provoca la pérdida de capacidad del suelo para la reducción del fósforo y molibdeno.

⁴ MITCALF-EDDY. Op. Cit. (pág. 1149)

CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS TRAZA RECOMENDABLES EN AGUAS DE REUSO		
ELEMENTO	CONCENTRACION MAXIMA RECOMENDADA (mg/l)	OBSERVACIONES
Al (Aluminio)	5.0	Puede provocar improductividad en suelos ácidos (pH < 5.5). En suelos alcalinos (pH > 5.5) se produce su precipitación, eliminándose cualquier riesgo de toxicidad.
As (Arsénico)	0.10	Tóxico para los cultivos. Su toxicidad varía de 12 mg/l a 0.05 de acuerdo a la sensibilidad de los cultivos.
Be (Berilio)	0.10	Tóxico para los cultivos. Su toxicidad varía de 5 mg/l a 0.5 mg/l de acuerdo a la sensibilidad de los cultivos.
Cd (cadmio)	0.10	Tóxico a ciertos cultivos en concentraciones tan bajas como 0.1 mg/l. Su acumulación en cultivos y suelos puede resultar peligroso para los seres humanos.
Li (Litio)	2.5	Tolerable para la mayoría de los cultivos hasta 5 mg/l; pero en suelos el nivel máximo tolerable es variable. Resulta ser tóxico a los críticos en muy bajas concentraciones (> 0.075 mg/l).
Ba (Boro)	2.5	Idem
Mn (Manganeso)	0.20	Por lo general, solo se da en suelos ácidos; tóxico a un gran número de cultivos en concentraciones que van desde unos cuantos décimos de mg hasta unos cuantos miligramos/l.
Mo (Molibdeno)	0.010	No es tóxico a los cultivos si se encuentra en concentraciones naturales en el suelo y/o el agua. Puede resultar tóxico para el ganado que consuma forraje cultivado en suelos con niveles altos de contenido de Molibdeno.
Ni (Niquel)	0.20	Tóxico a un gran número de cultivos en concentraciones que van de 0.5 - 1.0 mg/l; dicha toxicidad es reducida a niveles de pH neutros o alcalinos.
Pb (Plomo)	5.0	A muy altas concentraciones, puede inhibir el desarrollo y crecimiento de los cultivos.
Se (Selenio)	0.02	Tóxico a los cultivos en concentraciones muy bajas (0.025 mg/l). Es un elemento esencial para los animales pero en concentraciones muy bajas. Puede resultar tóxico para el ganado alimentado con forraje crecido en suelos con niveles relativamente altos de Se.

CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS TRAZA RECOMENDABLES EN AGUAS DE RIEGO		
ELEMENTO	CONCENTRACION MAXIMA RECOMENDADA (mg/l)	OBSERVACIONES
Al (Aluminio)	5.0	Puede provocar improductividad en suelos ácidos (pH < 5.5). En suelos alcalinos (pH > 5.5) se produce su precipitación, eliminándose cualquier riesgo de toxicidad.
As (Arsénico)	0.10	Tóxico para los cultivos. Su toxicidad varía de 12 mg/l a 0.05 de acuerdo a la sensibilidad de los cultivos.
Be (Berilio)	0.10	Tóxico para los cultivos. Su toxicidad varía de 5 mg/l a 0.5 mg/l de acuerdo a la sensibilidad de los cultivos.
Cd (cadmio)	0.10	Tóxico a ciertos cultivos en concentraciones tan bajas como 0.1 mg/l. Su acumulación en cultivos y suelos puede resultar peligroso para los seres humanos.
Sn (Estaño)	-	Es rechazado efectivamente por los cultivos; se desconocen los niveles máximos de tolerancia.
Ti (Titanio)	-	Idem
W (Tungsteno)	-	Idem
V (Vanadio)	0.10	Tóxico a muchos cultivos en concentraciones relativamente bajas.
Zn (Zinc)	2.0	Tóxico a muchos cultivos en un amplio rango de concentraciones; se toxicidad es reducida a niveles de pH > 6.0, en suelos orgánicos y en suelos de fina textura.

TABLA IV-5

4) Alteración de la tasa de infiltración del agua

Cuando el agua de riego presenta altas concentraciones de sodio, éste tiende a alterar las condiciones físicas del suelo por medio de la formación de una costra superficial y de la reducción de la permeabilidad del suelo, provocando con ésto su inundación.

Si la tasa de infiltración es muy baja, es prácticamente imposible que el cultivo pueda disponer del agua suficiente para su desarrollo adecuado. De lo anterior resulta la importancia de una tasa de infiltración adecuada en un suelo destinado al cultivo, porque de lo contrario, se hará necesario el sustituir la capa del suelo que se encuentre afectada, para el desarrollo adecuado de los cultivos.

5) Altas concentraciones de nutrientes

Las aguas recicladas de origen municipal acarrear consigo una gran cantidad de elementos, algunos de los cuales resultan ser de gran valor fertilizante, tales como Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Zinc (Zn), Boro (B) y Azufre (S). Sin embargo, el más importante y más frecuentemente encontrado en las aguas residuales de origen municipal es el Nitrógeno (N).

La presencia del nitrógeno en las primeras etapas del cultivo es muy importante para su adecuado crecimiento, sin embargo, su presencia en altas concentraciones en las últimas etapas va en detrimento de los cultivos, ya que provoca el crecimiento excesivo de hierbas, detención o demora del crecimiento, desigual maduración o reducción de la calidad del cultivo. Por lo anterior, es recomendable tenerse una fuente alternativa de agua con una menor concentración de nitrógeno, ya sea para sustituir a la anterior, o bien como agua de dilución para reducir la concentración de nitrógeno.

6) Otros

Se ha observado que, cuando se utilizan los sistemas de riego por aspersión o por goteo con efluentes provenientes de lagunas primarias y de oxidación, se presentan problemas de taponamiento de las instalaciones debido a los crecimiento biológicos.

Cuando el agua reciclada que se pretende utilizar para riego ha sido clorada, el cloro residual debe encontrarse en concentración menor a 1 mg/l para no afectar el follaje de los cultivos, de lo contrario, puede causarse un gran deterioro al follaje del cultivo si es que el agua le es rociada directamente.

IV.2.2 Requisitos Sanitarios y Legales

Las aguas residuales recicladas poseen una gran cantidad de elementos constituyentes, dentro de las cuales se tienen algunos elementos importantes desde el punto de vista sanitario, los cuales se clasifican en biológicos y químicos. Ahora bien, si el agua residual reciclada es utilizada para riego, los agentes biológicos que representan los mayores riesgos sanitarios son: bacterias patógenas, helmintos, protozoos y virus.

Con fin de proteger la salud pública, se han realizado incesantes esfuerzos para establecer las condiciones y reglamentación que permita el uso seguro del agua residual para riego. Como se mencionó con anterioridad (capítulo III), actualmente (1995) existen dos normas oficiales mexicanas que establecen las condiciones para el uso de las aguas residuales de origen urbano o municipal o de la mezcla de éstas con la de los cuerpos de agua, en el riego agrícola. Las normas anteriormente citadas son:

a) NOM-CCA-032/93

La presente establece los límites máximos permisibles de los parámetros físicos y químicos que deben cumplir las aguas de origen urbano o municipal para su disposición mediante riego agrícola.

b) NOM-CCA-033/93

Esta norma establece 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, en el riego agrícola.

Por otro lado, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido una serie de normas y recomendaciones para el reuso de las aguas residuales tratadas. Establece por ejemplo que aquellos cultivos que se consuman crudos, solo podrán ser regados usando aguas con un nivel de tratamiento biológico y desinfección, de forma que se alcance un nivel menor de 100/ni en el 80 % de las muestras. Los criterios recomendados por las OMS para riego con aguas residuales tratadas constituyen una muy buena base para el desarrollo de la reglamentación particular de cada país, el cual ajusta los criterios de acuerdo a sus condiciones y necesidades particulares.

IV.2.3 Ventajas y Desventajas del uso del agua residual tratada para Riego

La opción del reuso de agua residual tratada para riego constituye una de las opciones que mayores ventajas representa, ya sea por el bajo nivel de tratamiento que requiere, como por la gran oportunidad que reporta como fuente de abastecimiento a las zonas de gran escasez para el riego, permitiendo también la apertura de nuevas tierras al cultivo. Atendiendo a lo anterior, ésta alternativa de reuso merece un trato especial, por lo que a continuación se presenta de manera general las ventajas y desventajas que presenta esta opción de reuso.

VENTAJAS

Las principales ventajas del uso de las aguas residuales renovadas para el riego agrícola son:

a) Aporta caudales adicionales, cuando las precipitaciones no bastan para atender las demandas o pérdidas de evapotranspiración, percolación y escorrentía, asegurando el abastecimiento del agua requerido por los cultivos para su pleno desarrollo.

b) Permite distraer volúmenes de agua natural hacia los aprovechamientos preferentes como es el abastecimiento a las poblaciones.

- c) Adiciona elementos nutrientes al suelo requeridos por los cultivos; lo que redundaría en el ahorro de abonos.
- d) Establece la posibilidad de atender a una mayor gama de cultivos que no estén condicionados por la falta de recursos hídricos de la zona.
- e) Proporciona una posibilidad económica para disponer las aguas residuales y así prevenir la contaminación y problemas sanitarios. Se puede afirmar también que, al utilizar éste método de disposición se reduce drásticamente la contaminación de aguas subterráneas y la eutrofización de ríos y lagos.
- f) Se aprovecha la capacidad de depuración del suelo, para aplicar un proceso de tratamiento adicional al agua aplicada.
- g) Se recuperan suelos inutilizados por exceso de sales.
- h) En zonas áridas, el agua residual resulta ser la fuente de abastecimiento más barata. Significando en algunos casos, la única fuente de suministro factible.

DESVENTAJAS

- a) En algunas ocasiones puede producirse la acumulación de salinidad en los suelos, lo cual restringe la selección del cultivo de acuerdo a la sensibilidad de éstos a las sales.
- b) El exceso de elementos fertilizantes, especialmente de Nitrógeno, origina trastornos en los cultivos, incrementando el desarrollo vegetativo de las plantas, pero disminuyendo la producción y retrasando la maduración. Lo mismo se puede decir del Fósforo y Potasio.
- c) El riego con aguas residuales tratadas puede adicionar algunos elementos tóxicos a los suelos, lo cual pudiera llegar a ocasionar grandes trastornos en el desarrollo y rendimiento de las cosechas y perjudicando, en el menor de los casos, su valor comercial.
- d) El agua residual tratada puede taponar los orificios de los sistemas de irrigación y atascar los poros del suelo, cuando éste es arcilloso.
- e) Cuando el agua residual no está debidamente tratada, se puede contaminar el medio ambiente.
- f) El caudal requerido para riego presenta amplias fluctuaciones, las cuales dependen de la época estacional del año y de las variaciones de la tasa de producción de algunas plantas de tratamiento, por lo que se hace patente la necesidad de almacenar el agua residual tratada con la finalidad de regular su distribución.

IV.3 REUSO INDUSTRIAL

Antecedentes

Usos del Agua en la Industria

Los usos del agua en la industria son muy diversos, dependiendo de la actividad industrial y de la fase del proceso de fabricación, materias empleadas, etc. No obstante se pueden señalar los siguientes usos generales:

- 1.- Transporte de materiales (materias primas, residuos, subproductos, etc.).
- 2.- Clasificación de materiales (sedimentación o flotación de materiales con distintos pesos específicos).
- 3.- Operaciones de lavado (materias primas y productos, lavado de equipos e instalaciones).
- 4.- Materia prima (como elemento que se incorpora al producto).
- 5.- Agua de proceso.
- 6.- Generación de vapor.
- 7.- Refrigeración.
- 8.- Aire acondicionado.
- 9.- Generación de energía eléctrica.

Características de los efluentes industriales

Análogamente, también se puede establecer una clasificación genérica de los efluentes de la siguiente forma:

- 1.- Aguas pluviales que se contaminan con las superficies de escorrentía (depósitos, patios, escombreras, etc.)
- 2.- Aguas residuales de tipo doméstico (comedores, servicios, etc.)
- 3.- Aguas de enfriamiento en circuito abierto.
- 4.- Purgas de circuitos cerrados de refrigeración.
- 5.- Aguas de proceso (líquidos residuales concentrados) y lavado.
- 6.- Efluentes de regeneración de instalaciones de descalcificación o desmineralización.
- 7.- Aguas de limpieza de naves y equipos de fabricación.
- 8.- Aguas de transporte y clasificación de materiales.

La característica más relevante de los efluentes industriales es su variabilidad. Variabilidad no sólo entre efluentes de las diversas industrias, sino también dentro de un tipo de industria como resultado de la organización interna del proceso, del grado de modernización de los equipos, del grado de recuperación de subproductos, de las características estacionales de la producción, de la variabilidad en el amplísimo espectro de sustancias contaminantes y sus concentraciones, etc.

De manera general, se pueden establecer las siguientes características de los efluentes industriales:

a) Las características generales de las aguas pluviales dependen en gran medida de las características de urbanización y disposición general de la planta industrial, la existencia de zonas de almacenamiento de productos o subproductos, etc., por lo que, tanto su volumen como composición de las aguas puede ser muy variable.

b) Las aguas residuales de tipo doméstico poseen características casi constantes por tratarse de aguas residuales domésticas y no suelen revestir importancia dentro del total de los efluentes.

c) Las aguas de refrigeración constituyen los efluentes que, normalmente, en mayor volumen suele producirse; son los menos contaminados siendo su contaminación generalmente del tipo térmico, por lo que son los efluentes más importantes desde el punto de vista de reutilización.

d) Los efluentes de purgas de calderas de circuitos cerrados de refrigeración y los efluentes de regeneración de instalaciones de descalcificación o desmineralización suponen un volumen pequeño y relativamente poco contaminado, pudiendo citarse su temperatura, alcalinidad y a veces, un cierto contenido en materia orgánica.

e) Las aguas de proceso son, en la mayoría de los casos, los portadores de la mayor parte de la contaminación total de las industrias, pudiendo contener sólidos en suspensión, sustancias que alteran el pH, sustancias de naturaleza orgánica e inorgánica en estado disuelto, líquidos inmiscibles y sustancias contaminantes.

f) Las aguas provenientes de la limpieza de naves y equipos de fabricación pueden contener sustancias muy similares a las aguas del inciso anterior.

g) Las aguas de transporte y clasificación de materiales pueden resultar de importancia en algún tipo de industrias, aunque su contaminación es de poca cuantía y generalmente es debida a sólidos separables por medios sencillos.

Demanda de agua en la Industria

La demanda de agua para la industria es muy variable, dependiendo de diversos factores tales como el tipo de industria, el grado de modernización de la misma, el tipo de proceso empleado en cada actividad, la organización interna de los procesos productivos, la abundancia o escasez de recursos acuíferos, etc., lo cual dificulta establecer cifras concretas.

IV.3.1 Reutilización del agua en la industria

La reutilización de efluentes en la industria puede contemplarse de la siguiente forma:

1) **Reutilización externa**, la cual implica el empleo de efluentes cuyo origen es exterior a la industria, tales como los efluentes municipales o de otras industrias.

2) **Reutilización interna**, de los propios efluentes originados en la industria.

Reutilización externa de efluentes municipales

La atractividad de utilización de los efluentes municipales en la industria, se debe a que éstos poseen dos características particulares que les confiere mayor peso sobre las otras fuentes y que resultan de gran importancia:

a) Son los únicos cuyo caudal está asegurado en todas las épocas del año y cuyo volumen está en constante aumento.

b) Su calidad es muy constante.

El uso más extendido de las aguas residuales tratadas de origen municipal es, para enfriamiento, aunque pueden tener diversas aplicaciones en otros muchos campos de las actividades industriales.

Reutilización interna

Los motivos que impulsan a una industria a practicar alguna forma de reutilización de efluentes tratados suelen obedecer a alguna o algunas de las siguientes razones:

1) **Escasez**; entendiéndose no sólo escasez de cantidad sino también de calidad, de recursos convencionales.

2) **Economía**; cuando el abastecimiento a partir de fuentes convencionales constituye una alternativa más costosa que mediante la reutilización de sus efluentes.

3) **Recuperación de productos de valor**, contenidos en los efluentes. Es el caso típico de recirculación de compuestos que escapan con el vertido, con lo que la recuperación del agua constituye una consecuencia secundaria.

IV.3.2 Calidades del agua según los usos

No puede hablarse de una calidad de agua en abstracto, sino que debe hablarse de una calidad asociada con el uso a que ésta se destina. Paralelamente, las calidades precisas para cada uno de los diversos usos es también muy variable.

Al analizar los requerimientos de calidad para los diversos usos en las actividades industriales, se concluye que son contados los procesos donde se requiere disponer de agua de alta calidad, similar a la potable, por lo que para el resto de las operaciones no se precisa de un agua de calidad tan alta. Aunque la tecnología existente en la actualidad permite obtener agua tratada de la calidad deseada a partir de cualquier naturaleza del influente, los costos asociados al tratamiento son proporcionales al grado de contaminación del influente y a los requerimientos de calidad final del agua tratada, por lo que resulta lógico establecer las jerarquías de reutilización de los efluentes tratados de acuerdo a los requerimientos de calidad de cada uno de ellos, con la finalidad de optimizar al máximo el uso del efluente y disminuir los costos de tratamiento. Existe en la industria un caso especial de tratamiento de aguas de proceso, el cual tiene la finalidad de recuperar materias primas valiosas que de otra forma se perderían; en cuyo caso se justifica por si sola la reutilización de dichos efluentes.

1) Aguas de enfriamiento

En general, la demanda de agua para enfriamiento alcanza un valor promedio para el conjunto de la industria superior al 60% de la demanda total, existiendo algunas industrias en que la demanda es particularmente alta, del orden del 90%, por lo que resulta lógico que la satisfacción de estas demandas por reutilización de efluentes sea uno de los primeros objetivos.

Los circuitos de refrigeración empleados en la industria pueden ser de tres tipos:

1) Circuito abierto: En él, el agua es desechada después de haber pasado una sola vez a través del sistema.

2) Circuito cerrado: El agua incluida en el circuito es constantemente recirculada sin aporte significativo de agua del exterior (únicamente se repone el volumen de agua perdido de manera inevitable, durante el proceso).

3) Circuito semiabierto: En los que el agua es continuamente recirculada y solamente se necesita un aporte de agua para compensar las pérdidas (evaporación, fugas) y las extracciones realizadas para conseguir que las concentraciones de ciertos elementos no supere los límites preestablecidos.

Las posibilidades de reuso interno en los sistemas de enfriamiento son principalmente las siguientes:

a) Transformación del circuito abierto en cerrado, mediante la recirculación del agua del sistema al máximo número de ciclos que permita el límite máximo admisible de concentración de sales disueltas.

b) Tratamiento de efluentes de sistema en cascada, por el cual el efluente sufre un primer tratamiento, que lo transforma en susceptible de su reutilización en los sistemas de refrigeración, y el resto se somete a tratamiento complementario exigido por las normas de vertido.

c) Reutilización de efluentes poco contaminados para agua de aporte a los circuitos semiabiertos.

De forma general puede afirmarse que debido a que los sistemas de enfriamiento generalmente operan como sistemas de circuitos cerrados, pueden ser visualizados como un sistema independiente con sus requerimientos de calidad muy particulares.

Dentro de la operación de los sistemas de enfriamiento pueden presentarse cuatro problemas específicos relacionados con la calidad del agua: 1) incrustación, 2) corrosión, 3) crecimientos biológicos y 4) taponamiento de los intercambiadores de calor y condensadores. Tanto el agua potable como el agua residual tratada, contienen elementos contaminantes que ocasionan dichos problemas, solo que en ésta última se presentan en concentraciones más altas.

1) Incrustación. Se refiere a la formación de una capa o costra dura, generalmente sobre las superficies calientes, lo cual reduce la eficiencia de los intercambiadores de calor. Los principales compuestos causantes de incrustación en las torres de enfriamiento son: carbonato de calcio, sulfato de calcio, fosfato de calcio, carbonato magnésico y fosfato magnésico. Las incrustaciones de sílice resultan particularmente difíciles para su remoción por su gran dureza, sin embargo suelen hacerse presentes en muy escasas ocasiones.

Es claro advertir que para reducir los problemas de incrustación, es necesario dar un tratamiento del agua previo a su utilización. Un método efectivo de reducción de incrustaciones, consiste en el control de la formación del fosfato cálcico, el cual constituye la primera sal de calcio que se precipita en presencia de fosfatos. Dicho tratamiento, comúnmente va acompañado de la eliminación de fosfatos por medio de su precipitación. Existen otros métodos de tratamiento que pueden emplearse, tales como el intercambio iónico, el cual reduce la formación de escamas por la eliminación del calcio y magnesio; sin embargo, éstos métodos resultan poco atractivos desde el punto de vista económico, y su uso ofrece ciertas limitaciones.

2) Corrosión metálica. En los sistemas de enfriamiento, la corrosión puede suscitarse cuando se crea un potencial eléctrico entre dos superficies metálicas diferentes. La calidad del agua influye de manera decisiva en el efecto de corrosión, así se tiene que, por ejemplo, los sólidos disueltos totales incrementan la conductividad eléctrica de la solución, acelerando el proceso de corrosión. El oxígeno disuelto presente en el agua, en presencia de ciertos metales (manganeso, hierro y aluminio) estimula la corrosión, debido a que éstos poseen un alto potencial de oxidación.

Los efectos de corrosión pueden ser controlados por la adición de sustancias químicas inhibidoras de este fenómeno.

3) Crecimientos biológicos. El calor y el ambiente húmedo predominante dentro de la torre de enfriamiento, proporcionan el ambiente ideal para el desarrollo de cultivos biológicos. Dichos crecimientos provocan situaciones adversas al buen funcionamiento del proceso, tales como:

1) Se adhieren a las superficies de intercambio de calor, provocando la ineficiencia del proceso y dificultan el paso del agua.

2) Los crecimientos biológicos pueden sedimentar y endurecer algunos sólidos contenidos en el agua de enfriamiento, lo cual también provoca ineficiencia en el proceso.

3) Algunos cultivos biológicos producen algunos productos corrosivos durante su crecimiento.

Los cultivos biológicos pueden ser controlados por la adición de biocidas como parte del proceso químico de tratamiento, en el cual también pueden incluirse ácidos para el control del pH, y que son inhibidores de la formación de incrustaciones. Cabe señalar sin embargo que, tanto los elementos nutrientes como la materia orgánica pueden ser eliminados por procesos biológicos y químicos convencionales.

Cuando se emplea agua residual tratada para los sistemas de enfriamiento, es de vital importancia su desinfección como medida sanitaria de protección a la salud, tanto de los trabajadores de la planta, como de los habitantes de las comunidades cercanas.

4) Taponamiento. El taponamiento consiste en la obstrucción y formación de depósitos de distinta naturaleza en los sistemas de recirculación de la torre de enfriamiento. Estos depósitos pueden estar formados por: cultivos biológicos, sólidos suspendidos, lodo, productos corrosivos e incrustaciones inorgánicas. Dichos depósitos disminuyen la eficiencia del proceso de intercambio de calor.

La formación de tales depósitos puede ser evitada por medio de la adición de ciertos productos químicos dispersantes que evitan la formación de grumos, así como su consecuente sedimentación. Cuando se emplean aguas residuales tratadas para el sistema de enfriamiento, los procesos de floculación y filtración utilizados para la eliminación del fósforo, resultan ser también efectivos para la eliminación de los elementos contaminantes que contribuyen a la formación de dichos depósitos.

En la tabla IV-4A⁵ se presentan en forma general, los criterios de calidad de agua para generación de vapor (alimentación a la caldera) en un sistema de intercambio de calor.

En la tabla IV-4B⁶ se presentan en forma general, los criterios de calidad para el agua empleada en una torre de enfriamiento, dentro de un sistema de intercambio de calor.

⁵ METCALF-EDDY. Op. Cit. (pág. 1163)

CRITERIOS DE CALIDAD PARA EL AGUA DE ALIMENTACION A LA CALDERA EN UN SISTEMA DE INTERCAMBIO DE CALOR				
CARACTERISTICA	USO			
	INDUSTRIAL			GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA
	PRESION BAJA	PRESION MEDIANA	PRESION ALTA	
Oxido de silice (SiO₂)	30	10	0.7	0.01
Aluminio (Al)	5	0.1	0.01	0.01
Hierro (Fe)	1	0.3	0.05	0.01
Manganeso (Mn)	0.3	0.1	0.01	0.01
Calcio (Ca)	b	0.4	0.01	0.01
Magnesio (Mg)	b	0.25	0.01	0.01
Amoníaco (NH₃)	0.1	0.10	0.1	0.07
Bicarbonato (HCO₃)	170	120	48	0.5
Sulfato (SO₄)	b	b	b	d
Cloro (Cl)	b	b	b	b, d
Sólidos disueltos	700	500	200	0.5
Cobre (Cu)	0.5	0.05	0.05	0.01
Zinc (Zn)	b	0.01	0.01	0.01
Dureza (CaCO₃)	350	1.0	0.07	0.07
Alcalinidad (CaCO₃)	350	100	40	1
Unidades de pH	7 - 10	8.2 - 10	8.2 - 9	8.8 - 9.4
Compuestos Orgánicos:				
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	1	1	0.5	0.1
Tetracloruro de carbono	1	1	0.5	b, c
Demanda química de oxígeno (DQO)	5	5	1.0	1.0
Sulfuro de hidrógeno (H₂S)	b	b	b	b
Oxígeno disuelto (O₂)	2.5	0.007	0.007	0.007
Temperatura	b	b	b	b
Sólidos suspendidos	10	5	0.5	0.05

NOTA: Todos los valores de la tabla representan límites máximos permitidos y se encuentran expresados en mg/l.

En ningún caso, el agua podrá contener todos los elementos en las concentraciones máximas permisibles. Los criterios de calidad se basan en las características del agua previa a la adición de algún compuesto químico, para su acondicionamiento.

- b No causa problemas a las concentraciones normalmente presente.
- c Cero, no perceptible mediante pruebas.
- d Se establece su control por su interferencia en el tratamiento de otros elementos.

TABLA IV-4A

CRITERIOS DE CALIDAD PARA EL AGUA DE EMPLEADA EN LA TORRE DE ENFRÍAMIENTO EN UN SISTEMA DE INTERCAMBIO DE CALOR				
CARACTERÍSTICA	AGUA DE UN SOLO USO		AGUA DE REUTILIZACIÓN	
	AGUA FRESCA	AGUA CALIENTE ^b	AGUA FRESCA	AGUA CALIENTE ^b
Oxido de sódico (Na ₂ O)	50	25	50	25
Aluminio (Al)	b	b	0.1	0.1
Hierro (Fe)	b	b	0.5	0.5
Manganeso (Mn)	b	b	0.5	0.02
Calcio (Ca)	200	420	50	420
Magnesio (Mg)	b	b	b	b
Amoníaco (NH ₃)	b	b	b	b
Bicarbonato (HCO ₃)	600	140	24	140
Sulfato (SO ₄)	680	2,700	200	2,700
Cloro (Cl)	600	19,000	500	19,000
Sólidos disueltos	1,000	35,000	500	35,000
Cobre (Cu)	b	b	b	b
Zinc (Zn)	b	b	b	b
Dureza (CaCO ₃)	850	6,250	650	6,250
Alcalinidad (CaCO ₃)	500	115	350	115
Unidades de pH	5 - 8.3	6 - 8.3	b	b
Compuestos Orgánicos:				
Sustancias activas al azul de metileno (SAM)	b	b	1	1
Tetracloruro de carbono	e	e	1	2
Demanda química de oxígeno (DQO)	75	75	75	75

CRITERIOS DE CALIDAD PARA EL AGUA DE EMPLEADA EN LA TORRE DE ENFRIAMIENTO EN UN SISTEMA DE INTERCAMBIO DE CALOR				
CARACTERISTICA	AGUA DE UN SOLO USO		AGUA DE RECIRCULACION	
	AGUA FRESCA	AGUA SALOBRE^a	AGUA FRESCA	AGUA SALOBRE^a
Sulfuro de hidrógeno (H₂S)	.	.	b	b
Oxígeno disuelto (O₂)	presente	presente	b	b
Temperatura	b	b	b	b
Sólidos suspendidos	5,000	2,500	100	100

NOTA: Todos los valores de la tabla representan límites máximos permitidos y se encuentran expresados en mg/l. En ningún caso, el agua podrá contener todos los elementos en las concentraciones máximas permitibles.

- a Agua salobre, con un contenido total de sólidos disueltos mayor a 1000 mg/l.
- b No causa problemas a las concentraciones normalmente presente.
- c Cero, no perceptible mediante pruebas.
- d Se establece su control por su interferencia en el tratamiento de otros elementos.
- e Sin grasas o aceites flotantes.

TABLA IV-4B

IV.3.3 Ventajas de reutilización de efluentes

Los sistemas de recirculación y reutilización de efluentes dentro de la industria, reporta las siguientes ventajas principales:

1.- Disminución de la demanda de agua limpia requerida para la elaboración de una unidad de producto, lo cual se traduce en menores costos de producción favoreciendo al mismo tiempo el aumento en la producción.

2.- Disminución de la dependencia de recursos externos, por lo que se tiene una economía y mayor garantía de suministro del recurso acuífero.

3.- Reducción de los volúmenes de efluentes y por consiguiente, se disminuyen también los costos necesarios para su tratamiento.

Además de las ventajas antes mencionadas, cabe añadir la mejora del medio ambiente que se consigue por la reducción del volumen de efluentes vertidos.

IV.4 RECARGA DE ACUIFEROS CON AGUAS RESIDUALES TRATADAS

La recarga artificial de los acuíferos, es uno de los métodos más atractivos de disposición de las aguas residuales, cuya finalidad contempla los siguientes tres objetivos básicos siguientes:

1) Almacenamiento y control

Se aumenta la disponibilidad de aguas subterráneas, se reduce el desequilibrio geohidrológico en las zonas de sobreexplotación y funciona como barrera hidráulica para impedir el paso de aguas contaminadas o salinas hacia los acuíferos de mejor calidad.

2) Tratamiento

Al infiltrarse el agua a través del suelo se produce una variedad de procesos físicos, químicos y biológicos como: filtración, absorción, nitrificación, desnitrificación, intercambio iónico y remoción de virus y bacterias; lo que mejora la calidad del agua, dependiendo de las características hidrogeológicas y químicas del suelo y de la calidad del agua incorporada.

3) Dilución

Se produce al mezclar aguas de distintas calidades, obteniéndose un agua cuyas características satisfacen un uso específico de la misma.

Métodos de recarga de acuíferos

Los métodos de recarga de acuíferos con aguas residuales comúnmente empleados son:

1) Campos de Recarga e 2) Inyección directa.

1) Campos de recarga

Es el método más antiguo y sencillo, por lo que resulta el más comúnmente utilizado. Consiste en la infiltración de las aguas residuales a través de zonas permeables o excavadas, localizadas en regiones con buena permeabilidad superficial formadas por gravas y arenas. Es el método de recarga más favorable, ya que permite un uso eficiente de espacio y requiere muy poco mantenimiento. Cuando las condiciones del terreno son adecuadas, el agua residual recibe tratamiento al filtrarse por la matriz del suelo (ver capítulo II; tratamiento de aguas residuales por disposición al terreno). Cuando esto no se cumple, el agua residual a infiltrar deberá recibir un tratamiento previo para disminuir sus contaminantes. El agua aplicada se filtra por la matriz del suelo hasta alcanzar el acuífero subterráneo, pudiendo ser extraída posteriormente (mediante el uso de pozos de extracción) para ser reutilizada. En algunas ocasiones, el agua extraída de estos acuíferos es utilizada como fuente de abastecimiento de agua potable, lo cual requiere que el agua residual a infiltrar reciba un nivel de tratamiento terciario, para evitar problemas sanitarios posteriores.

2) Inyección directa

La inyección directa consiste en la recarga directa de acuíferos subterráneos, mediante el uso de pozos de inyección. El nivel de calidad de agua requerido por este método es muy

alto, para evitar problemas de contaminación del acuífero. Este método de recarga de acuíferos es recomendable en los siguientes casos:

- a) Cuando el acuífero a recargar se encuentra a una gran profundidad.
- b) Cuando las paredes del acuífero se encuentran debidamente confinadas.
- c) Cuando las condiciones topográficas o uso del suelo dificulten o encarezcan un proyecto de recarga mediante el uso de campos de recarga.
- d) Este método resulta idóneo para detener la intrusión salina de acuíferos cercanos al mar.

IV.4.1 Calidad del agua de recarga

Es difícil establecer los criterios específicos de tratamiento previo de las aguas residuales que pretendan ser utilizadas para la recarga de acuíferos, ya que éstos dependen de una gran variedad de factores, tales como:

- a) Objetivo del proyecto de recarga.
- b) Uso que pretenda darse a las aguas extraídas del acuífero.
- c) Características de la fuente de aguas residuales (origen, caudales, localización, etc.)
- d) Método de recarga empleado.
- e) Características particulares de cada proyecto de recarga.

Pueden señalarse, sin embargo, algunas recomendaciones generales al respecto:

- 1) Debe evitarse que el agua a aplicar contenga altas concentraciones de algas, ya que éstas pueden taponar los poros del suelo.
- 2) Cuando se emplee la capacidad depuradora del suelo para el tratamiento de las aguas residuales, las aguas tratadas resultantes podrían presentar características de calidad inferiores a las del agua del acuífero, por lo que se recomienda en tal caso, usar solamente una porción del acuífero para la recarga y extracción de agua.
- 3) En los sistemas de campos de recarga, se recomienda construir los pozos de extracción tan alejado como sea posible de la zona de recarga; generalmente de 45 a 105 m, con la finalidad de permitir completar el efecto conjunto suelo-agua dentro del tratamiento del agua.
- 4) Independientemente del método empleado para la recarga, los pozos de extracción deben localizarse lo más alejado posible de la zona de recarga, con la finalidad de lograr la dilución completa del agua de recarga.

La recarga de acuíferos con aguas residuales causa grandes controversias por los riesgos sanitarios asociados a tales prácticas, causados principalmente por agentes patógenos y sustancias tóxicas. Debido al alto riesgo que representa a largo plazo la concentración de compuestos químicos y compuestos orgánicos, debe establecerse un control exhaustivo de su concentración en las aguas de recarga.

Se debe establecer un control extremo en la calidad del agua de recarga, debido a que si se corre la desventura de contaminar el acuífero, su saneamiento resulta muy difícil y caro.

La tabla IV-5⁶ presenta una guía práctica de los principales factores a considerar en el diseño de un proyecto de recarga.

IV.4.2 Ventajas de la Recarga de acuíferos con aguas residuales tratadas

La recarga de acuíferos representa un método de disposición de las aguas residuales ampliamente ventajoso, ya que proporciona las siguientes ventajas generales:

- 1) Aumenta la disponibilidad de los recursos acuíferos subterráneos.
- 2) En algunas zonas, el costo asociado a un proyecto de este tipo, resultan menores a los asociados al aprovechamiento de recursos acuíferos superficiales.
- 3) Se aprovecha el tratamiento natural del terreno para eliminar los contaminantes contenidos en las aguas residuales.
- 4) No se requiere un sistema de almacenamiento ni distribución superficial.
- 5) Produce efectos secundarios favorables (psicológicos y estéticos), en la aceptación de la comunidad consumidora, como un proyecto de reuso de aguas residuales.

⁶ METCALF-EDDY. Op. Cit. (pág. 172)

PRINCIPALES FACTORES A CONSIDERAR EN UN PROYECTO DE RECARGA DE ACUIFEROS	
CAMPOS DE RECARGA	
Tratamiento	Control de la concentración de productos químicos tóxicos. Sedimentación primaria y tratamiento biológico secundario. Filtración a través de un medio granular; como tratamiento terciario (puede usarse carbón activado para la remoción de compuestos orgánicos). Desinfección.
Profundidad del acuífero	De 3.0 a 15 m dependiendo de la tasa de infiltración de los suelos.
Tiempo de retención en el suelo	6 a 12 meses, dependiendo del nivel de pretratamiento de agua de recarga.
Porcentaje máximo de inyección de agua residual tratada	20 a 50% del volumen anual total de extracción; depende de la capacidad de remoción de materia orgánica.
Distancia horizontal	De 150 a 300 m dependiendo del nivel de pretratamiento del agua infiltrada.
Monitoreo	Extensivo; incluyendo los parámetros de control referidos a las normas de agua potable.
INYECCION DIRECTA	
Tratamiento	Control de la concentración de productos químicos tóxicos. Sedimentación primaria y tratamiento biológico secundario. Coagulación química, clarificación y filtración a través de un medio granular. Adsorción con carbón activado. Eliminación de compuestos orgánicos volátiles. Osmosis inversa o algún otro proceso que involucre el uso de membranas. Desinfección.
Profundidad del acuífero	No aplicable a éste método de recarga.
Tiempo de retención en el suelo	12 meses.
Porcentaje máximo de inyección de agua residual tratada	20% del volumen anual total de extracción.
Distancia horizontal	De 300 a 600 m dependiendo del nivel de pretratamiento del agua infiltrada
Monitoreo	Completamente extensivo; incluyendo los parámetros de control referidos a las normas de agua potable.

TABLA IV-5

IV.5 USOS RECREATIVOS

El agua residual tratada, bajo las debidas medidas de control y seguridad, pueden ser utilizadas para usos recreativos o bien, para el rescate de zonas naturales en aquellas zonas donde los recursos hídricos sean escasos.

Los diversos usos del agua residual tratada con fines recreativos, pueden clasificarse en las siguientes categorías:

- a) Lagos recreativos para nadar o para esquiar.
- b) Lagos recreativos para la pesca o el canotaje.
- c) Aumento del caudal de corrientes naturales.
- d) Preservación de la fauna silvestre y pantanos naturales.
- e) Lagos recreativos sin acceso al público (en parques o campos de golf).

IV.5.1 Criterios de calidad

El nivel de tratamiento requerido por las aguas residuales tratadas con fines recreativos, depende del grado de contacto del público (riesgos a la salud pública) y del tipo de uso de que se trate.

De manera general, a continuación se presentan los criterios de calidad asociados a cada uso específico.

1) Uso recreativo sin contacto directo del público o como parte del habitat de la fauna silvestre: será suficiente un agua con un nivel de tratamiento secundario sin desinfección.

2) Lagos recreativos dentro de un campo de golf; se requiere un nivel de tratamiento secundario incluyendo desinfección (ocasionalmente el público entra en contacto con dicha agua). No se requiere remoción de sustancias nutrientes (a veces dichas aguas se utilizan para el riego de los campos y dichas sustancias benefician su desarrollo).

3) Lagos de canotaje o pesca sin contacto directo; se precisa un nivel de tratamiento secundario y de desinfección, pero mas riguroso que los requeridos en el caso 1.

4) Lagos recreativos con contacto; en estos casos se precisan niveles de desinfección elevados, en algunas ocasiones similar al requerido para agua potable.

5) Uso recreativo con contacto primario; el agua no deberá contener sustancias tóxicas al ser ingeridas, o que irriten los ojos, las mucosas nasales, oídos o la piel y deben estar libres, en términos razonables de organismos patógenos. El agua utilizada para el baño corporal y para nadar, debe tener un nivel de pH entre 6.5 y 8.3, para evitar que provoque irritación en los ojos.

Criterios de calidad para la protección de la vida acuática

Temperatura. Para el desarrollo adecuado de los peces, la temperatura del agua deberá ser menor a 30 °C. Temperaturas muy elevadas, ponen en riesgo la vida de los vegetales acuáticos.

Fósforo y Nitrógeno. Los lagos recreativos llenados o alimentados con aguas residuales tratadas, presentan un gran riesgo de eutroficación debido al aporte de sustancias nutrientes que favorecen el desarrollo de las algas. Las algas, como seres fotosintéticos producen oxígeno, el cual se incorpora a la masa de agua; sin embargo cuando se tienen altas concentraciones de algas, se generan grandes cantidades de materia orgánica (proveniente de las algas que mueren), la cual demandará oxígeno para su degradación. El efecto anterior provoca la escasez o más aún el agotamiento del oxígeno, lo que puede ser causa de muerte de los peces. Altas concentraciones de algas provocan la escasez o agotamiento de oxígeno, por lo que provocan la muerte de los peces.

Para limitar o inhibir el desarrollo de las algas, es necesario controlar el aporte de elementos nutrientes, tales como fósforo y nitrógeno. Tanto el Nitrógeno como el Fósforo pueden eliminarse a niveles aceptable en procesos de tratamiento un poco mas avanzados que el nivel secundario; sin embargo, el nitrógeno presenta mayor dificultad a su completa eliminación, ya que se encuentra contenido en grandes cantidades en la atmósfera y éste es absorbido por el agua en el intercambio de gases que se lleva a cabo en la interfase aire-agua.

Por otro lado, el amoníaco resulta tóxico (aún en concentraciones muy bajas) para los microorganismos acuáticos, por lo que debe establecerse un estricto control de su concentración.

IV.6 REUSO POTABLE

En muchas regiones del mundo existe una gran problemática de escasez de agua, lo cual representa un freno a su desarrollo. El consumo del vital líquido va en aumento conforme la propia población aumenta; la sobreexplotación del agua se intensifica avanzando como un fenómeno superior a la acción del hombre. Los problemas que la falta de agua puede ocasionar a la ciudad y a la población son numerosos y complicados. Aunque el uso del agua residual tratada como fuente de abastecimiento de agua potable resulta ser el más riguroso de los reusos; en algunas regiones resulta ser el de mayor importancia.

Existen dos tipos de reuso con fines de abastecimiento de agua potable: directo e indirecto. El **reuso directo**, implica la inyección de las aguas residuales tratadas, directamente en el sistema de abastecimiento de agua potable. El **reuso indirecto** se establece al descargar las aguas residuales tratadas en los cuerpos de agua o las corrientes que sirven como fuente de abastecimiento (corriente superficial, represa o algún acuífero), con la finalidad de mezclar y diluir ambos caudales. Este último, también puede darse de manera accidental, cuando por ejemplo se descargan aguas residuales tratadas a una corriente o ésta se filtra por el suelo hasta

alcanzar un acuífero subterráneo, y posteriormente dichas aguas son utilizadas como fuente de abastecimiento.

En la actualidad, es técnicamente factible obtener cualquier calidad de agua a partir del tratamiento de las aguas residuales, aún para uso potable; sin embargo, si se parte de una fuente muy contaminada, los costos asociados resultan muy elevados.

A continuación se presentan los aspectos generales del reuso directo e indirecto de efluentes tratados como fuente de abastecimiento de agua potable.

Reuso directo

El reuso directo debe estar respaldado por un sistema de tratamiento con la tecnología disponible más avanzada y contar con niveles extremos de seguridad, con la finalidad de asegurar la calidad del efluente.

En general, un sistema de tratamiento se encuentra conformado por una serie de procesos para la eliminación de los contaminantes, del tal forma que en conjunto ofrecen múltiples barreras al paso de los contaminantes, por lo que no se puede hablar que una sola unidad es responsable de la eliminación de cierto contaminante, lo cual puede dar una garantía efectiva de eliminación de los contaminantes. Ahora bien, como medida de seguridad adicional, en un sistema de tratamiento cuyo efluente será utilizado con fines potables, es imprescindible la instalación de equipos de emergencia que cubran cualquier falla del sistema que pudiera alterar la calidad final del efluente.

Reuso indirecto

Como se mencionó con anterioridad, el reuso indirecto consiste en la dilución de las aguas residuales tratadas en un cuerpo de agua, para su uso posterior. El cuerpo receptor deberá tener ciertas características específicas para evitar que se degrade la calidad del agua aplicada, al llevarse a cabo la dilución. Si esto se cumple, el agua vertida sufre un proceso de tratamiento adicional a cargo de los ecosistemas naturales. Sin embargo, también pueden producirse efectos adversos tales como: crecimiento de algas, incorporación de escorrentías superficiales y contaminación producida por desechos humanos.

La dilución de las aguas residuales tratadas es fundamental para su reuso indirecto. Esta medida presupone en todos los casos que la calidad del agua receptora es mayor que la calidad del agua residual tratada.

Una de las ventajas más importantes de este tipo de reuso es que a diluir el agua residual tratada a un cuerpo receptor que funciona como fuente de abastecimiento, esto produce una mayor aceptación por parte del público consumidor. Una ventaja adicional estriba en que, cuando el cuerpo receptor es una corriente, ésta a su vez conduce y transporta el agua hasta los sitios de uso.

Para cada proyecto específico la selección entre el reuso directo o indirecto dependerá de una gran variedad de factores como los siguientes:

a) Técnicos. Estos incluyen: criterios de calidad (características del influente de la planta de tratamiento), costos asociados al proyecto, necesidades de distribución, tecnología disponible para el tratamiento y nivel de tratamiento requerido por las aguas residuales.

b) Otros. Dentro de éstos se incluyen: la aceptación pública, restricciones legales y de otro tipo.

IV.6.1 Criterios de calidad

Los criterios de calidad asociados a este reuso son los mismos que rigen al agua potable. El grado de tratamiento requerido por un agua con calidad potable, dependerá del tipo de reuso de que se trate (directo o indirecto); grado de dilución, tiempo de almacenamiento y carga de contaminantes.

Los gérmenes patógenos se encuentran en altas concentraciones en las aguas residuales, por lo que su remoción es vital para poder usarla para fines potables. Otro parámetro de control también muy importante es el contenido de sólidos disueltos. En un proyecto de reuso directo, éstos pueden eliminarse mediante procesos tales como: intercambio iónico o algún proceso de filtración mediante membranas. En un proyecto de reuso indirecto, éste parámetro no es tan importante, ya que al hacerse la dilución, dicha carga de sólidos es aminorada considerablemente.

Existen grandes riesgos de salud asociados a este tipo de aprovechamiento, provocados por la existencia de algunos contaminantes formados por la combinación de compuestos orgánicos e inorgánicos, los cuales no pueden ser eliminados por ningún proceso de tratamiento, incluso de tratamiento avanzado, los cuales pueden provocar efectos tóxicos crónicos al ser ingeridos. Los efectos tóxicos de dichos contaminantes pueden ser evaluados por medio de pruebas de toxicidad aplicadas a animales, solo que dichas pruebas resultan caras, costosas y requieren mucho tiempo para la obtención de resultados.

IV.6.2 Normatividad

No existe legislación específica para el uso de las aguas residuales tratadas con fines potables. Podría pensarse que resultaría factible utilizar las normas existentes para agua potable, pero cabe aclarar ciertos puntos al respecto. Las normas de agua potable son promulgadas en la base a que la fuente de abastecimiento no se encuentra contaminada o bien con un ligero grado de contaminación y de ninguna manera son aplicables a aguas tratadas. El grave error en que se incurriría al tratar de hacer una extrapolación de la legislación, pasando en alto dicha base, sería muy riesgoso, ya que existen algunos contaminantes contenidos en las aguas residuales, los cuales no pueden ser eliminados por ningún proceso de tratamiento y lo que es peor aún, algunos de ellos ni siquiera pueden ser detectados por ningún tipo de pruebas. Como

ejemplo de éstos contaminantes se tiene el Sodio, Cloro, Flúor y algunos sulfuros, así como contaminantes de origen biológico tales como virus y vibrio cholerae.

El sodio en concentraciones muy altas puede provocar la descalcificación de huesos y problemas renales. El cloro presente en el agua puede provenir de sales marinas, confiriéndole al agua un sabor salino. El vibrio cholerae (causante del cólera) es especialmente importante debido a su alta virulencia aún a concentraciones muy bajas.

Uno de los graves problemas a que se enfrenta este tipo de reuso es la aceptación pública, aceptación que se ve afectada por efectos tales como: psicológicos, sociales, educativos, etc. pero primordialmente por conceptos erróneos al respecto. Así por ejemplo, se asocian muchos efectos cancerígenos al consumo de agua, lo cual a pesar de carecer de evidencia científica, ha obligado a las autoridades a establecer las medidas pertinentes para evitar todo riesgo al respecto. Sin embargo, con los métodos modernos de tratamiento avanzado es posible obtener una calidad de efluente que supera en mucho a la calidad de la fuente de abastecimiento que alimenta en la actualidad a muchas comunidades.

Como se expresó con anterioridad, el avance tecnológico en la actualidad permite obtener agua tratada de la calidad deseada (aún potable) a partir de cualquier naturaleza del influente, sin embargo los costos de tratamiento asociados son proporcionales al grado de contaminación del influente y al grado de calidad requerido para el agua tratada, de lo anterior se desprenden las jerarquías de reutilización de los efluentes tratados de acuerdo a los requerimientos de calidad de cada uno de ellos, con la finalidad de optimizar al máximo el uso del efluente y disminuir los costos de tratamiento.

Con base en lo anterior y bajo el conocimiento que los principales usos del agua en nuestro país, de acuerdo a sus volúmenes de consumo son el riego agrícola, industrial y el uso doméstico, a continuación se establece la jerarquía de reutilización de los efluentes tratados, mas adecuada a la realidad mexicana.

1) Riego agrícola

La opción del uso de las aguas residuales tratadas para el riego agrícola, es la alternativa que reporta las ventajas mas significativas en la búsqueda de la solución de la problemática del agua. A continuación se citan sus ventajas más significativas en las que se basa la aseveración anterior.

a) El uso de las aguas residuales tratadas para riego agrícola, reduce el déficit de aportaciones hídricas que padece la agricultura de muchas regiones.

b) En zonas áridas, el agua residual resulta ser la fuente de abastecimiento más barata. Significando en algunos casos, la única fuente de suministro factible.

c) Proporciona una posibilidad económica para disponer las aguas residuales y así prevenir la contaminación y problemas sanitarios consecuentes de su disposición inadecuada.

El uso de las aguas residuales crudas para riego agrícola es una práctica que venía realizándose de manera incontrolada desde tiempos inmemoriales en muchas zonas de nuestro país. Con la finalidad de tratar de controlar los problemas sanitarios derivados de tal práctica, es en el año de 1993 cuando surgen dos Normas Oficiales Mexicanas (NOM-CCA-032-ECOL/1993 Y NOM-CCA-033-ECOL/1993), las cuales establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en las aguas residuales de origen urbano o municipal para su disposición mediante riego agrícola.

Anteriormente el grado de depuración requerido por las aguas residuales dispuestas mediante riego agrícola, dependía de la clase de cultivos y del tipo del suelo que se deseaba regar principalmente, pero también de las condiciones climatológicas de la zona de estudio, del sistema de riego, época de lluvias y otros factores de menor importancia. Debido a ello, el grado de depuración requerido para las aguas residuales tenía un amplio rango de variabilidad, dependiendo de las condiciones particulares de cada proyecto, desde la aplicación directa al terreno de las aguas residuales crudas, aún sin desinfección previa, hasta el tratamiento terciario mas completo; sin embargo esta situación ha cambiado en la actualidad y la calidad de las aguas residuales para riego agrícola deberá cumplir en todos los casos con las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes. A pesar de lo anterior, el uso de las aguas residuales tratadas para riego agrícola no deja de ser una opción de abastecimiento, significando en algunos casos la fuente mas barata o mas aún la única fuente de suministro factible.

2) Reuso industrial

La industria resulta ser un usuario con alta potencialidad de consumo de las aguas residuales tratadas y de recirculación de agua, debido primordialmente a dos hechos básicos: los altos volúmenes de consumo y los requerimientos de calidad (en un alto porcentaje), no son tan estrictos, debido a que son contados los procesos donde se requiere agua de alta calidad (similar a la potable).

Así se tiene que el agua para enfriamiento es la actividad que consume los mayores volúmenes de agua dentro de la industria; de manera general, dicha demanda alcanza un valor promedio superior al 60 % de la demanda total, existiendo algunas industrias en las que la demanda es del orden del 90 %. También, las aguas de refrigeración constituyen los efluentes que se producen en mayor volumen; son también los menos contaminados, siendo su contaminación generalmente del tipo térmico, por lo que resulta lógico que la satisfacción de estas demandas ya sea mediante el empleo de aguas residuales tratadas o bien por reutilización de efluentes, sea una de las principales metas a lograr, en el incesante esfuerzo de reducir los volúmenes de aportación externa, demandados por la industria.

Por otro lado, las aguas de transporte y clasificación de materiales también resultan tener un alto potencial de recirculación de sus efluentes, ya que su contaminación es de poca cuantía, generalmente debida a sólidos separables por medios sencillos y sus volúmenes de demanda son mas o menos considerables.

3) Recarga de acuíferos

La recarga artificial (inducida por el hombre) de los acuíferos, es uno de los métodos más atractivos de disposición de las aguas residuales, debido a que al infiltrarse las aguas a través de las capas del suelo, se produce una serie de procesos fisicoquímicos, que por lo general mejoran la calidad del agua; el grado de depuración logrado depende de las características hidrogeológicas y químicas del suelo y de la calidad del agua incorporada. Cuando las condiciones del terreno son adecuadas, el agua residual recibe un grado aceptable de tratamiento al infiltrarse por las capas del suelo. Cuando lo anterior no se cumple, el agua residual a infiltrar deberá recibir un tratamiento previo con miras a disminuir sus contaminantes.

En algunas ocasiones, el agua extraída de los acuíferos recargados artificialmente, es utilizada como fuente de abastecimiento de agua potable, lo cual requiere que el agua residual reciba un alto nivel de tratamiento, para ser exactos, a nivel terciario.

La recarga de acuíferos con agua residual causa grandes discusiones por los riesgos sanitarios asociados a tales prácticas, debidos primordialmente a agentes patógenos y sustancias tóxicas. El alto riesgo que representa la concentración de compuestos químicos y compuestos orgánicos, hace necesario establecer un control exhaustivo de su concentración en las aguas de recarga.

4) Usos recreativos

El agua residual tratada, bajo las medidas adecuadas de control y seguridad, puede ser utilizada para usos recreativos o bien, para el rescate de zonas naturales en aquellas zonas donde los recursos hídricos son escasos.

El nivel de tratamiento requerido por las aguas residuales tratadas con fines recreativos, depende del grado de contacto con el público (por los riesgos sanitarios), siendo el nivel mínimo de tratamiento requerido el nivel secundario sin desinfección, para un uso recreativo sin contacto directo del público o como parte del hábitat de la fauna silvestre y el máximo es similar al requerimiento para agua potable, donde se tenga un lago recreativo con posibilidades de contacto directo del hombre.

5) Uso potable

Como se expresó con anterioridad, en la actualidad resulta técnicamente factible obtener cualquier calidad de agua a partir del tratamiento de aguas residuales; sin embargo, si se parte de una fuente muy contaminada, los costos asociados son muy elevados.

De todas las posibilidades de reuso mencionadas, ésta resulta la menos recomendable debido a que existen grandes riesgos de salud asociados a este tipo de aprovechamiento, provocados por la existencia de algunos contaminantes formados por la combinación de compuestos orgánicos e inorgánicos, así como el nacimiento de nuevas sustancias químicas, los cuales no pueden ser eliminados por ningún proceso de tratamiento, e incluso no pueden ser detectados por ninguna prueba dentro del proceso de análisis de las aguas residuales.

CAPITULO V

POTENCIAL DE REUSO EN LA REPUBLICA MEXICANA

OBJETIVO

El objetivo general del presente capítulo es determinar la potencialidad de reuso de las aguas residuales tratadas dentro de nuestro país. Para lograr lo anterior, el tema se desarrollará de la siguiente manera.

Definición de la problemática general del agua en nuestro país, a través del análisis de los siguientes apartados:

V.1 Análisis de la distribución global de los recursos hidráulicos a lo largo de todo el país, lo cual permite obtener un diagnóstico preliminar de las zonas de escasez y abundancia del recurso. Posteriormente se presenta un análisis por entidad federativa de la forma de administración de acuerdo al uso, de sus recursos hidráulicos disponibles; lo cual permite visualizar cuales son los usos principales del agua en nuestro país de acuerdo a los volúmenes de consumo.

V.2 Se destacan los principales usos del agua (de acuerdo a su volumen de consumo). A continuación se establece un diagnóstico a nivel nacional, de las situaciones actual y futura de la demanda y disponibilidad del recurso, de los usos principales del agua.

Como parte fundamental en la definición de la problemática del agua en nuestro país, se analiza el grado de contaminación de los recursos hídricos con los que cuenta nuestra nación.

Con el análisis anterior se da por concluida la etapa de definición de la problemática del agua en nuestro país, procediendo entonces al cálculo de los volúmenes potenciales de agua de reuso.

V.3 Selección (de acuerdo a un criterio específico) de aquellas localidades que poseen amplias perspectivas de reuso de sus aguas residuales.

Una vez seleccionadas las localidades con las mas altas posibilidades de reuso, se procede a estimar sus volúmenes de aguas residuales disponibles y consecuentemente potenciales de reuso.

Cabe recalcar que los resultados obtenidos por el presente capítulo fueron obtenidos bajo ciertas consideraciones, como se menciona mas adelante, haciendo uso de toda la información disponible hasta el momento y considerada como la mas pertinente, lo cual le confiere a los mismos la confiabilidad necesaria para el fin que se persigue en el presente trabajo, el cual es proporcional una idea del gran potencial que significaría el reuso de las aguas residuales tratadas dentro de nuestro país. El presente tema posee una gran complejidad, por lo que para la obtención de resultados mas definitivos y exactos, sería necesario recabar información mas actualizada y quizás mas compleja, lo cual sale fuera de los alcances del presente trabajo.

INTRODUCCION

México enfrenta actualmente problemas regionales de abastecimiento de agua en cantidad suficiente y calidad adecuada, entre los que destacan la disminución acelerada de la disponibilidad de agua en las zonas más pobladas y la creciente contaminación de los cuerpos de agua, susceptibles de servir como fuentes de abastecimiento; ya que nuestro país no se ha podido sustraer de las consecuencias de un desarrollo acelerado, que ha propiciado un aumento en la extracción y consumo de agua, que se traduce consecuentemente, en una mayor generación de aguas residuales, las cuales al ser descargadas sin previo tratamiento, en la mayoría de los casos, a los cuerpos receptores perjudican sus usos legítimos y disminuyen su potencial de aprovechamiento. Por lo anterior, en un futuro cercano, pueden presentarse déficits críticos de recursos hidráulicos en algunas regiones, lo que plantea un serio desafío para las autoridades a cargo de la administración y distribución del agua y disposición de las aguas residuales. Así, el reuso resulta ser una opción muy necesaria si se toman en cuenta los problemas de escasez del agua en nuestro país, los altos costos de su transporte, las consecuencias ecológicas de su desperdicio y su importancia estratégica en el desarrollo urbano e industrial.

V.1 DISTRIBUCION GEOGRAFICA DEL AGUA

De acuerdo a la cantidad de precipitación y temperatura, el área de nuestro país se clasifica en desértico y árido en un 31 %, en semiárido el 36 % y en subhúmedo y húmedo el 33 % restante (figs. 4A y 4B). Lo cual significa de entrada que, aproximadamente el 67 % del territorio nacional se encuentra en seria desventaja de disponibilidad de agua con el resto del país por simples condiciones climáticas; al mismo tiempo es fácil advertir que esas 2/3 partes de área del territorio nacional que se encuentran en desventaja, también resultan ser las áreas con mayores posibilidades de reuso de las aguas residuales tratadas.

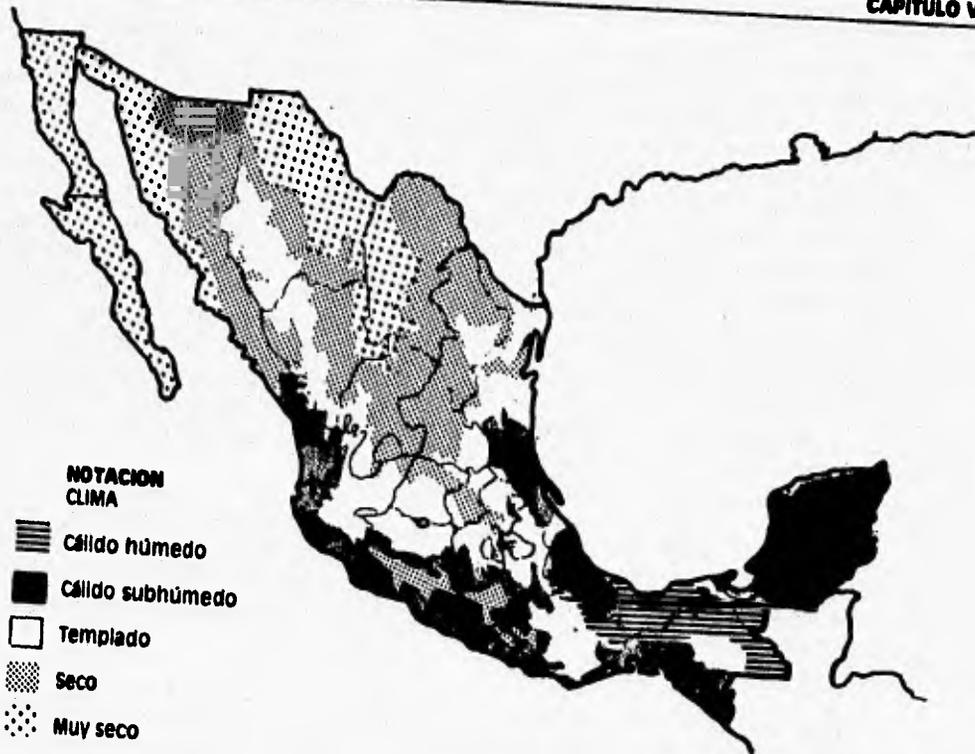


FIGURA 4A

DISTRIBUCION DE LA SUPERFICIE CONTINENTAL DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS, SEGUN TIPO DE CLIMA

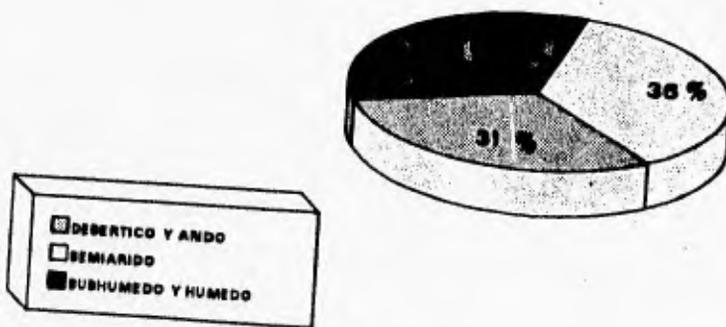


FIGURA 4B

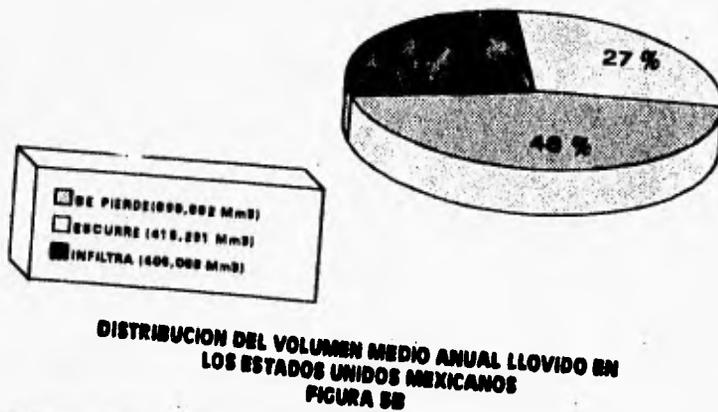
El inventario del volumen de agua disponible en nuestro país muestra que éste es lo suficientemente basto para satisfacer las demandas de abastecimiento de todos los sectores económicos, sin embargo, su distribución geográfica es completamente adversa en casi la mitad del territorio nacional. El país se encuentra dividido en 320 cuencas hidrológicas, con un escurrimiento promedio anual de 415,291 Mm³, cifra que representa el total disponible como recurso renovable. La distribución de dicho escurrimiento es la siguiente: en el norte solamente se tiene un escurrimiento de 12,300 Mm³, lo que representa el 3 % del total de escurrimiento en un área equivalente al 30 % del país, mientras que se tiene un escurrimiento de 205 000 Mm³, que representa el 50 % de la disponibilidad en un área no mayor al 20 % del territorio nacional.¹ Por otro lado, mediante estudios exhaustivos se ha identificado un volumen aproximado de 31 Mm³ de agua subterránea disponible anualmente; habiendo estudiado el 57 % del territorio nacional en profundidades hasta de 100 m, se estima un volumen almacenado de recurso no renovable de 110 mil Mm³.² Ahora bien, según estimaciones conservadoras, el volumen medio anual llovido en México es de 1,520,651 Mm³, del cual sólo un 27.4 % o sea 415,291 Mm³ escurre; el 24.6 % o sea 405,068 Mm³ se infiltra y un 44 % o sea 699,662 Mm³ se pierde por evaporación y otros factores (figs. 5A y 5B).

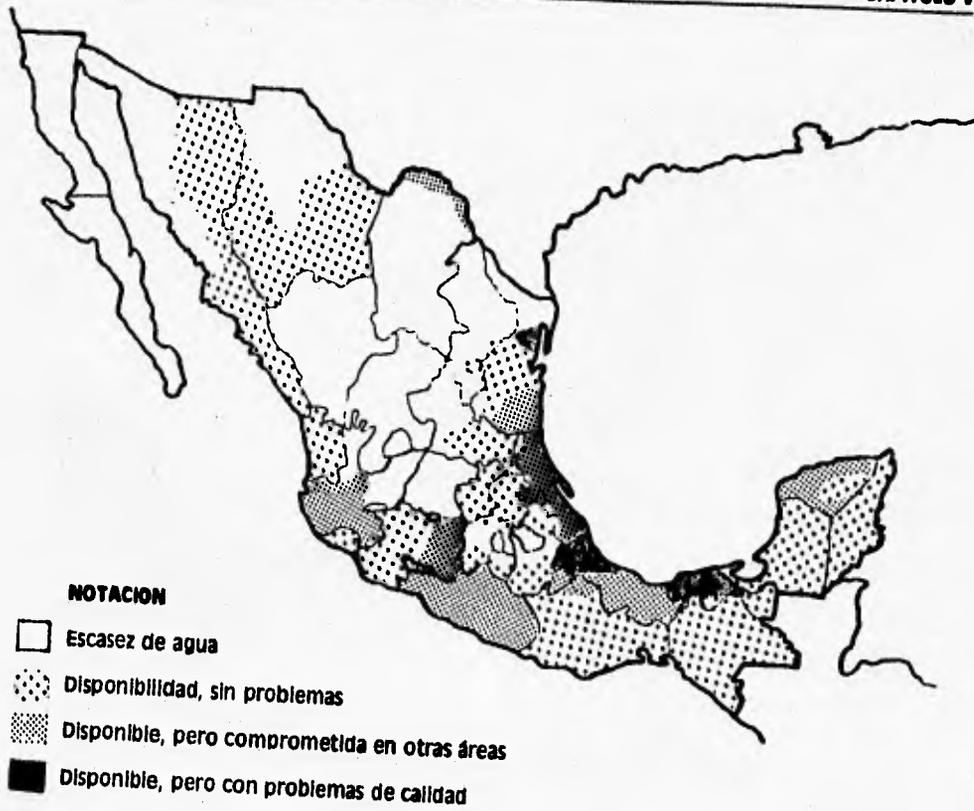
Un análisis comparativo de las zonas de disponibilidad del recurso con las de asentamientos humanos e industriales, muestra la existencia de una situación paradójica; más del 85 % del agua del país se encuentra por debajo de los 500 msnm (metros sobre el nivel del mar), mientras que más del 70 % de la población y 80 % de la planta industrial se localiza por encima de los 500 msnm (fig. 6).

Para tener una idea de los volúmenes destinados por entidad federativa en cada uno de los usos principales, a continuación se presentan la Tabla V-1 y V-2; las cuales contienen las estimaciones de los volúmenes de agua de abastecimientos superficiales y subterráneos, destinados a cada una de las actividades específicas.

¹ CONTROL DE LA CONTAMINACION DEL AGUA EN MEXICO. SMISA. Memoria del VII Congreso Nacional. La Ingeniería Ambiental y la Salud. Oaxaca, Oax. Septiembre 1990.

² PLAN REGIDOR DE AGUAS RESIDUALES. México. Presidencia de la República. Coordinación de Proyectos de Desarrollo, Reuso y recirculación de agua. 1982.





DISPONIBILIDAD REGIONAL DE AGUA

FIGURA 6

ESTIMACIONES DE VOLUMENES DE APROVECHAMIENTO ANUAL DE AGUAS SUPERFICIALES DENTRO DE LA REPUBLICA MEXICANA* (en miles de metros cúbicos)								
ESTADO	USOS							TOTAL
	A	B	C	D	E	F	G	
Agf.	8,985	4,356	22	0	0	16	0	13,379
B.C.	0	35	22	0	0	0	31	88
B.C.S.	0	473	16	0	0	0	0	489
Camp.	0	0	0	0	0	0	0	0
Coah.	196,269	20,120	378	1,577	0	31,536	0	249,880
Col.	149,378	1,086	657	0	31	33,489	0	184,641
Chi.	109,440	112,771	3,784	3,154	4	410,372	0	639,525
Chih.	84,551	5,463	55	0	9	8,393	0	98,471
D.F.	909	31	184	6,307	0	0	0	7,431
Dgo.	145,867	15,307	160	158	3	97,215	0	258,710
Gco.	47,703	116,848	9,480	0	0	125,797	0	299,828
Gro.	21,844	43,085	50	1,688	0	40,130	0	106,787
Hgo.	25,197	1,430	147	0	42	611,059	0	637,875
Jal.	104,727	385,670	2,401	13,245	5	607,405	0	1,113,453
Méx.	321,681	38,748	1,989	7,157	0	458,851	20,183	848,609
Mich.	40,825	17,770	306	368	55	607,120	0	666,444
Mor.	51,500	73,274	3,025	13,913	0	918,108	0	1,059,820
Nav.	9,321	50,267	0	0	0	13,289	0	72,877
N. L.	57,975	1,378	11	1,882	79	5,965	0	67,290
Oax.	89,793	15,389	145	536	0	100,920	0	206,783
Pue.	511,721	78,149	2,494	2,212	4	455,211	0	1,049,791
Qro.	16,227	11,316	0	0	0	14,559	0	42,102
Q. R.	0	0	0	0	0	0	0	0
S.L.P.	37,634	341,658	60	685	0	0	0	380,037
Slm.	4,331	0	607	0	0	0	0	4,938
Son.	30,658	0	0	0	0	9,416	0	40,074

ESTIMACIONES DE VOLUMENES DE APROVECHAMIENTO ANUAL DE AGUAS SUPERFICIALES DENTRO DE LA REPUBLICA MEXICANA ^a (Miles de Metros cúbicos)								
ESTADO	USOS							TOTAL
	A	B	C	D	E	F	G	
Tab.	0	0	0	0	0	0	0	0
Tams.	87,371	102,305	129	0	113	76,811	0	266,729
Tlax.	11,449	0	13	0	0	91,455	263	103,180
Ver.	34,700	897,756	2,576	31,930	0	1,450,733	0	2,417,695
Yuc.	0	0	0	0	0	0	0	0
Zac.	17,671	29	0	18	0	9,461	0	27,179
TOTAL	2,217,727	2,334,714	28,711	84,830	345	6,177,311	20,477	10,864,115

a (1986) Comisión Nacional del Agua. Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica. Dirección General de Administración de Usos del Agua. Subdirección de Aguas Nacionales. Departamento de Aguas Superficiales. Datos disponibles hasta el momento.

A Agrícola B Industrial C Doméstico D Público-Urbano
E Pecuario F Generación de energía eléctrica G Acuicultura

TABLA V-1

ESTIMACIONES DE VOLUMENES DE APROVECHAMIENTO ANUAL DE AGUAS SUBTERRANEAS, DENTRO DE LA REPUBLICA MEXICANA* (en Miles de Metros cúbicos)								
ESTADO	USOS							TOTAL
	A	B	C	D	E	F	G	
Ags.	839,221	4,307	35,749	4,464	496	0	1,078	885,315
B.C.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
B.C.S.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Campe.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Coah.	549,104	7,002	44,495	1,638	2,150	0	1,032	605,691
Col.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Chi.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Chih.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
D.F.	0	364,362	75,909	65,788	0	0	0	506,059
Dgo.	566,657	65,101	69,056	1,062	4,193	8,031	294	714,394
Gto.	2,002,861	47,669	184,926	36,961	13,347	26,597	2,085	2,314,446
Gro.	1,068	0	1,023	1	30	0	0	2,122
Hgo.	112,615	37,863	16,874	99,611	931	30,184	146	298,224
Jal.	31,421	12,699	13,168	17	2,071	0	39	59,415
Méx.	216,834	101,562	158,105	889,795	3,499	4,761	2,662	1,377,218
Mch.	21,368	6,348	10,566	160	1,295	0	253	39,990
Mor.	45,011	10,940	26,104	16,242	155	0	1,638	100,090
Nay.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
N. L.	195,638	39,106	13,231	139,233	1,608	10,715	207	399,738
Oax.	2,797	892	11,079	316	36	1,020	4	16,144
Pue.	99,432	29,026	34,939	74,006	1,381	1,203	750	240,737
Qro.	289,103	11,582	39,411	3,815	1,130	0	1,191	346,232
Q. R.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
S.L.P.	32,680	0	2,440	0	67	0	1,009	36,196
Tab.	7,901	0	2,128	0	201	0	0	10,230
Son.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

ESTIMACIONES DE VOLUMENES DE APROVECHAMIENTO ANUAL DE AGUAS SUBTERRANEAS, DENTRO DE LA REPUBLICA MEXICANA* (Miles de Metros cúbicos)								
ESTADO	USOS							
	A	B	C	D	E	F	G	TOTAL
Tab.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Tams.	2,405	6	1,917	0	82	0	0	4,410
Tlax.	25,586	3,276	6,065	330	532	0	11	35,800
Ver.	3,673	37,398	15,004	3,511	158	0	1,348	61,092
Yuc.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Zac.	441,263	19,305	27,516	256	2,442	298	786	491,866
TOTAL	5,486,638	798,444	789,705	1,337,206	35,804	82,809	14,803	

N.D. No determinado

a (1984) Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica.

Dirección General de Administración de los usos del Agua.

D.D.F. Subsecretaría General de Obras, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica.

Departamento de Aguas Superficiales.

Datos disponibles hasta el momento.

A Agricultura B Industrial C Doméstico D Público-Urbano

E Pecuario F Generación de energía eléctrica G Acuicultura

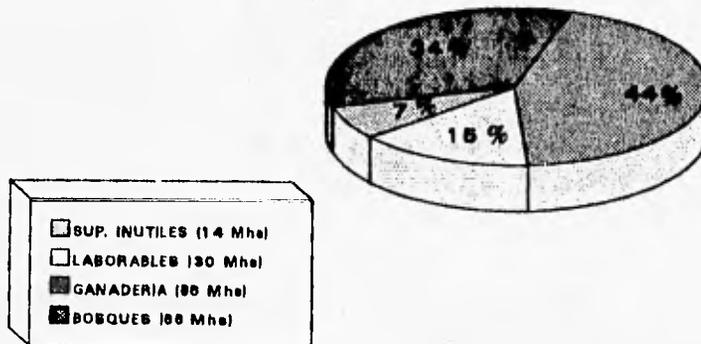
TABLA V-2

V.2 USOS DEL AGUA

De forma general, los usos principales de los recursos hidráulicos son: agricultura, industria, doméstico, producción de energía eléctrica, conservación de flora y fauna acuáticas, recreación y navegación. Sin embargo, dentro de nuestro país los rubros que consumen los mayores volúmenes de agua son: la agricultura, la industria y los centros de población.

USO AGRICOLA

Desde tiempos inmemoriales la agricultura ha jugado un papel de gran importancia en la economía de nuestro país. Sin embargo su estado actual deja mucho que desear, aunado a la escasez y mala distribución de las lluvias en la mayor parte del territorio, se tiene el problema de escasez de tierras adecuadas para usos agrícolas, debido a varios factores, pero principalmente la orografía predominante en nuestro país, calculándose que de los 196 millones de hectáreas que constituyen la superficie del país, únicamente 30 millones de ha. o sea el 15 % son laborables³. El resto del territorio está constituido por 86 millones de ha., o sea el 44 % apta para la ganadería en estado natural; 66 millones de ha., o sea el 34 % de bosques; 14 millones de ha., 7 % de superficies inútiles (pantanos, zonas pedregosas, zonas áridas, etc.) (figura 7).



DISTRIBUCION DE LA SUPERFICIE TOTAL DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS, DE ACUERDO A SU USO (196 Mha.)

FIGURA 7

³ Resultados de los estudios realizados por el Plan Nacional Hidráulico (1974).

A pesar de los avances en la agricultura de riego, aún se tienen muchos problemas por resolver, entre ellos destacan: escasez y uso inadecuado del agua, desconocimiento de los requerimientos hídricos de los cultivos, preparación inadecuada de los terrenos para riego, mala calidad del agua, suelos con problemas de sales solubles, sobreexplotación de los acuíferos, baja eficiencia en el riego y alto costo del agua bombeada.

Asimismo, la agricultura de temporal presenta los siguientes problemas: bajos rendimientos, pérdida de agua por escurrimiento, pérdidas de agua por evaporación, suelos con baja retención de humedad y suelos erosionados por el agua.

Es innegable que la agricultura constituye uno de los pilares de la economía nacional, por lo que es imprescindible otorgarle todos los recursos necesarios para que siga avanzando y mantenga un adecuado desarrollo. El crecimiento previsto a corto, mediano y largo plazo de las actividades agrícolas demandará en los próximos años crecientes cantidades de agua para riego. En la tabla V-3⁴ se presentan las estimaciones de las superficies agrícolas tanto de riego como de temporal para diferentes años, de acuerdo a información y expectativas del Plan Nacional Hidráulico.

SUPERFICIES AGRICOLAS DE RIEGO Y TEMPORAL	
AÑO	MILLONES DE HECTÁREAS
1992	19.3
1995	20.6
1990	22.9
2000	26.0

TABLA V-3

En la tabla V-4⁵ se presentan las estimaciones y predicciones para diversos años, de los volúmenes de agua requeridos para riego agrícola.

⁴ SEMISA. Memoria del VII Congreso Nacional. Op. cit.

⁵ PLAN RECTOR DE AGUAS RESIDUALES (Pág. 48)

REQUERIMIENTOS DE AGUA PARA USO AGRICOLA	
AÑO	DEMANDA (km ³)
1982	50,683
1988	62,941 ^a
1994	78,164 ^a
2000	94,597

^a Estimaciones realizadas por la Coordinación de Proyectos de Desarrollo, basadas en información del Plan Nacional Hidráulico.

TABLA V-4

Los volúmenes de agua utilizados para riego, provienen en un 66 % de aprovechamientos superficiales y en un 34 % de fuentes subterráneas.

En la tabla V-5⁶ se presentan las estimaciones de los volúmenes totales de agua distribuidos para tierras de riego, por entidad federativa. De la tabla se obtiene que, Sinaloa, Sonora, Tamaulipas y Michoacán son los estados en los que se distribuyen los mayores volúmenes de aguas superficiales disponibles para riego, mientras que, los estados de Sonora, Querétaro, Guanajuato y Chihuahua son los estados donde se distribuyen los mayores volúmenes de agua subterránea.

⁶ PLAN REQUISITOR DE AGUAS RESIDUALES. (Pág. 81)

ESTIMACIONES DE VOLUMENES TOTALES DE AGUA DISPONIBLES PARA TIERRAS DE RIBCO, DENTRO DE LA REPUBLICA MEXICANA* (Millones de metros cúbicos)			
ESTADO	VOLUMEN SUPERFICIAL (km³)	VOLUMEN SUSTERRANEO (km³)	VOLUMEN TOTAL (km³)
Aguascalientes	72	276	348
Baja California Norte	1,767	896	2,663
Baja California Sur	11	436	447
Campeche	-	32	32
Cochula	1,491	800	2,291
Colima	709	266	975
Chiapas	221	-	221
Chihuahua	1,390	1,051	2,441
D.F.	-	-	-
Durango	250	259	509
Guanajuato	1,872	1,606	3,478
Guanajuato	397	3	400
Hidalgo	1,250	109	1,359
Jalisco	988	296	1,284
México	691	970	1,661
Michoacán	2,120	417	2,537
Morelos	471	35	506
Nayarit	313	159	472
Nuevo León	962	324	1,286
Oaxaca	401	74	475
Puebla	350	443	793
Querétaro	131	1,867	1,998
Quintana Roo	-	1	1
San Luis Potosí	218	279	497
Sinaloa	5,748	464	6,212
Sonora	3,248	2,648	5,896

ESTIMACIONES DE VOLUMENES TOTALES DE AGUA DISPONIBLES PARA TIERRAS DE RIEGO, DENTRO DE LA REPUBLICA MEXICANA^a (MILES DE METROS CUBICOS)			
ESTADO	VOLUMEN SUPERFICIAL (km³)	VOLUMEN SUBTERRANEO (km³)	VOLUMEN TOTAL (km³)
Tabasco	-	2	2
Tamaulipas	2,490	141	2,631
Tlaxcala	68	68	136
Veracruz	908	108	1,016
Yucatán	148	56	204
Zacatecas	276	476	752
TOTAL	28,960	14,563	43,523

^a (1982) Estimaciones realizadas por la Coordinación de Proyectos de Desarrollo, basados en información del Plan Nacional Hidráulico. Fuente: Plan Regidor de Aguas Residuales.

TABLA V-5

USO INDUSTRIAL

El sector industrial en México se encuentra clasificado en 39 grupos, ordenados de acuerdo a sus índices de extracción, consumo y contaminación. Dentro de la tabla V-6⁷ se presentan los giros industriales responsables del consumo de los mayores volúmenes de agua y consecuentemente son los responsables de la generación de las mayores descargas de aguas residuales. El 82 % del total de las aguas residuales generadas por el sector se encuentran distribuidas en nueve grupos industriales (tabla V-7)⁷, destacando la industria azucarera y química con el 59.8 % del total. El 77 % de las industrias que consumen grandes volúmenes de agua, cuentan con sistemas de abastecimiento propios y se encuentran localizadas en zonas cercanas a centros urbanos o dentro de los mismos.

Los volúmenes de agua utilizados en la industria se dividen en cuatro grandes grupos: agua para enfriamiento, agua para calderas, agua para proceso y agua para servicios. Siendo el agua para enfriamiento y el agua para proceso, los volúmenes de mayor consumo.

⁷ SMISA. Memoria del VII Congreso Nacional. Op. cit. Sección B, pág. 10.

De acuerdo con las estimaciones del Plan Nacional de Desarrollo Industrial, la Tabla V-8⁶ presenta las estimaciones y predicciones de consumo de agua en todos el sector industrial. Cabe aclarar que las cantidades expresadas en la tabla anterior, incluye los volúmenes de agua demandados por las industrias que se conectan directamente a la red de abastecimiento municipal.

GRUPOS INDUSTRIALES QUE INCIDEN MAYORMENTE EN LA PROBLEMÁTICA DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA EN MÉXICO	
GRUPO No.	DESCRIPCIÓN
13	Extracción y beneficio de minerales metálicos
20	Fabricación de alimentos
21	Elaboración de bebidas
23	Industria textil
24	Fabricación de prendas de vestir y otros artículos confeccionados con textiles y otros materiales, excepto calzado
25	Fabricación de calzado e Industrias del cuero
26	Industria y productos de madera y corcho excepto muebles
28	Industria del papel
30	Industria Química
31	Refinación de Petróleo y derivados del carbón mineral
32	Fabricación de productos de hule y de plástico
33	Fabricación de productos de minerales no metálicos; excepto del petróleo y del carbón
34	Industria metálica básica
35	Fabricación de productos metálicos, excepto maquinaria y equipo
37	Fabricación y ensamble de maquinaria, equipos, aparatos, accesorios y artículos electrónicos y sus partes
38	Construcción, reconstrucción y ensamble de equipo de transporte y sus partes
39	Otras industrias manufactureras

TABLA V-8

⁶ PLAN REGIDOR DE AGUAS RESIDUALES. (Pág. 53)

VOLUMENES DE EXTRACCION DE AGUA DE LAS INDUSTRIAS MAYORITARIAS			
INDUSTRIA	EXTRACCION % RELATIVO	CONSUMO % RELATIVO	DESCARGA % RELATIVO
Azucarera	35.2	22.3	38.8
Química	21.7	24.4	21.0
Celulosa y Papel	8.2	16.1	6.0
Petróleo	7.2	3.7	8.2
Bebidas	3.3	6.4	2.4
Textil	2.6	2.4	2.7
Siderúrgica	2.5	5.5	1.7
Eléctrica	1.5	4.7	0.7
Alimentos	0.2	0.3	0.2
Resto del Sector	0.17	14.1	18.1

TABLA V-7

REQUERIMIENTOS DE AGUA PARA USO INDUSTRIAL	
AÑO	DEMANDA (km³)
1982	6,400
1988	8,615 ^a
1994	11,588 ^a
2000	15,580

^a Estimaciones realizadas por la Coordinación de Proyectos de Desarrollo, basada en Información del Plan Nacional Hidráulico

TABLA V-8

MUNICIPAL

El consumo de agua dentro de los centros de población se encuentran dirigidos a cuatro usos diferentes: Doméstico, Público, Comercial e Industrial.

Doméstico. Es el volumen de agua destinado a satisfacer las necesidades de la comunidad a nivel domiciliario. El consumo asociado a este uso varía de acuerdo a las costumbres, nivel de vida, tamaño de la vivienda, características de la vivienda, clima, etc.

Público. Es el volumen destinado a los servicios públicos y a satisfacer las necesidades de la comunidad (riego de parques y jardines, escuelas y otras áreas de uso comunitario).

Comercial. Es el volumen destinado a satisfacer las necesidades del sector comercial.

Industrial. Es el agua destinada a la pequeña porción del sector industrial que se conecta directamente a la red general de suministro de agua.

La distribución de la dotación en las ciudades del país con una población mayor a los 10,000 habitantes, se distribuye de la siguiente forma: el 81.9 % para uso doméstico, 10% para uso público, 5.5 % para uso comercial y el 2.6 % restante para uso industrial.

La Tabla V-9 contiene las estimaciones de los volúmenes de consumo de agua para uso doméstico, de acuerdo a la población total, para diversos años.

CONSUMO DE AGUA PARA USO DOMESTICO		
AÑO	POBLACION TOTAL (Millones de habitantes)	CONSUMO (mm³)
1970	51.09	2,050
1980	71.93	3,580
1990	99.67	7,558
2000	135.09	10,958

Estimaciones realizadas por la Coordinación de Proyectos de Desarrollo, basada en información del Plan Nacional Hidráulico

TABLA V-9

V.3 GRADO DE CONTAMINACION DE LOS RECURSOS HIDRAULICOS

El uso indiscriminado de los recursos hídricos en la constante expansión de las poblaciones, procesos industriales y agricultura, ha conducido a su sobreexplotación y alteración de su calidad y cantidad original, principalmente en las zonas de escasez y donde el medio geográfico es adverso. Estas situaciones repercuten en la contaminación de todo el entorno natural, especialmente en la contaminación de los cuerpos de agua, más aún, cuando éstos captan las aguas de desecho de los grandes centros urbanos.

Zonas más contaminadas del país

Es de vital importancia incluir la contaminación de los recursos hidráulicos, al igual que los puntos anteriores (Distribución geográfica del agua y Usos del agua), dentro de la problemática del agua en nuestro país; ya que una vez que la calidad de la fuente de abastecimiento se vea degradada, las posibilidades de su uso se ven disminuidas e incluso nulificadas si es que no se aplican las medidas preventivas y/o correctivas correspondientes.

Con la finalidad de conocer el grado de contaminación de los cuerpos de agua del país, se analizaron los resultados obtenidos de una serie de estudios⁹ basados en la información estadística publicada por la Secretaría de Programación y Presupuesto, así como de otras dependencias. Dichos estudios consultaron los planes y programas de desarrollo urbano, industrial, agrícola y ganadero, así como los relativos a prevención y control de la contaminación ambiental. La información recopilada cubrió la totalidad del territorio nacional mediante datos estadísticos, y manejada a nivel municipal, estatal y cuenca hidrológica. Analizando 218 cuencas hidrológicas, las cuales cubren el 77 % de la superficie del país, 72 % de la producción total industrial, 98 % del área bajo riego y 93 % de la población existente en el país.

El procedimiento seguido por los estudios citados, para determinar el grado de contaminación de los recursos hídricos del país, fué el siguiente:

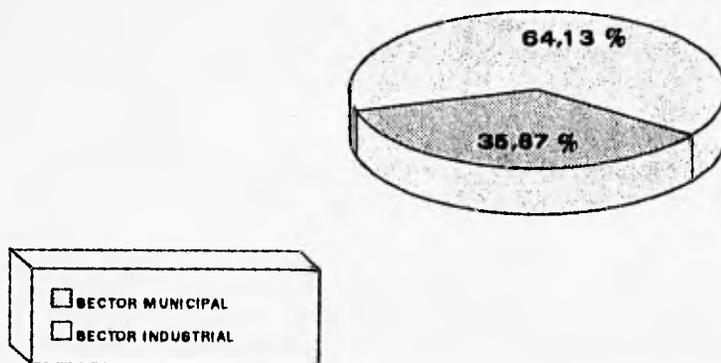
1.- Se evaluaron las descargas de aguas residuales, tanto de origen urbano como industrial, para lo cual se analizaron los registros de descargas de aguas residuales, los estudios realizados al respecto, así como una serie de bibliografía relacionada con el tema. Dentro de los factores que se analizaron se encuentran: consumo de agua, descargas de aguas residuales, carga de DBO por la población y por las diferentes actividades industriales (259 en total).

2.- Una vez conocidos los factores mencionados en el punto anterior, éstos fueron analizados de forma estadística, obteniéndose el consumo de agua, descarga de aguas residuales y descarga de DBO para los tres niveles de estudios (municipal, estatal y cuenca hidrológica).

⁹ ALFREDO FUAD DAVID GIDI. Control de la Contaminación del Agua en México. Fuente: SMISA. Memoria del VII Congreso Nacional. La Ingeniería Ambiental y la Salud. Oaxaca, Oax. Septiembre 1990. (Pág. B-10)

3.- Con la información recabada y estimada, los municipios fueron ordenados de acuerdo a la generación de materia orgánica medida como DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno); de éstos fueron seleccionados 180 con base en su generación de DBO, tanto de origen urbano como industrial, siempre y cuando ésta fuese mayor o igual a la materia orgánica generada por una población equivalente de 64,000 habitantes. También la información fué ordenada para la 32 entidades federativas de nuestro país (Tabla V-14) y las 31 cuencas más importantes (Tabla V-10)⁹, responsables de la descarga del 91 % de DBO total, generada a nivel nacional .

Como parte de los resultados del estudio anterior, se concluyó que a nivel nacional se genera (1990) una carga contaminante total, en términos de DBO de 2,359,274.3 ton/año, correspondiendo 846,216.4 ton/año (35.87%) al sector municipal y 1,513,058.9 ton/año (64.13%) al sector industrial (figura 8).



DISTRIBUCION DE LA CARGA CONTAMINANTE TOTAL (DBO) ANUAL

FIGURA 8

CUENCAS HIDROLOGICAS DE LA REPUBLICA MEXICANA ORDENADAS DE ACUERDO A SU GRADO DE CONTAMINACION					
CUENCA	Q. Rec. (L.p.s.)	DBD Urb. (kg/año)	DBD Ind. (kg/año)	DBD Total (kg/año)	% Ind.
Pánuco	43 925	296'570,226	293'597,010	590'167,236	26.59
Lerma-Santiago	18 773	114'905,211	205'070,198	319'975,409	14.42
San Juan	9 965	49'280,320	86'235,745	135'516,065	6.11
Balsas	8 616	43'722,726	76'727,400	120'450,126	5.43
Blanco	5 147	7'215,282	109'296,103	116'511,385	5.25
Papaloapan	4 162	6'788,406	106'452,742	113'241,148	5.10
Cullacán	3 574	6'522,830	79'178,239	85'701,069	3.86
Coatzac.	7 912	5'672,400	76'772,589	82'444,989	3.71
Fuerte	2 549	2'442,052	62'012,630	64'454,682	2.90
Jamapas	1 431	6'757,801	39'424,514	46'182,315	2.08
La Antigua	1 741	4'349,208	36'371,203	40'720,411	1.83
Guayalejo	1 426	1'482,430	32'165,467	33'647,897	1.52
Grijalva	2 141	10'112,242	14'437,338	24'549,580	1.11
Nazas	1 972	12'005,202	11'652,491	23'657,693	1.07
Coahuayana	1 090	2'759,008	20'811,881	23'570,889	1.06
Armería	1 145	4'250,850	18'669,076	22'919,926	1.03
Ameca	993	2'198,987	20'483,978	22'682,965	1.02
Conchos	2 456	10'625,367	11'533,890	22'159,257	1.00
Tijuana	1 391	10'548,631	8'690,999	19'239,630	0.87
Tehuant.	882	-	16'787,755	16'787,755	0.76
Salado	1 996	11'445,062	5'099,874	16'544,936	0.75
Colorado	1 244	9'617,035	4'697,003	14'314,038	0.64
Bravo	1 301	10'697,717	3'199,035	13'896,752	0.63
Yaqui	888	4'287,122	9'355,183	13'642,305	0.61
Nautla	580	1'170,648	10'814,278	11'984,926	0.54
Sonora	799	5'275,670	3'822,039	9'097,709	0.41
San Pedro	727	5'689,789	1'623,362	7'313,151	0.33
Lag. Coyuca	633	5'197,534	1'603,761	6'801,295	0.31

CUBECAS HIDROLOGICAS DE LA REPUBLICA MEXICANA ORDENADAS DE ACUERDO A SU GRADO DE CONTAMINACION					
CUBECA	Q. Res. (l.p.a.)	DBO Urb. (kg/año)	DBO Ind. (kg/año)	DBO Total (kg/año)	% Nat.
Purificación	220	-	6'790,955	6'790,955	0.30
Presidio	496	3'886,106	2'017,999	5'904,105	0.26
Concepción	521	3'007,657	2'740,788	5'748,445	0.25
TOTAL	130 696 (89.76%)	658'483,519 (82.85%)	1'378'135,525 (96.72%)	2'036'619,044 (91.75%)	

TABLA V-10

V.4 LOCALIDADES CON POTENCIALIDAD DE REUSO

México está afrontando grandes problemas de disponibilidad de agua, problemas provocados por la insuficiencia de fuentes de abastecimiento, o bien, por el estado actual de contaminación de las mismas, lo que limita sus posibles usos.

En la actualidad, el reuso se presenta como la alternativa más adecuada para aprovechar al máximo los recursos hidráulicos en aquellas localidades donde éstos sean escasos. En el país, el reuso es una práctica que viene realizándose, principalmente con fines agrícolas y sin el adecuado control en la mayoría de los casos, desde hace algún tiempo. Tanto el Valle de México como la ciudad de Monterrey, son sólo dos ejemplos del esfuerzo por implementar el reuso de agua, como una práctica común del país. Sin embargo, el reuso de agua no es necesario en todas las localidades del país, ya que éste no representa una alternativa atractiva para aquellas localidades que poseen agua de calidad adecuada en abundancia y ésta pueda ser obtenida a costos razonables.

Bajo el conocimiento de que los principales usos del agua (de acuerdo a sus volúmenes de consumo) en nuestro país son: la agricultura, la industria y los centros de población, nuestro análisis subsecuente centrará sus esfuerzos en definir de manera específica aquellas localidades que poseen amplias posibilidades para reusar sus aguas residuales, de acuerdo a sus perspectivas de desarrollo (industrial y urbano), así como dependiendo del estado actual de contaminación de su o sus fuentes de abastecimiento.

A continuación se enlistan aquellas localidades que resultan ser candidatas potenciales a proyectos de reuso de a los criterios de selección anteriormente expuestos y de acuerdo a sus perspectivas de desarrollo.



NOTACION

- Areas con potencialidad de reuso de las aguas residuales tratadas
- Areas sin potencialidad de reuso de las aguas residuales tratadas

**AREAS CON POTENCIALIDAD DE REUSO DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS,
DE ACUERDO A SUS PERSPECTIVAS DE DESARROLLO INDUSTRIAL**

FIGURA 9

a) Desarrollo Industrial

Las que se suscriben en la Tabla V-11¹⁰ y figura 9, representan aquellas localidades que poseen amplias perspectivas de desarrollo industrial, por lo que resultan a la par, potenciales candidatas del reuso y circulación del agua, en el conocimiento de que el agua es fundamental para el pleno desarrollo de las actividades industriales.

¹⁰ PLAN REGIDOR DE AGUAS RESIDUALES (Págs. 16,17,18 y 19)

LOCALIDADES CON POTENCIALIDAD DE REUSO, DE ACUERDO A SUS PERSPECTIVAS DE DESARROLLO INDUSTRIAL.	
ESTADO	LOCALIDAD
Aguascalientes	Aguascalientes
Baja California Norte	Ensenada, Mexicali, Tijuana
Campeche	Campeche
Coahuila	Acuña, Piedras Negras, Monclova, Torreón
Colima	Manzanillo
Chihuahua	Chihuahua, Juárez
Chiapas	Tapachula, Tuxtla Gutiérrez
Durango	Gómez Palacio, Lerdo
Guanajuato	Celaya, Irapuato, León, Salamanca, Silao, Villagrán
Hidalgo	Apan, Pachuca
Jalisco	Lagos de Moreno
México	Amecameca, Chalco, Ecatepec, Netzahualcóyotl, Texcoco, Toluca, Zumpango
Michoacán	Lázaro Cárdenas
Morelos	Cuautla, Cuernavaca, Yautepec
Oaxaca	Juchitán de Zaragoza, Salina Cruz
Puebla	Atlixco, Puebla, San Miguel Texmelúcan
Querétaro	Querétaro
San Luis Potosí	Ciudad Valles, Ebanó, San Luis Potosí
Sinaloa	Ahome, Culiacán, Guasave, Mazatlán
Sonora	Cananea, Empalme, Guaymas, Huatabampo, Nogales
Tabasco	Cárdenas, Comalcalco, Macuspana
Tamaulipas	Cd. Madero, Mante, Matamoros, Nuevo Laredo, Reynosa, Río Bravo, Tampico, Valle Hermoso
Tlaxcala	Tlaxcala
Veracruz	Acahucan, Coatzacoalcos, Minatitlán, Pánuco, Poza Rica, Tuxpan, Veracruz
Yucatán	Mérida, Progreso
Zacatecas	Zacatecas

TABLA V-11

b) Crecimiento Urbano

En las épocas modernas de escasez y conflicto del agua potable, es necesario plantear el reuso y recirculación del agua como una de las alternativas más viables para atender las demandas de agua potable en los núcleos urbanos, ya que esta medida además contribuye al mejoramiento del ambiente, factor importante para prever las condiciones adecuadas en el establecimiento de los asentamientos humanos.

Las localidades contenidas dentro de la Tabla V-12¹¹ y figura 10, representan aquellas localidades con amplias perspectivas de desarrollo urbano y por lo tanto resultan ser igualmente localidades con amplias posibilidades de reuso y recirculación de agua.

c) Escasez y Conflicto de agua

Como se externó con anterioridad, existen algunas localidades dentro de nuestro país que padecen graves problemas de escasez de agua. El reuso y la circulación del agua representan en estos casos una de las alternativas más viables para aliviar dichos conflictos de disponibilidad ante la creciente demanda de agua.

En la Tablas V-13 A, V-13 B, V-13 C, V-13 D, V-13 E y V-13 F¹² y en las figuras 11A y 11B, se presentan aquellas localidades con conflictos presentes y futuros de disponibilidad de agua y que por lo tanto, prometen ser usuarios potenciales para el reuso y recirculación del agua.

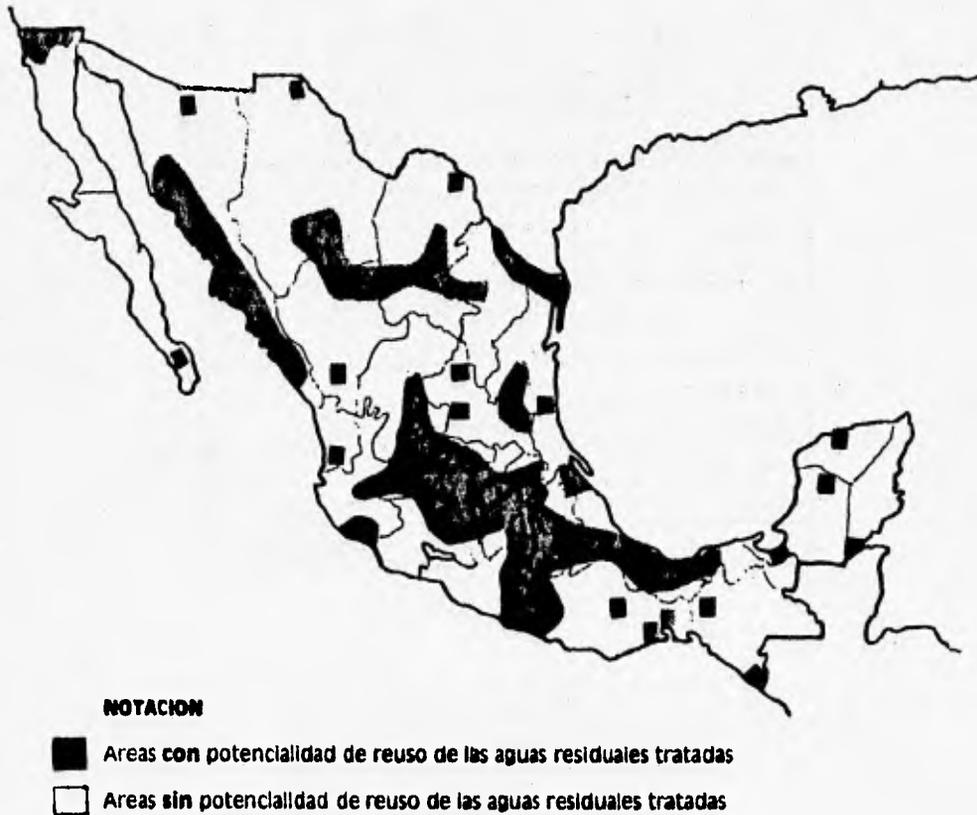
CENTROS DE POBLACION CON POSIBILIDADES DE REUSO DE ACUERDO A SUS PERSPECTIVAS DE DESARROLLO URBANO	
ESTADO	CENTRO DE POBLACION
Aguascalientes	Aguascalientes
Baja California	Ensenada, Mexicali, Tijuana, La Paz
Campeche	Campeche, Ciudad del Carmen
Coahuila	Piedras Negras, Nueva Rosita, Monclova, Saltillo, Torreón
Colima	Colima, Manzanillo
Chiapas	Tuxtla Gutiérrez, Tapachula

¹¹ PLAN REGIDOR DE AGUAS RESIDUALES (págs. 22, 23 y 24)

¹² Adaptación de: PLAN REGIDOR DE AGUAS RESIDUALES. (Págs 27, 28 y 29)

CENTROS DE POBLACION CON POSIBILIDADES DE REUSO DE ACUERDO A SUS PERSPECTIVAS DE DESARROLLO URBANO	
ESTADO	CENTRO DE POBLACION
Chihuahua	Juárez, Cuauhtémoc, Chihuahua, Delicias, Hidalgo del Parral
Durango	Durango, Gómez Palacio, Lerdo
Guanajuato	Celaya, Salamanca, Guanajuato, León, Irapuato
Guerrero	Acapulco, Chilpancingo, Iguala
Hidalgo	Pachuca, Ciudad Sahagún, Tulancingo
Jalisco	Guadalajara, Lagos de Moreno, Ocotlán
México	Toluca
Michoacán	Zamora, Morelia, Zitácuaro, Uruapan
Morelos	Cuautla, Cuernavaca
Nayarit	Tepic
Nuevo León	Monterrey
Oaxaca	Juchitán, Salina Cruz, Oaxaca
Puebla	Izúcar de Matamoros, Puebla, Tehuacán
Querétaro	Querétaro, San Juan del Río
Quintana Roo	Chetumal
San Luis Potosí	Mathuala, San Luis Potosí, Ciudad Valles
Sinaloa	Guasave, Los Mochis, Culiacán, Mazatlán
Sonora	San Luis Río Colorado, Nogales, Hermosillo, Guaymas, Empalme, Ciudad Obregón, Navojoa
Tabasco	Cárdenas
Tamaulipas	Nuevo Laredo, Matamoros, Reynosa, Ciudad Victoria, Ciudad Mante, Ciudad Madero, Tampico
Tlaxcala	Apizaco, Tlaxcala
Veracruz	Tuxpan, Poza Rica, Jalapa, Veracruz, Córdoba, Orizaba, Coatzacoalcos, Minatitlán
Yucatán	Mérida
Zacatecas	Fresnillo, Zacatecas

TABLA V-12



**AREAS CON POTENCIALIDAD DE REUSO DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS,
DE ACUERDO A SUS PERSPECTIVAS DE DESARROLLO URBANO**

FIGURA 10

LOCALIDADES CON CONFLICTO ACTUAL Y FUTURO DE DISPONIBILIDAD DE AGUA	
ESTADO	LOCALIDAD
Baja California Norte	Ensenada, Tijuana
Coahuila	Piedras Negras, Torreón
Chihuahua	Ciudad Juárez
D.F.	Ciudad de México
Durango	Gómez Palacio, Lerdo
Guanajuato	Salamanca
Jalisco	Guadalajara
México	Toluca
Sonora	Nogales
Tamaulipas	Matamoros, Nuevo Laredo, Reynosa

TABLA V-13 A

LOCALIDADES CON CONFLICTOS ACTUALES DE DISPONIBILIDAD DE AGUA	
ESTADO	LOCALIDAD
Tamaulipas	Ciudad Madero, Tampico
Veracruz	Coatzacoalcos, Minatitlán
Yucatán	Mérida

TABLA V-13 B

LOCALIDADES CON CONFLICTO ACTUAL DE DISPONIBILIDAD DE AGUA, PERO CON FUENTES ALTERNATIVAS DE ABASTECIMIENTO SIN CONFLICTO	
ESTADO	LOCALIDAD
Guerrero	Iguala
Oaxaca	Salina Cruz

TABLA V-13 C

LOCALIDADES CON CONFLICTO FUTURO DE DISPONIBILIDAD DE AGUA	
ESTADO	LOCALIDAD
Baja California	La Paz
Coahuila	Saltillo
Guanajuato	Celaya, Irapuato, León
Hidalgo	Pachuca, Ciudad Sahagún
Nuevo León	Monterrey
Oaxaca	Juchitán
Puebla	Puebla
Querétaro	Querétaro
Quintana Roo	Cancún
San Luis Potosí	San Luis Potosí
Sonora	Empalme, Guaymas, Hermosillo

TABLA V-13 D

LOCALIDADES EN CONFLICTO DE DISPONIBILIDAD DE AGUA HASTA AÑO 2000	
ESTADO	LOCALIDAD
Aguascalientes	Aguascalientes
Baja California Norte	Mexicali
Campeche	Campeche, Ciudad del Carmen
Colima	Manzanillo, Colima
Chiapas	Tuxtla Gutiérrez, Tapachula
Chihuahua	Chihuahua, Cuauhtémoc, Delicias, Hidalgo del Parral
Durango	Durango
Guanajuato	Guanajuato
Guerrero	Acapulco, Chilpancingo, Zihuatanejo
Hidalgo	Tulancingo
Jalisco	Lagos de Moreno, Ocotlán, Puerto Vallarta
Michoacán	Zamora, Morelia, Zitácuaro, Uruapan, Lázaro Cárdenas
Morelos	Cuatla, Cuernavaca
Nayarit	Tepic
Oaxaca	Oaxaca
Puebla	Izúcar de Matamoros, Tehuacán
Querétaro	San Juan del Río
Quintana Roo	Chetumal
San Luis Potosí	Ciudad Valles, Matehuala
Sinaloa	Los Mochis, Culiacán, Guasave, Mazatlán
Sonora	San Luis Río Colorado, Ciudad Obregón, Navojoa
Tabasco	Cárdenas, Villa Hermosa
Tamaulipas	Mante, Ciudad Victoria
Tlaxcala	Apizaco, Tlaxcala
Veracruz	Poza Rica, Tuxpan, Jalapa, Veracruz, Córdoba, Orizaba
Zacatecas	Fresnillo, Zacatecas

TABLA V-13 E

LOCALIDADES SIN ESTUDIOS DE AGUAS SUBTERRANEAS, PERO CON EVIDENCIAS DE ESTAS	
ESTADO	LOCALIDAD
Coahuila	Nueva Rosita, Monclova

TABLA V-13 F

d) Grado de Contaminación

La contaminación de todo el entorno natural del hombre amenaza con deteriorar e incluso desbastar la vida sobre la tierra. La contaminación del agua es importante de considerar en particular, porque es la sustancia más usada en la mayoría de las actividades del hombre, que incluye su uso como medio de arrastre de los desechos originados por muchas actividades. Siendo precisamente en éste último uso donde se contamina más el agua y se vuelve inapropiada para su reaprovechamiento.

En nuestro país, el uso indiscriminado de los recursos hidráulicos, en la constante expansión de las poblaciones, procesos industriales y agricultura, ha conducido a su sobreexplotación y a alterar su cantidad y **calidad** original, repercutiendo en la degradación de la ecología del lugar y en la contaminación de los cuerpos de agua, mas aún, cuando éstos captan la variedad de aguas de desecho provenientes de los grandes centros urbanos.

La tabla V-14 y figura 12, se presentan los estados de la República Mexicana, ordenados de acuerdo a su grado de contaminación, medida como contenido de material orgánico (carga de Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO). Dicha información como se mencionó con anterioridad, es parte del resultado de una serie de estudios exhaustivos dirigidos a la determinación del grado de contaminación del agua en las cuencas del país; para lograr lo anterior se analizaron 218 cuencas hidrológicas, las cuales cubren el 77 % de la superficie del país, 72 % de la producción total industrial, 98 % del área bajo riego y 93% de la población existente en el país.¹³

¹³ MEMORIA DEL VII CONGRESO NACIONAL. SMISA. La leg. Amb. y la Salud. Oaxaca, Oax. Septiembre 1990. (pág. B-10)



NOTACION

- Localidades con conflicto actual y futuro de disponibilidad de agua
- ▣ Localidades con conflictos actuales de disponibilidad de agua
- ▤ Localidades con conflictos actuales de disponibilidad de agua, pero con fuentes alternativas de abastecimiento sin conflicto
- ⋯ Localidades con conflicto futuro de disponibilidad de agua

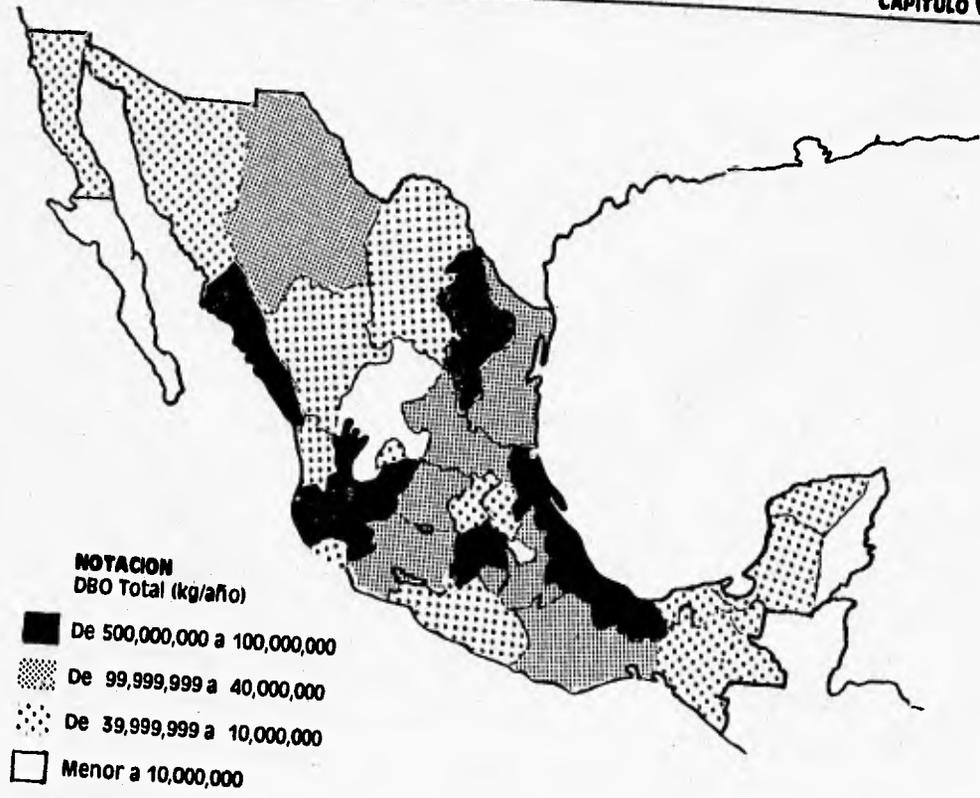
**AREAS CON POTENCIALIDAD DE REUSO DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS,
DE ACUERDO A SUS CONFLICTOS DE ESCASEZ Y DISPONIBILIDAD DE AGUA**

FIGURA 11A



**AREAS CON POTENCIALIDAD DE REUSO DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS,
DE ACUERDO A SUS CONFLICTOS DE ESCASEZ Y DISPONIBILIDAD DE AGUA**

FIGURA 11B



ESTADOS DE LA REPUBLICA MEXICANA,
ORDENADOS DE ACUERDO A SU GRADO DE CONTAMINACION

FIGURA 12

ESTADOS DE LA REPUBLICA MEXICANA ORDENADOS DE ACUERDO A SU GRADO DE CONTAMINACION					
ESTADO	Q. Res. (Lp.s.)	DSO Urb. (kg/año)	DSO Ind. (kg/año)	DSO Total (kg/año)	% Nal.
Veracruz	22 240	43'454,992	370'983,876	414'438,868	17.57
D.F.	27 834	218'577,979	144'811,126	363'389,107	15.40
Jalisco	9 824	56'795,970	219'010,504	275'806,474	11.69
Edo. de Méx.	16 311	103'732,258	101'655,394	205'387,652	8.71
Nuevo León	8 193	86'277,203	83'201,756	171'478,959	7.27
Sinaloa	7 036	16'546,461	160'746,225	177'292,686	7.52
Oaxaca	3 239	7'832,781	64'571,861	72'404,646	3.07
Tamaulipas	4 790	28'014,055	42'739,259	70'753,314	3.00
San Luis P.	2 968	12'023,686	43'924,702	55'948,388	2.37
Morelos	2 498	9'187,726	45'047,553	54'235,279	2.30
Guanajuato	5 127	32'113,545	16'818,246	48'931,791	2.07
Michoacán	3 302	22'275,820	22'264,789	44'540,609	1.89
Chihuahua	4 122	26'466,945	16'100,106	42'567,051	1.80
Puebla	3 460	21'444,831	19'072,558	40'517,389	1.72
Coahuila	3 999	24'335,732	15'168,649	39'504,381	1.67
Sonora	3 026	20'489,844	18'550,610	39'040,454	1.66
B. California	2 803	22'432,437	15'675,200	38'107,637	1.61
Nayarit	1 387	5'933,707	24'188,027	30'121,734	1.28
Hidalgo	1 539	6'111,135	20'837,956	26'949,091	1.14
Tabasco	1 148	6'579,682	12'788,852	19'368,534	0.82
Yucatán	1 284	10'910,056	4'162,904	15'072,960	0.64
Colima	858	4'268,074	10'066,769	14'334,843	0.61
Campeche	774	4'081,662	9'941,308	14'022,970	0.59
Guerrero	1 346	11'919,996	2'560,166	14'480,162	0.61
Durango	1 167	7'955,029	5'760,476	13'715,505	0.58
Chiapas	1 355	8'524,856	5'034,172	13'559,028	0.57
Aguascalientes	948	8'417,540	2'918,617	11'336,157	0.48
Querétaro	1 260	4'732,780	6'174,917	10'907,697	0.46

ESTADOS DE LA REPUBLICA MEXICANA ORDENADOS DE ACUERDO A SU GRADO DE CONTAMINACION					
ESTADO	Q. Res. (l.p.s.)	DBO Urb. (kg/año)	DBO Ind. (kg/año)	DBO Total (kg/año)	% Mal.
Zacatecas	690	5'524,789	1'671,482	7'196,271	0.31
B.C.S.	473	2'577,523	4'242,477	6'819,996	0.29
Tlaxcala	431	3'037,348	2'320,480	5'357,828	0.23
Q. Roo	173	1'639,981	47,899	1'687,880	0.07
TOTAL	145 605	846'216,423 (33.87%)	1'513'058,918 (64.13%)	2'359'274,341	

TABLA V-15

V.5 VOLUMENES POTENCIALES DE REUSO

Para poder determinar los volúmenes potenciales de reuso, primeramente es necesario definir con precisión, aquellas localidades que poseen las mas altas probabilidades de reuso. Existe una serie de criterios rectores que nos ayudan a lograr el objetivo anterior; de manera general dichos criterios rectores son los siguientes:

- 1) Escasez de recursos hidráulicos disponibles para el abastecimiento.
- 2) Limitación de disponibilidad del agua, por su baja calidad.
- 3) Necesidad de recurrir a fuentes de abastecimiento cada vez más lejanas y a mayores costos.
- 4) Presencia de usuarios potenciales, dispuestos a utilizar agua de menor calidad a costos razonables.
- 5) Existencia de infraestructura de servicio de drenaje.
- 6) Cercanía de la fuente de captación de aguas residuales se encuentre cercana a las zonas potenciales de reuso.
- 7) Presencia de instalaciones de tratamiento.

Basándose en los criterios rectores antes mencionados, el presente trabajo tubo a bien el definir una metodología específica de selección de las localidades con las mas altas posibilidades de reuso. En términos generales, dicha metodología consiste en lo siguiente:

- 1) Registro de todas aquellas localidades con altas posibilidades de reuso de las aguas residuales, de acuerdo a sus perspectivas de desarrollo industrial (tabla V-11 y figura 9).

2) Registro de todas aquellas localidades con altas posibilidades de reuso de las aguas residuales, de acuerdo a sus perspectivas de desarrollo urbano (tabla V-12 y figura 10).

3) Registro de todas aquellas localidades con conflictos de disponibilidad de los recursos hidráulicos (tablas V-13 A,B,C,D y figuras 11A y 11B).

4) Definición del grado de contaminación de los recursos hídricos, agrupados y definidos en términos de entidad federativa (tabla V-14 y figura 12)

5) Correlación de toda la información determinada en los puntos anteriores, obteniéndose como resultado las localidades que poseen las mas altas probabilidades de reuso de las aguas residuales de acuerdo a sus perspectivas de desarrollo industrial y urbano, al mismo tiempo de que tengan conflictos a corto y/o mediano plazo de disponibilidad de recursos hidráulicos y que su fuente de abastecimiento actual tenga un grado de contaminación considerable; siendo éste último el parámetro de selección de mayor peso.

6) Por último, para poder determinar los volúmenes de aguas residuales potenciales de reuso, se eligieron de las localidades obtenidas hasta el punto anterior, aquellas que tenían una población mayor a 100,000 habs.¹⁴, hasta el censo de 1990.

La figura 13 muestra de manera gráfica aquellas localidades elegidas, como aquellas que poseen la mas alta potencialidad de reuso de sus aguas residuales, de acuerdo al criterio de selección definido con anterioridad.

Para poder determinar los volúmenes de aguas residuales a corto y mediano plazo, se tuvieron que hacer muchas consideraciones:

a) Los datos de las poblaciones para 1990 fueron obtenidas de los resultados censales del mismo año, proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

b) Las dotaciones de agua potable fueron establecidas de acuerdo a las normas de dotación media, en función del número de habitantes y el clima; las cuales son aplicables a todas las poblaciones del país.¹⁵

c) Los porcentajes de servicio tanto de agua potable como de alcantarillado, fueron obtenidos de los resultados de los censos del INEGI de población y vivienda de 1990.

¹⁴ Existen algunas localidades con poblaciones menores a 100,000 habitantes, a pesar de lo cual fueron seleccionadas debido a que su fuente actual de abastecimiento de agua se encuentra altamente contaminada.

¹⁵ ING. ENRIQUE CESAR VALDEZ. Abastecimiento de agua potable. Depto. de Ing. Sanitaria. Facultad de Ingeniería, UNAM. Volumen I 1990.



NOTACION

-  Localidades con alta potencialidad de reuso de las aguas residuales tratadas
-  Localidades sin una alta potencialidad de reuso de las aguas residuales tratadas

**LOCALIDADES CON LAS MAS ALTAS POSIBILIDADES DE REUSO,
DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS**

FIGURA 13

d) Se consideró un Coeficiente de retorno de las aguas residuales igual a 0.8.

e) Para los fines establecidos por el presente, se consideró suficiente el análisis para dos años, 1990 porque se contaba con los datos censales y otro plazo medio al año 2005.

Los volúmenes de aguas residuales tratadas para el año 2005, se calcularon bajo las siguientes consideraciones:

f) Las proyecciones de las poblaciones se hicieron utilizando el modelo geométrico, aplicando la fórmula:

$$P = P_0 (1 + i)^t$$

Donde:

P: Resultado de proyección de la población

P₀: Dato de población inicial disponible (1990)

i: Tasa de crecimiento media anual

t: Plazo (en años) a partir del año en que se tiene la población inicial, al año en que se quiere proyectar.

g) Para las proyecciones de las poblaciones, se utilizaron las tasas de crecimiento media anual correspondientes al municipio (correspondientes a la década 1890-1990 y proporcionadas por el INEGI); considerando que el crecimiento de las poblaciones tendería a permanecer aproximadamente constante para los años posteriores.

h) Ante la imposibilidad de obtener datos mas reales, se consideró que tanto las dotaciones como el nivel de servicio de agua potable y alcantarillado permanecerán constantes hasta el año 2005.

A continuación se presentan los resultados de las estimaciones de los volúmenes de aguas residuales de las poblaciones con mayores posibilidades de reuso. La tabla V-15 contiene los volúmenes de aguas residuales disponibles al año 1990, mientras que la tabla V-17 muestra las estimaciones de los volúmenes de aguas residuales potenciales al año 2005. La tabla V-16 muestra los datos base para la proyección de las poblaciones para el año 2005 a partir de los datos del censo de 1990.

VOLUMENES DE AGUAS RESIDUALES DISPONIBLES PARA SU REUSO, EN EL AÑO 1990					
ESTADO/ LOCALIDAD	POBLACION TOTAL (habs.)	DOTACION (l/hab/día)	SERVICIO DE AGUA POTABLE (%)	SERVICIO DE DRENAJE (%)	VOL. DE AGUAS RES. (miles de m³)
Aguascalientes					
Ags.	440,425	350	97.32	96.56	115.89
B. C. N.					
Ensenada	169,426	350	87.07	76.33	31.53
Mexicali	438,377	350	91.08	80.71	90.23
Tijuana	698,752	350	68.81	64.92	87.40
Campeche					
Campeche	150,518	300	86.12	74.03	23.03
Coahuila					
Torreón	439,436	350	94.38	89.89	104.39
Monclova	177,792	350	94.80	72.20	34.06
Chihuahua					
Chihuahua	516,153	350	90.65	85.03	111.40
Juárez	789,522	350	88.15	74.50	145.18
Chiapas					
Tapachula	138,858	300	68.37	88.51	20.17
Tuxtla Ctz.	289,626	350	82.93	85.83	57.72
D.F.					
Cd. de Méx.	8,235,744	300	96.29	93.77	1784.67
Durango					
Góm. Palac.	164,092	350	94.10	86.93	37.58
Guanajuato					
Celaya	214,856	300	92.54	86.93	41.48
Irapuato	265,042	300	90.02	80.28	46.20
León	758,279	300	93.42	93.70	159.30
Salamanca	123,190	250	94.88	89.78	21.00

VOLUMENES DE AGUAS RESIDUALES DISPONIBLES PARA SU REUSO, EN EL AÑO 1980					
ESTADO/ LOCALIDAD	POBLACION TOTAL (habs.)	DOTACION (l/hab/día)	SERVICIO DE AGUA POTABLE (%)	SERVICIO DE DRENAJE (%)	VOL. DE AGUAS RES. (mltes de m ³)
Hidalgo Pachuca	174,013	300	92.55	92.56	35.78
México Toluca	327,865	300	91.02	91.11	65.25
Morelos Cuautla	110,242	300	89.05	81.53	19.21
Cuernavaca	279,187	350	91.50	89.89	64.30
Nuevo León Monterrey	1,068,996	350	90.51	87.53	237.13
Puebla Puebla	1,007,170	300	87.17	90.15	189.95
Jalisco Guadalajara	1,650,042	300	96.59	93.37	357.15
Querétaro Querétaro	385,503	300	92.05	90.02	76.67
San Luis Potosí San Luis P.	489,238	350	95.90	94.41	124.03
Sinaloa Cullacán	415,238	350	91.14	75.73	80.21
Mazatlán	262,705	350	91.18	83.12	55.75
Sonora Nogales	105,473	300	79.77	78.26	15.80
Tamaulipas Cd. Madero	160,331	350	89.74	82.30	33.16
Cd. Mante	76,799	350	80.50	59.40	10.28
Matamoros	266,055	350	79.82	66.06	39.28

VOLUMENES DE AGUAS RESIDUALES DISPONIBLES PARA SU REUSO, EN EL AÑO 1980					
ESTADO/ LOCALIDAD	POBLACION TOTAL (hab.)	DOTACION (l/hab/día)	SERVICIO DE AGUA POTABLE (%)	SERVICIO DE DRENAJE (%)	VOL. DE AGUAS RES. (miles de m ³)
Nvo. Laredo	218,413	350	86.95	76.90	40.89
Reynosa	265,663	350	90.58	67.16	45.25
Tampico	272,690	350	90.96	82.30	57.16
Veracruz					
Coatzacoalcos	198,817	350	80.12	83.30	37.15
Minatitlán	142,060	300	55.49	86.84	16.43
Poza Rica	151,739	350	83.11	88.87	31.38
Veracruz	303,152	350	91.06	87.96	67.99
Yucatán					
Mérida	523,422	350	83.16	76.21	92.88
Zacatecas					
Zacatecas	100,051	300	92.92	85.00	18.96

TABLA V-15

PROYECCION DE POBLACIONES			
ESTADO/ LOCALIDAD	POBLACION INICIAL, AÑO 1960 (Habitantes)	TASA DE CRECIMIENTO MEDIA ANUAL (1960-1990)	POBLACION FINAL, AÑO 2206 (Habitantes)
Aguascalientes			
Aguascalientes	440,425	4.0	793,181
B. C. N.			
Ensenada	169,426	4.1	309,557
Mexicali	438,377	1.7	564,498
Tijuana	698,752	5.1	1,473,546
Campeche			
Campeche	150,518	1.4	185,421
Coahuila			
Torreón	439,436	2.5	636,434
Monclova	177,792	4.2	329,555
Chihuahua			
Chihuahua	516,153	2.8	781,043
Juárez	789,522	3.6	1,342,025
Chiapas			
Tapachula	138,858	4.5	268,718
Tuxtla Gutiérrez	289,626	6.0	694,106
Distrito Federal			
Cd. de México	8,235,744	0.89	9,406,427
Durango			
Cómez Palacio	164,092	2.66	243,280
Guanajuato			
Celaya	214,856	3.6	365,211
Irapuato	265,042	4.0	477,326
León	758,279	2.9	1,164,286

PROYECCION DE POBLACIONES			
ESTADO/ LOCALIDAD	POBLACION INICIAL, AÑO 1990 (Habitantes)	TASA DE CRECIMIENTO MEDIA ANUAL (1990-1990)	POBLACION FINAL, AÑO 2205 (Habitantes)
Salamanca	123,190	2.5	178,416
Hidalgo			
Pachuca	174,013	3.0	271,107
México			
Toluca	327,865	3.2	525,885
Morelos			
Cautia	110,242	2.5	159,663
Cuernavaca	279,187	2.0	375,744
Nuevo León			
Monterrey	1,068,996	-0.2	1,037,371
Puebla			
Puebla	1,007,170	2.4	1,437,481
Jalisco			
Guadalajara	1,650,042	0.15	1,687,560
Querétaro			
Querétaro	385,503	4.5	746,057
San Luis Potosí			
San Luis Potosí	489,238	2.7	729,587
Sinaloa			
Cullacán	415,238	2.8	628,048
Mazatán	262,705	2.4	374,945
Sonora			
Nogales	105,473	4.8	213,089
Tamaulipas			
Cd. Madero	160,331	2.0	215,784
Cd. Mante	76,799	0.9	87,846

PROYECCION DE POBLACIONES			
ESTADO/ LOCALIDAD	POBLACION INICIAL, AÑO 1990 (Habitantes)	TASA DE CRECIMIENTO MEDIA ANUAL (1990-1990)	POBLACION FINAL, AÑO 2205 (Habitantes)
Matamoros	266,055	2.5	385,327
Nuevo Laredo	218,413	0.8	246,142
Reynosa	265,663	3.0	413,894
Tampico	272,690	0.2	280,986
Veracruz			
Coatzacoalcos	198,817	3.7	342,874
Minatitlán	142,060	3.6	241,473
Poza Rica	151,739	1.1	178,799
Veracruz	303,152	1.7	390,368
Yucatán			
Mérida	523,422	2.8	792,043
Zacatecas			
Zacatecas	100,051	2.1	136,649

TABLA V-16

VOLUMENES DE AGUAS RESIDUALES DISPONIBLES PARA SU REUSO, EN EL AÑO 2005					
ESTADO/ LOCALIDAD	POBLACION TOTAL (hab.)	DOTACION (l/hab/día)	SERVICIO DE AGUA POTABLE (%)	SERVICIO DE DESALIN (%)	VOL. DE AGUAS RES. (ml/seg de m ²)
Aguascalientes					
Ags.	793,181	350	97.32	96.56	208.70
B. C. N.					
Ensenada	309,557	350	87.07	76.33	57.61
Mexicali	564,498	350	91.08	80.71	116.19
Tijuana	1,473,546	350	68.81	64.92	184.31
Campeche					
Campeche	185,421	300	86.12	74.03	28.37
Coahuila					
Torreón	636,434	350	94.38	89.89	151.18
Monclova	329,555	350	94.80	72.20	63.16
Chihuahua					
Chihuahua	781,043	350	90.65	85.03	168.57
Cd. Juárez	1,342,025	350	88.15	74.50	246.77
Chiapas					
Tapachula	268,718	300	68.37	88.51	39.03
Tux. Gtz.	694,106	350	82.93	85.83	138.34
D. F.					
Cd. de Méx.	9,406,427	300	96.29	93.77	2038.36
Durango					
Góm. Palacio	243,280	350	94.10	86.93	55.72
Guanajuato					
Celaya	365,211	300	92.54	86.93	70.51
Irapuato	477,326	300	90.02	80.28	83.20
León	1,164,286	300	93.42	93.70	244.60
Salamanca	178,416	250	94.88	89.78	30.40

VOLUMENES DE AGUAS RESIDUALES DISPONIBLES PARA SU REUSO, EN EL AÑO 2005					
ESTADO/ LOCALIDAD	POBLACION TOTAL (hab.)	DOTACION (l/hab/día)	SERVICIO DE AGUA POTABLE (%)	SERVICIO DE SANEAMIENTO (%)	VOL. DE AGUAS RES. (mln de m³)
Hidalgo Pachuca	271,107	300	92.55	92.56	55.74
México Toluca	525,885	300	91.02	91.11	104.67
Morelos Cuatla	159,663	300	89.05	81.53	27.82
Cuernavaca	375,749	350	91.50	89.89	86.53
Nuevo León Monterrey	1,037,371	350	90.51	87.53	230.12
Puebla Puebla	1,437,481	300	87.17	90.15	271.11
Jalisco Guadalajara	1,687,560	300	96.59	93.37	365.27
Querétaro Querétaro	746,057	300	92.05	90.02	148.37
San Luis Potosí San Luis P.	729,587	350	95.90	94.41	184.96
Sinaloa Cullacán	628,048	350	91.14	75.73	121.37
Mazatlán	374,945	350	91.18	83.12	79.57
Sonora Nogales	213,089	300	79.77	78.26	31.93
Tamaulipas Cd. Madero	215,784	350	89.74	82.30	44.62
Cd. Mante	87,846	350	80.50	59.40	11.76
Matamoros	385,327	350	79.82	66.06	56.89

VOLUMENES DE AGUAS RESIDUALES DISPONIBLES PARA SU REUSO, EN EL AÑO 2005					
ESTADO/ LOCALIDAD	POBLACION TOTAL (hab.)	DOTACION (l/hab/día)	SERVICIO DE AGUA POTABLE (%)	SERVICIO DE DRENAJE (%)	VOL. DE AGUAS RES. (mln de m ³)
Nvo. Laredo	246,142	350	86.95	76.90	46.08
Reynosa	413,894	350	90.58	67.16	70.50
Tampico	280,986	350	90.96	82.30	58.90
Veracruz					
Coatzacoac.	342,874	350	80.12	83.30	64.07
Minatitlán	241,473	300	55.49	86.84	27.93
Poza Rica	178,799	350	83.11	88.87	36.98
Veracruz	390,368	350	91.06	87.96	87.55
Yucatán					
Mérida	792,043	350	83.16	76.21	104.55
Zacatecas					
Zacatecas	136,649	300	92.92	85.00	25.90

TABLA V-17

La implementación del programa de reuso para las localidades seleccionadas, será específica de acuerdo a los requerimientos particulares de cada proyecto, pero en términos generales se deberá apegar a la siguiente secuencia:

1) **Estudios preliminares.** Esta etapa consiste en la evaluación del impacto ambiental de la implantación del proyecto de reuso en la zona, así como la evaluación y selección de los mercados potenciales para las aguas residuales producidas.

2) **Ubicación de las fuentes de aguas residuales.** Consiste en la localización, cuantificación de volúmenes y en la definición de las características de las aguas residuales, por medio de análisis de laboratorio.

3) **Promoción del reuso.** Esta etapa se refiere a la promoción del reuso de las aguas entre los usuarios potenciales, con el objeto de concientizarlos y sensibilizarlos en los beneficios del reuso.

4) Estudios de mercado para las aguas residuales. Consiste en la definición de los usuarios potenciales para las aguas residuales producidas, así como la determinación de sus requerimientos de calidad y cantidad.

5) Revisión legal. En esta etapa deberá hacerse un análisis de reconocimiento de las dependencias involucradas en el proyecto de reuso, así como la revisión de los procedimientos y legislaciones aplicables.

6) Evaluación de apoyos financieros. Esta etapa se encuentra orientada a la obtención de recursos financieros ya sea por medio del apoyo federal, estatal, municipal o de alguna otra entidad nacional o internacional.

7) Análisis económico. Consiste principalmente en la confrontación de los costos asociados a la fuente actual de abastecimiento de agua y los costos asociados al reuso de el agua residual tratada (incluye costos de tratamiento, almacenamiento y distribución).

8) Implementación legal. En esta etapa se ordena la documentación referente a al implantación del proyecto de reuso, para su presentación y tramitación ante las autoridades correspondientes.

9) Certificación de la calidad. Monitoreo de la calidad del efluente de la planta de tratamiento, con objeto de corroborar que cumpla con los criterios de calidad requeridos para los usos específicos.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

A continuación se exponen las principales conclusiones a las que se llegó en el presente estudio:

1.- El uso del agua, en la mayoría de los casos, degrada su calidad por la incorporación de sustancias o energía, alterando sus características tanto físicas, químicas como biológicas. Así surge el concepto de **agua residual**, la cual se define como el líquido de composición variada proveniente de los usos domésticos, de fraccionamientos, agropecuario, industrial, comercial, de servicios o de cualquier otro uso, que por este motivo haya sufrido degradación de su calidad original.

2.- El tratamiento de las aguas residuales tiene dos objetivos básicos, por un lado ofrece una reducción adecuada del nivel de contaminantes presentes en el agua, a fin de adecuar su calidad para su descarga al medio y por otro el de ser una estrategia para dar solución a los problemas de escasez de agua potable y la disposición de las aguas residuales, proporcionando la posibilidad de su reuso.

Se define un **agua residual tratada** como aquel líquido de composición variada, que tiene su origen en el agua residual y es resultante de la aplicación de un conjunto de operaciones y procesos de tratamiento.

El nivel de tratamiento requerido en un proyecto específico de uso de aguas residuales, dependerá de las características iniciales del agua a tratar, así como de la calidad requerida por el efluente tratado.

3.-La Legislación relacionada con agua en nuestro país, al igual que en la mayoría de los países del mundo, se encuentra orientada principalmente al establecimiento de los lineamientos generales para regular su uso y para evitar el deterioro de los recursos hídricos existentes. Dicha legislación únicamente es aplicable a fuentes de abastecimiento que involucren aguas de primer uso (recursos hídricos naturales); consecuentemente su aplicación no puede extrapolarse y aplicarse al reuso de las aguas residuales tratadas, ya que éstas representan una fuente de abastecimiento de aguas que ya han tenido un primer uso.

La única normatividad que existe actualmente (1995) en nuestro país referente al reuso del agua, son dos Normas Oficiales Mexicanas de reciente aparición (1993), las cuales establecen las características que deben cumplir las aguas residuales de origen urbano o municipal, para que puedan disponerse mediante el riego agrícola. Lo anterior surgió como respuesta a la imperiosa necesidad de regular el uso de las aguas residuales en la agricultura; práctica que venía desarrollándose desde tiempos inmemoriales sin control alguno.

4. El avance tecnológico en la actualidad permite obtener agua tratada de la calidad deseada (aún potable) a partir de cualquier naturaleza del influente, sin embargo los costos de tratamiento asociados son proporcionales al grado de contaminación del influente y al grado de calidad requerido para el agua tratada, por lo que se puede establecer una jerarquía de reutilización de los efluentes tratados de acuerdo a los requerimientos de calidad de cada uno de ellos, con la finalidad de optimizar al máximo el uso del efluente y disminuir los costos de tratamiento.

5. La opción del uso de las aguas residuales tratadas para el riego agrícola, es la alternativa que reporta las ventajas más significativas en la búsqueda de la solución de la problemática del agua. En segundo lugar se encuentra la opción del reuso industrial, ya que éste uso demanda volúmenes considerables y cada vez más crecientes de agua, además de que son contados los procesos donde se requiere agua de alta calidad (similar a la potable)

6. México enfrenta actualmente problemas regionales de abastecimiento de agua en cantidad suficiente y calidad adecuada, entre los que destacan la disminución acelerada de la disponibilidad de agua en las zonas más pobladas y la creciente contaminación de los cuerpos de agua, susceptibles de servir como fuentes de abastecimiento. De lo anterior se desprende que el futuro cercano amenaza con presentar déficits críticos de recursos hidráulicos en algunas regiones, lo que plantea un serio desafío para las autoridades a cargo de la administración del agua. Así, el reuso resulta una opción necesaria si se toman en cuenta la problemática de agua de nuestro país.

El inventario del volumen de agua disponible en nuestro país muestra que éste es lo suficientemente basto para satisfacer las demandas de abastecimiento de todos los sectores económicos, sin embargo, su distribución geográfica es completamente adversa en casi la mitad del territorio nacional.

El 67 % del territorio nacional aproximadamente, se encuentra en seria desventaja de disponibilidad de agua con el resto del país por simples condiciones climáticas; al mismo tiempo es fácil advertir que esas 2/3 partes del área del territorio nacional, también resultan ser las áreas con mayores posibilidades de reuso de las aguas residuales tratadas.

7. El reuso de las aguas residuales tratadas, se presenta como la alternativa más adecuada para aprovechar al máximo los recursos hidráulicos en aquellas localidades donde éstos sean escasos. Sin embargo, el reuso de agua no es necesario en todas las localidades del país, ya que éste no representa una alternativa atractiva para aquellas localidades que poseen agua de calidad adecuada en abundancia y ésta pueda ser obtenida a costos razonables.

RECOMENDACIONES

De acuerdo al tema desarrollado, a continuación las recomendaciones que se consideran de mayor importancia.

1. El tema tratado por el presente trabajo es de gran relevancia en la época actual, por lo que es altamente recomendable continuar tratando éste tema en trabajos futuros, considerando el reuso de las aguas residuales tratadas como una opción altamente ventajosa en la búsqueda de solución de la problemática del agua, que aqueja a nuestra nación.

2. Llevar a cabo investigaciones exhaustivas, encaminadas a ampliar los conocimientos hasta ahora adquiridos sobre las opciones de reuso, asimismo como llevar a cabo investigación tendiente a determinar los aspectos asociados al reuso mas adecuados a la realidad y condiciones nacionales, tales como: a) procesos de tratamiento, b) trenes de tratamiento, c) tecnología disponible, d) costos asociados, etc.

3. Concientizar a la población de la gran crisis hídrica por la que pasa nuestro país, al igual que instruir la acerca de las grandes ventajas que ofrece el reuso de las aguas residuales tratadas; lo anterior podría lograrse haciendo uso de los medios masivos de comunicación.

4. Reconociendo el alto potencial de reuso de las aguas residuales tratadas que posee nuestro país, es fundamental el llevar a cabo investigaciones en zonas piloto, a fin de determinar con precisión los efectos tanto adversos como benéficos, del uso de las aguas tratadas sobre el medio en las diferentes regiones potenciales del país y de acuerdo a ciertos reusos de las aguas residuales tratadas.

5. Promover y llevar a cabo campañas de información, dirigidas a los usuarios potenciales de las aguas residuales tratadas, con miras a enterarlos y concientizarlos de las grandes ventajas, tanto económicas como ecológicas que les reportaría el incluir el reuso de las aguas residuales tratadas como una opción de abastecimiento de agua.

6. Difundir y promover el reuso de las aguas residuales tratadas dentro de las autoridades encargadas de la administración del agua, de manera de lograr que se realicen estudios regionales exhaustivos, de factibilidad y posibilidad de reuso, para que se puedan implementar los programas de reuso en aquellas localidades que posean una alta potencialidad.

7. Promover el tema de reuso de las aguas residuales tratadas en: congresos gremiales de profesionistas relacionados con el tema, publicaciones especiales sobre el tema, difusión mediante los medios de comunicación, publicación de artículos, etc.

8. De acuerdo a la situación actual del país, es fundamental el establecer programas educativos que preparen profesionistas y técnicos capaces de implementar los programas de reuso que se emprendan.

B I B L I O G R A F I A

- **AGUA E HIDROLOGIA EN LA CUENCA DEL VALLE DE MEXICO**
Antecedentes, Diagnóstico, Perspectivas y Alternativas
Edit. Fundación Friedrich Ebert. México, D.F. 1989
 - **ALFREDO FUAD DAVID GIDI**
Control de la Contaminación del Agua en México.
SMISA. Memoria del VII Congreso Nacional de la Ing. Ambiental y la Salud
Oaxaca, Oax. Septiembre 1990
 - **ANUARIO ESTADISTICO DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS**
INEGI, Edición 1994
 - **CENSOS DE POBLACION Y VIVIENDA 1970, 1980 Y 1990**
INEGI
 - **CONTROL DE LA CONTAMINACION DEL AGUA EN MEXICO**
SMISA. Memoria del VII Congreso Nacional. La Ing. Ambiental y la Salud
Oaxaca, Oax. septiembre 1990
 - **DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACION**
1a. Sección. Lunes 25 de mayo de 1992
 - **DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACION**
Viernes 17 de julio de 1992
 - **DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACION**
NOM-CCA-032-ECOL/1993
Lunes 18 de octubre de 1993
 - **DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACION**
Secretaría de Desarrollo Social NOM en materia de Protección Ambiental. 2a. Sección
Lunes 18 de octubre de 1993
 - **DR. JOSE BAQUERO DE LA CRUZ**
Reutilización de las aguas residuales con destino a riego
Conferencia Nacional sobre Hidrología General y aplicada SMAGUA-78 Zaragoza,
España
-

-
- **DR. JUAN DE DIOS TRILLO MONSORIU**
Reciclaje del agua en actividades industriales
Conferencia Nacional sobre Hidrología General y Aplicada
SMAGUA-78, Zaragoza, España

 - **EL SISTEMA HIDRAULICO DEL DISTRITO FEDERAL**
Un servicio público en transición.
Edit. Guillermo Guerrero Villalobos, Andrés Moreno Fernández y Héctor Garduño Velasco
D.D.F. Secretaría de Obras y Servicios
Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica.
1a. Edición. 1982

 - **INFORMACION ESTADISTICA DE ASENTAMIENTOS HUMANOS**
Subsector: Agua Potable y Saneamiento
INEGI, Cuaderno No. 2 1983

 - **ING. CALDERON BARTHENEUF JOSE LUIS**
Reuso de Aguas Residuales en la Agricultura
Revista de Ing. Ambiental año 5 No. 15. Enero 1992

 - **ING. JOSE LUIS CALDERON BARTHENEUF**
Revista de la SMISA, A.C.
Ingeniería Ambiental
Año 5, No. 15. Enero 1992

 - **ING. ROLANDO FRIAS FIGUEROA**
Revista de la SMISA, A.C.
Ingeniería Ambiental
Año 4, No. 9. Enero 1991

 - **LEON ROGERIO HERNANDEZ IBARRA**
Análisis jurídico de las atribuciones de los Gobiernos Federal, Estatal y Municipal, en materia de prevención y control de la contaminación de aguas
Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos

 - **LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICÓ Y LA PROTECCION DEL AMBIENTE**

 - **METCALF-EDDY**
Tratamiento, Evacuación y Reutilización de aguas residuales
Edit. Labor, 2a. Edición
-

TESIS SIN PAGINACION

COMPLETA LA INFORMACION

-
- **METCALF & EDDY, INC.**
Wastewater engineering. Treatment, Disposal and Reuse
Edit. McGraw-Hill, Inc.
3er. Edition, 1991

 - **PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA**
Plan Regidor de Aguas Residuales. México.
Coordinación de Proyectos de Desarrollo, Reuso y Recirculación de agua
1982

 - **PROYECTO DE NOM-127-SSA I-1994**
Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y
tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización
Diario Oficial de la Federación. Lunes 15 de agosto 1994

 - **REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES PARA EL D.F.**

 - **REGLAMENTO DEL SERVICIO DE AGUA Y DRENAJE PARA EL D.F.**
(Departamento del D.F.)

 - **RESULTADOS DEFINITIVOS, DATOS POR LOCALIDAD**
Integración territorial
XI Censo de Población y Vivienda, 1990
INEGI

 - **R.S. RAMALHO**
Tratamiento de las Aguas Residuales
Edit. Reverté, S. A. 1991

 - **WATER RENOVATION AND REUSE**
Water Pollution. AP (Academic Press)
Editado por: Hillel I. Shoval

 - **WATER REUSE**
Manual de Prácticas SM-3
Editado por: Water Pollution Control Federation. Technical Practice Committee. Control
Group
Segunda Edición 1989

 - **WATER REUSE**
Ann Arbor Science
Publishers inc./ the butterworth group
Edited by E. Joe Middlebrooks (1982)
-

ANEXO 1

**RELACION DE NORMAS OFICIALES MEXICANAS (NOM)
REFERENTES A LA PREVENCION Y CONTROL DE LA
CONTAMINACION DEL AGUA**

1) NOM-CCA-001-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de las Centrales Termoeléctricas Convencionales.

2) NOM-CCA-002-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria Productora de Caña de Azúcar.

3) NOM-CCA-003-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria de Refinación del Petróleo y Petroquímica.

4) NOM-CCA-004-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria de Fabricación de Fertilizantes excepto la que produzca ácido fosfórico como producto intermedio.

5) NOM-CCA-005-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria de Fabricación de Productos Plásticos y Polímeros Sintéticos.

6) NOM-CCA-006-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria de Fabricación de Harinas.

7) NOM-CCA-007-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria de la Cerveza y de la Malta.

8) NOM-CCA-008-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria de la Fabricación de Asbestos de Construcción.

9) NOM-CCA-009-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria de Elaboradora de Leche y sus Derivados.

10) NOM-CCA-010-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria de Manufactura de Vidrio Plano y de Fibra de Vidrio.

11) NOM-CCA-011-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria de Productos de Vidrio Prensado y Soplado.

11) NOM-CCA-011-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria de Productos de Vidrio Prensado y Soplado.

12) NOM-CCA-012-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria Hulera.

13) NOM-CCA-013-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria del Hierro y del Acero.

14) NOM-CCA-014-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria Textil.

15) NOM-CCA-015-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria de la Celulosa y el Papel.

16) NOM-CCA-016-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria de Bebidas Gaseosas.

17) NOM-CCA-017-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria de Acabados Metálicos. cuerpos receptores provenientes de la Industria de Acabados Metálicos.

18) NOM-CCA-018-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria de Laminación, Extrusión y Estiraje de Cobre y sus aleaciones.

19) NOM-CCA-019-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria de Impregnación de Productos de Aserradero.

20) NOM-CCA-020-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria de Asbestos Textiles, Materiales de Fricción y Selladores.

21) NOM-CCA-021-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria del Cúrtico y Acabado en Piel.

22) NOM-CCA-022-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria de Matanza de Animales y Empacado de Cárnicos.

23) NOM-CCA-023-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria de Envasado de Conservas Alimenticias.

24) NOM-CCA-024-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria Elaboradora de Papel a partir de celulosa virgen.

25) NOM-CCA-025-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria Elaboradora de Papel a partir de fibra celulósica reciclada.

26) NOM-CCA-026-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de Restaurantes o de Hoteles.

27) NOM-CCA-027-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria del Beneficio del Café.

28) NOM-CCA-028-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria de Preparación y Envasado de Conservas de Pescados y Mariscos y de la Industria de Producción de Harina y Aceite de Pescado.

29) NOM-CCA-029-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de Hospitales.

30) NOM-CCA-030-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria de Jabones y Detergentes.

31) NOM-CCA-031-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

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.

32) NOM-CCA-032-ECOL/1993

(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales de origen urbano o municipal para su disposición mediante riego agrícola.

33) NOM-CCA-032-ECOL/1993
(Fecha de publicación en el D.O.F. 18/10/1993)

Condiciones bacteriológicas para el uso de aguas residuales de origen urbano o municipal o de la mezcla de estas con la de los cuerpos de agua, en el riego de hortalizas y productos hortofrutícolas.
