

2  
2ej



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO**



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN**



**CONSIDERACIONES PARA UN ESTUDIO  
ECONOMICO DE PROCESOS AEROBICOS,  
EMPLEADOS EN EL TRATAMIENTO DE  
AGUAS RESIDUALES**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
**QUIMICA FARMACEUTICA BIOLOGA**  
**P R E S E N T A :**  
**LETICIA BADILLO SOLIS**

DIRECTORES DE TESIS:  
I.O. MARGARITA ALONSO ESPINOZA  
I.A. NATIVIDAD VENEGAS HERRERA

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO

1993

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



## **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 está 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.

## **INDICE**

**INTRODUCCION.**

**ANTECEDENTES.**

**OBJETIVOS.**

**DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO.**

### **1. EL AGUA Y AGUAS RESIDUALES.**

1.1. Generación de Aguas Residuales.

1.2. Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en México.

1.3. Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

1.3.1. Calidad del Agua de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

1.4. Ciclo Hidrológico del Valle de México.

1.4.1. Ingreso de Agua a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

1.4.1.1. Precipitación Pluvial.

1.4.1.2. Flujo Superficial.

1.4.1.3. Importación de Agua de Cuencas Externas al Valle de México.

1.5. Drenes Principales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

1.6. Consumo de Agua Potable en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

1.7. Reuso del Agua Renovada.

1.7.1. Reuso del Agua Residual en la Agricultura.

1.7.1.1. Criterios de Calidad para el Agua de Reuso en Actividad Agrícola.

### **2. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.**

2.1. Pretratamiento.

2.2. Tratamiento Primario.

2.3. Tratamiento Secundario.

2.3.1. Procesos Aeróbios.

2.3.1.1. Lodos Activados.

- 2.3.1.2. Filtros Percoladores.
- 2.3.1.3. Biodiscos.
- 2.3.1.4. Zanjas de Oxidación.
- 2.3.1.5. Lagunas de Oxidación.
- 2.3.1.6. Lagunas Aeradas.
- 2.3.1.7. Aeración Extendida.

2.3.2. Procesos Anaeróbios.

- 2.4. Tratamiento Terciario.
- 2.5. Desinfección.

### **3. COSTOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN MEXICO.**

- 3.1. Métodos de Estimación de Costos.
- 3.2. Factores que Influyen en los Costos de Tratamiento de Aguas Residuales.
- 3.3. Costos de Inversión Inicial de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.
- 3.4. Costos de Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.
- 3.5. Criterios Generales para Optimizar el Costo del Agua Renovada.
  - 3.5.1. Esquema General de Implantación de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.
  - 3.5.2. Localización de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.
  - 3.5.3. Factores que Influyen en el Costo de la Obra Civil de una Planta de tratamiento de Aguas Residuales.
- 3.6. Costos de Inversión Inicial y Costos de Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento Aguas Residuales en México.
- 3.7. Análisis Costo / Beneficio.
- 3.8. Análisis Comparativo de Procesos Aerobicos.

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **BIBLIOGRAFIA.**

## **INTRODUCCION**

## INTRODUCCION.

México es un país que en la actualidad confronta una notable escasez y contaminación de sus fuentes de agua. El acelerado crecimiento poblacional e industrial de los últimos años ha acentuado de manera importante este problema. Cada día, la demanda de agua requerida para el consumo humano, industrial, agrícola, etc, es creciente, y consecuentemente la generación de aguas residuales también lo es.

En México se inició el tratamiento de aguas residuales aún antes de que existiera una legislación que procurara el control de la calidad del agua. Originalmente el tratamiento se hacía para poder reutilizar el agua, ya fuera para riego de parques y jardines o para la recirculación del agua y materias primas en la industria. Así podemos encontrar plantas de tratamiento de descargas municipales, como el caso de Chapultepec, o de plantas particulares en industria de pulpa y papel, metalúrgica, textiles, pintura, etc. Posteriormente, se buscó la protección de los cuerpos de agua sin que existiera necesariamente el aliciente inmediato del reuso. En varias localidades del país se crearon lagunas de oxidación, por lo sencillo de su construcción y manejo, y se empezó a realizar tratamiento de las aguas residuales industriales para cumplir con las disposiciones de la ley<sup>(1)</sup>.

Existe un gran número de procesos de las aguas residuales cuya aplicación depende tanto de las características de las aguas que ingresan a las Plantas de Tratamiento (influyente) como de la calidad que se desea obtener de las mismas en su salida (efluente). El tratamiento biológico de las aguas residuales es un ejemplo clásico de procesos en gran escala. El tratamiento biológico de las aguas residuales se basa en el proceso aparentemente simple en el que una población mixta de microorganismos utiliza como nutrientes a las sustancias que contaminan el agua.

La elección de un proceso determinado de tratamiento de aguas residuales debe estar basada en el estudio de los aspectos que determinan la bondad del proceso; uno de estos aspectos es el económico. El objetivo de un estudio económico en relación con una planta de tratamiento de aguas residuales es determinar cual es el monto de los recursos económicos necesarios para el reacondicionamiento del agua residual en cuestión, en términos de una serie de indicadores que determinan la calidad del agua<sup>(2)</sup>.

## **ANTECEDENTES**

Dentro de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, en el Laboratorio de Tratamiento de Aguas Residuales, se está realizando el proyecto "Estudio sobre el Interceptor Poniente de la Ciudad de México". En este proyecto se contempla eventualmente, la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales, para reacondicionar las aguas de dicho Interceptor. El agua residual se prevee someter a un proceso de tratamiento biológico, con un gasto volumétrico aproximado de 60l/s.

El agua renovada o tratada se utilizará en el riego de áreas verdes, riego de cultivos como: alfalfa, forrajes, hortalizas y huertos; en época de lluvias, el agua tratada sería vertida al Interceptor Poniente; inclusive, el agua tratada pudiera comercializarse para la industria y uso recreativo.

## **OBJETIVOS**

## **OBJETIVOS**

- Investigar los costos de inversión inicial y costos de operación y mantenimiento de los procesos aerobicos siguientes: lodos activados, filtro percolador, biodisco, laguna de oxidación, zanja de oxidación, laguna aerada y aeración extendida.
- Realizar un análisis comparativo de los procesos aerobicos, mencionados anteriormente.
- En base a los objetivos anteriores, proponer las mejores alternativas de procesos aerobicos para la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Campo 4.

## DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO

La Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Campo 4, anteriormente Rancho Almaráz, se encuentra localizada dentro de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, en el municipio de Cuautitlán Izcalli.

El Campo 4 en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, colinda al Norte con otros predios; al Sur con la Avenida Jesús Jiménez Gallardo, la cual cruza al canal Interceptor Poniente por medio de un puente y se comunica con la autopista México-Queretaro; al Este con la Avenida 20 de Noviembre, la cual comunica a Cuautitlán con Teoloyucan; y al Oeste con el canal Interceptor Poniente, el cual corre a todo lo largo de la zona de cultivo de dicho Campo 4.

Las principales vías de comunicación del Distrito Federal a Campo 4 son la autopista México-Queretaro y la antigua Carretera a Cuautitlán, las cuales comunican con el Distrito Federal, ya sea saliendo por Naucalpan o bien por Vallejo y la vía López Portillo que comunica a la zona de Ecatepec.

El Interceptor Poniente forma parte del Sistema de Drenaje Profundo para el desalojo de las aguas residuales del Distrito Federal, este sistema cruza los municipios de Naucalpan, Tlalnepantla y Cuautitlán, en el Estado de México; recorre el Valle de Cuautitlán de Sur a Norte, en un canal a cielo abierto; en éste son vertidas tanto aguas residuales de origen doméstico como industrial. A lo largo de 10 Km, desde el puente de Lechería hasta el puente que se encuentra al finalizar la zona de cultivo del Campo 4, se localizan en la zona de influencia del Interceptor Poniente, fraccionamientos y las poblaciones de Cuautitlán Izcalli, Tultitlán, San Martín Tepetlixpan y Cuautitlán, así como las zonas industriales de Lechería, Cuautitlán Izcalli, Parque Industrial Cuamatla y Zona Industrial Xhala<sup>(3)</sup>.

La Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Campo 4, dedica al cultivo agrícola 65.6005 has.; dentro de esta área, los cultivos más predominantes son: forrajes (maíz, avena, sorgo), alfalfa y árboles frutales como: manzano, membrillo, capulín, durazno, ciruelo, higuera, vid y pera<sup>(4, 5)</sup>.

En la Tabla 1 y Figura1 siguientes, se presentan el tipo de cultivo y la superficie del área agrícola de la FES-Cuautitlán, Campo 4(4) .

En los años 1979 a 1981 la FES-Cuautitlán, Campo 4, utilizaba las aguas residuales del Interceptor Poniente y el agua que conduce el canal del Huayapango (canal de distribución de agua de la Presa Guadalupe), para el riego agrícola. Sin embargo, actualmente sólo se aprovecha el agua del Huayapango (4, 5).

<b>No. DE PARCELA</b>	<b>TIPO DE CULTIVO</b>	<b>SUPERFICIE (ha.)</b>
1	Alfalfa	3.9421
2	Praderas(ryegrass)	2.9907
3	Investigación	1.6600
4	Alfalfa	2.4873
5	Pradera	2.8160
6, 8 y 10	Alfalfa	6.7685
7	Investigación	3.3187
9	Huerto frutícola	3.9022
11	Forrajes	4.0668
10, 13 y 17	Alfalfa	3.6114
14	Forraje	4.0828
15	Forraje	1.4041
18	Forraje	4.0000
19	Forraje	2.5090
21 y 25	Avena	2.7268
22	Investigación	3.8986
23	Sorgo	1.8435
24	Jardín botánico	2.3162
26	Forraje	3.2397
27	Forraje	2.6973
28	Forraje	1.2785
<b>TOTAL</b>		<b>65.8002</b>

Tabla1. Cultivos en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Campo 4.

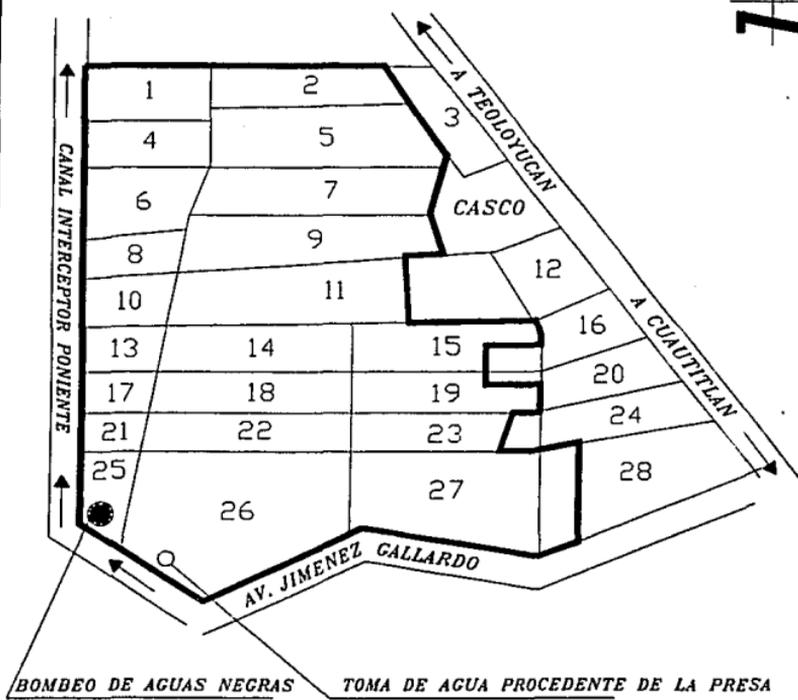


Figura 1. Localización de zonas de cultivo de la FES-C, Campo 4.

# **1. AGUA Y AGUAS RESIDUALES**

## 1. AGUA Y AGUAS RESIDUALES.

### 1.1. Producción de Aguas Residuales.

La descarga de aguas residuales provenientes de centros urbanos, llamado por ello "domésticas", alcanza un gasto volumétrico de  $113.2\text{m}^3/\text{s}$  aproximadamente; de las cuales corresponden a la Ciudad de México  $40.8\text{m}^3/\text{s}$ , a la Ciudad de Monterrey  $8.5\text{m}^3/\text{s}$  y a la ciudad de Guadalajara  $8.2\text{m}^3/\text{s}$ ; estos gastos representan el 51% del total generado a nivel nacional<sup>(6)</sup>.

Por otro lado se estima que la industria genera a nivel nacional, un gasto de aguas residuales de  $82\text{m}^3/\text{s}$ , siendo los mayores productores de aguas de desechos industriales las siguientes: azúcar, química, celulosa y papel, petrolera, de bebidas, textil, siderúrgica y de alimentos, lo cual puede observarse en la Tabla 1.1.<sup>(1)</sup>

INDUSTRIA	EXTRACCION %	CONSUMO %	DESCARGA %
Azucarera	35.2	22.3	38.8
Química	21.7	24.4	21.0
Papel y Celulosa	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
Alimentos	0.2	0.3	0.2
Resto del Sector	19.1	17.9	19.0

Tabla 1.1. Principales productores de aguas residuales industriales.

La industria azucarera es la principal generadora de aguas residuales, contribuyendo con el 39% del total producido por el sector industrial, le sigue en importancia la industria química con el 21%, corresponde a los restantes seis giros señalados 22% y al resto del sector un 19% del total.

## 1.2. Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en México<sup>(1, 7)</sup> .

En los últimos años la infraestructura en materia de tratamiento de aguas residuales ha aumentado en forma significativa, de acuerdo al inventario realizado por la Gerencia de Potabilización y Tratamiento del Agua SGIHUI - CNA, se identificaron 458 plantas, con una capacidad de tratamiento de 26.9m<sup>3</sup>/s; estas operan con distintos niveles de eficiencia. Por ejemplo, el 3% de dichas plantas tratan el 82% del agua; el 40% de las que operan requieren rehabilitación; 93 plantas no operan y de 76 se desconoce a la fecha su estado de operación. Se tienen 83 proyectos en realización, para un gasto de 315m<sup>3</sup>/s; y 36 plantas en construcción para un gasto de 6.4m<sup>3</sup>/s; lo cual da un total de 577 plantas próximamente. La tabla 1.2. muestra el tipo y número de plantas de tratamiento de aguas residuales que existen actualmente en México.

Sin embargo, se ha identificado que solamente el 10% de las plantas existentes operan en forma adecuada; el 35% opera de manera ineficiente; y el 50% se encuentra parcialmente fuera de operación, siendo las principales causas las siguientes:

- Diseño inadecuado.
- Mala selección de la tecnología.
- Carencia de recursos humanos capacitados.
- Deficiencias de operación y/o mantenimiento.
- Errores en la construcción.
- Mala estimación ( a priori ) de los costos de construcción y operación.

Según reporte de la oficina Sanitaria Panamericana se requiere un ingeniero sanitario por cada 50,000 habitantes; de acuerdo con este el número de ingenieros sanitarios requeridos por el país, es de alrededor de 1700. El fuerte déficit existente (1250 en México) ha tenido que ser cubierto por profesionistas de diversas disciplinas, en muchos de los casos con poca fortuna<sup>(8)</sup>.

TIPO DE INSTALACION	CANTIDAD
Lagunas de Estabilización	305
Lodos Activados	133
Tanque Imhoff	22
Aeración Extendida	7
Lagunas Aeradas	13
Tratamiento Primario	11
Filtros Biológicos	24
Digestión Anaerobia	2
Biodiscos	5
Zanjas de Oxidación	15
Tratamiento Fisicoquímico	3
Tratamiento Biológico (no identificado)	4
No Identificados	33
<b>TOTAL</b>	<b>577</b>

Tabla 1.2. Tipo y número de plantas de tratamiento en México

### 1.3. Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México<sup>(1, 8)</sup>.

En la actualidad, existen 16 plantas de tratamiento de aguas residuales en el Distrito Federal: Rosario, Coyoacán, Ciudad Universitaria, Tlaltelolco, Acueducto de Guadalupe, San Juan de Aragón, Ciudad Deportiva, Cerro de la Estrella, Chapultepec, Reclusorio Sur, Azcapotzalco, San Luis Tlaxialtemalco, Colegio Militar, Cartonajes Estrella, Unidad Iztacalco y Reino Aventura; en conjunto con las del Estado de México, tienen una producción aproximada de 43m<sup>3</sup>/s. El agua tratada se destina al riego de áreas verdes, llenado de canales en Xochimilco y de los Lagos en Chapultepec y Aragón; una parte se destina a la industria principalmente en las Delegaciones de Iztapalapa y Azcapotzalco. En la Figura 1.1. se muestra la localización de las 24 plantas existentes en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. En el Estado de México existen 8 plantas de tratamiento

de aguas residuales, operadas por el Gobierno del Estado. Estas son: Naucalpan y Ciudad Satélite; la que opera la federación para riego de cultivos ubicada en Lechería; para fines industriales la Termoeléctrica del Valle de México en Ecatepec y en forma privada la de San Juan Ixhuatepec y la FORD; también en el Plan del Lago de Texcoco existe una planta de tratamiento secundario, sus aguas principalmente se destinan al llenado del Lago Nabor Carrillo. En el Estado de México también opera la planta de Nopalera en San Cristóbal.

### **1.3.1. Calidad del Agua de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.**

Para regular el funcionamiento de las instalaciones de tratamiento de aguas, se hacen análisis rutinarios, entre los cuales se tiene: DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y Sólidos Suspendedidos Totales. La prueba de DBO indica la cantidad de materia orgánica sujeta a descomposición en las aguas residuales; mientras que los Sólidos Suspendedidos Totales es un índice de todo el material visible que contiene el agua, que no está disuelta y que puede eliminarse por filtración.

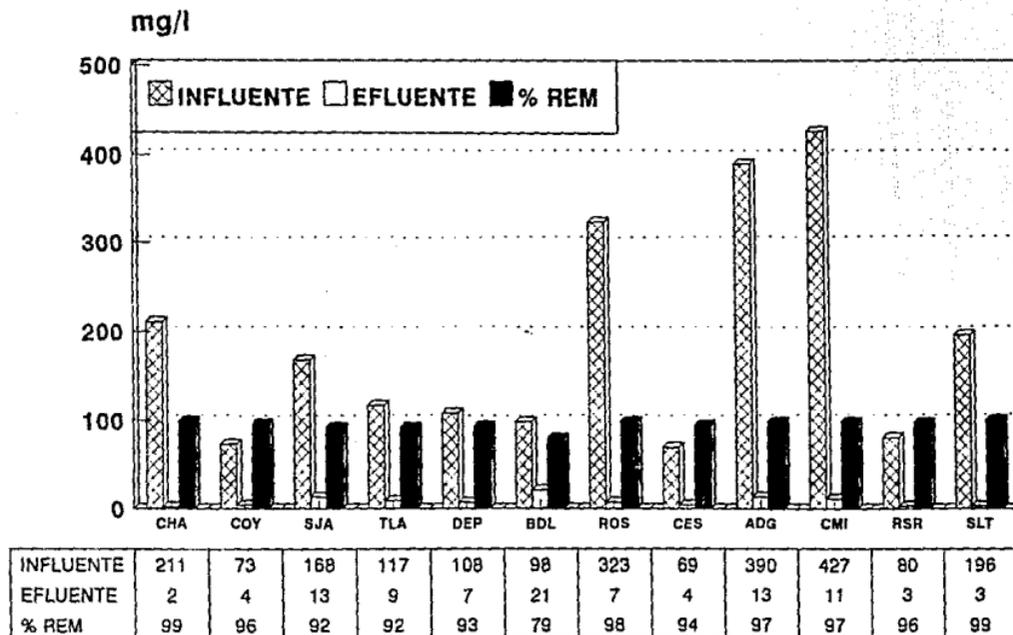
En las gráficas 1.2.a, 1.2.b, 1.2.c y 1.2.d; se muestra la calidad del agua del influente, efluente y la eficiencia para cada una de las doce plantas de tratamiento de aguas residuales, que pertenecen a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México; la nomenclatura en dichas gráficas es la siguiente:

- |                             |                               |
|-----------------------------|-------------------------------|
| - CHA Chapultepec.          | - ROS Rosario.                |
| - COY Coyoacán.             | - CES Cerro de la Estrella .  |
| - SJA San Juan de Aragón.   | - ADG Acueducto de Guadalupe. |
| - TLA Tlaltelolco.          | - CMI Colegio Militar.        |
| - DEP Ciudad Deportiva.     | - RSR Reclusorio Sur.         |
| - BDL Bosques de las Lomas. | - SLT San Luis Tlaxiátemalco. |

Desafortunadamente no se tiene la información correspondiente a las plantas del tratamiento de aguas residuales del Estado de México.

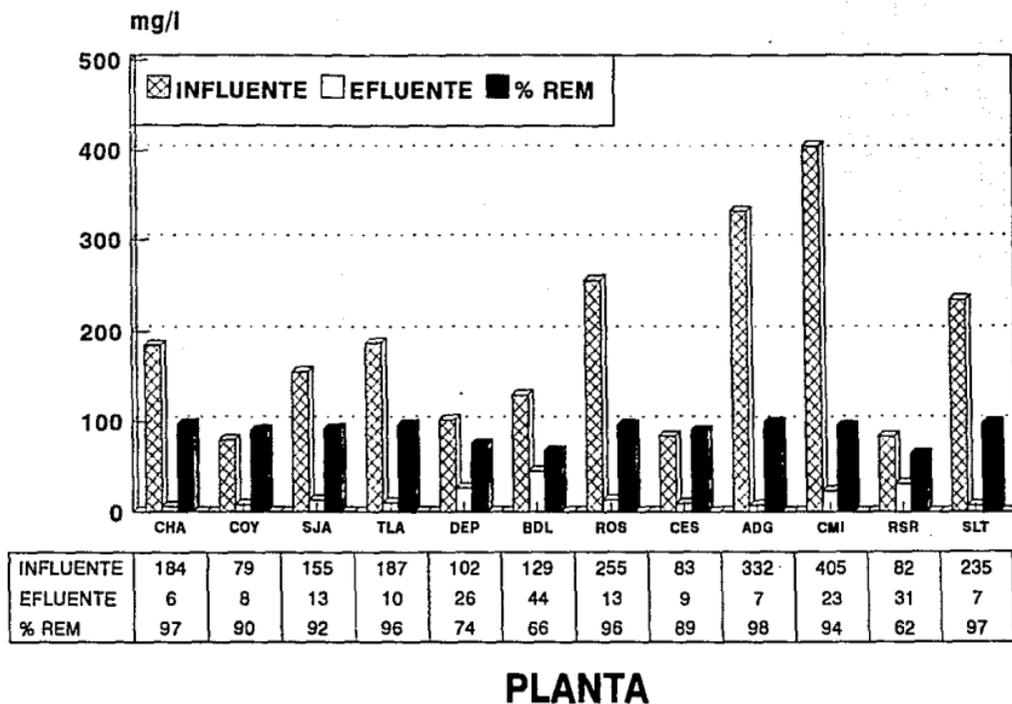


Figura 1.2.a. D.B.O. TOTAL, LLUVIA 1992.



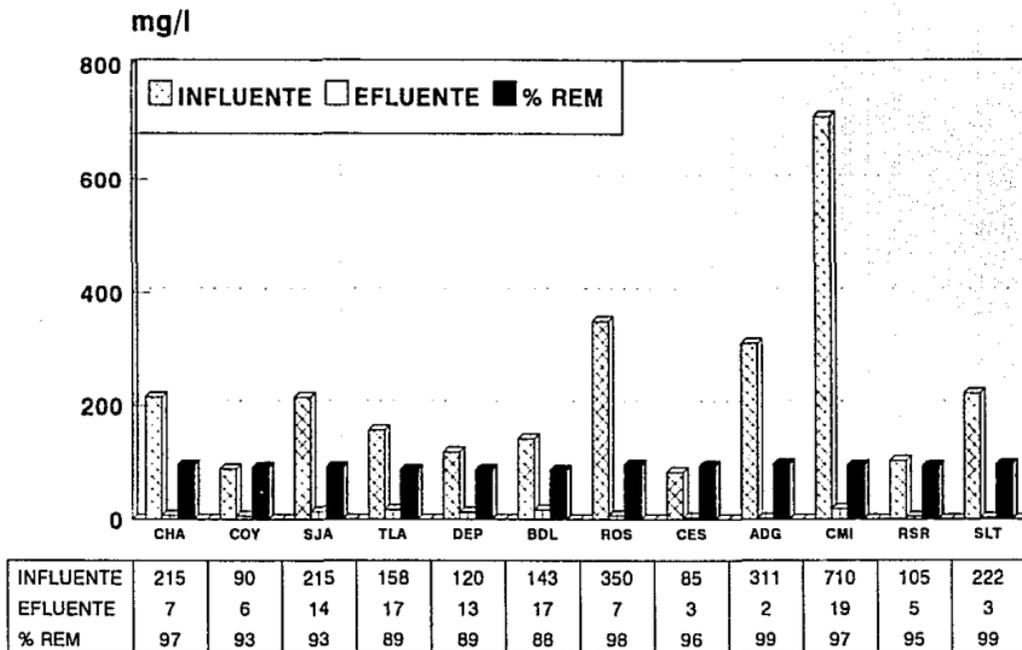
PLANTA

Figura 1.2.b. SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES, LLUVIA 1992.



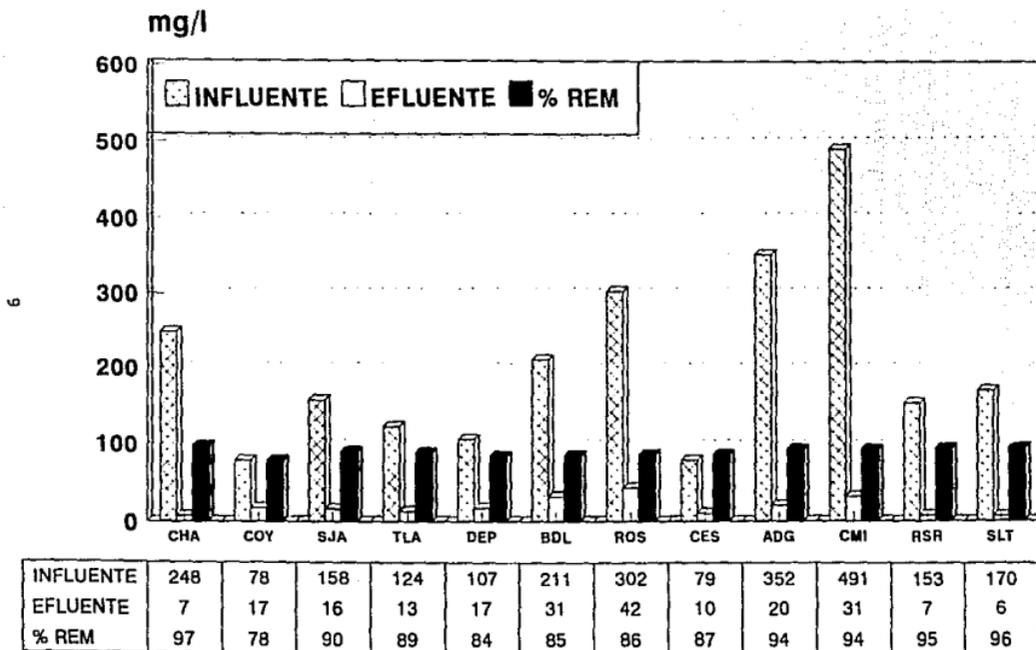
PLANTA

Figura 1.2.c. D.B.O. TOTAL, ESTIAJE 1991-1992.



PLANTA

**Figura 1.2.d. SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES, ESTIAJE 1991-1992.**



**PLANTA**

#### 1.4. Ciclo Hidrológico del Valle de México (6) .

La posición geográfica denominada como Cuenca del "Valle de México", se encuentra situada en el límite meridional de la Altiplanicie Mexicana, comprendida entre los paralelos 20° 15' y 19° 01' de latitud Norte y los meridianos 99° 31' y 98° 15' de longitud Oeste de Geenwich.

En su origen natural fue una cuenca cerrada (endorreica), que el hombre alteró al abrirla artificialmente por medio del Túnel de Tequizuiac, el Tajo de Nochistongo, el Canal de Desagüe y el Emisor Profundo, cuyas descargas son aprovechadas para riego en los Estados de México e Hidalgo.

La Cuenca del Valle de México tiene como caraterística de ser una gran superficie amurallada, en la cual las sierras más altas se localizan al Sur, Sureste y Suroeste, con excepción de la salida de Amecameca, en tanto que por el Norte y Noreste es muy baja.

En cuanto a su superficie, la Cuenca del Valle de México, tiene 9600 Km<sup>2</sup>, cuya distribución de acuerdo a la división política de los Estados Unidos Mexicanos, se puede observar en la Tabla 1.3.

ESTADO	SUPERFICIE km <sup>2</sup>	%
México	4,800	50
Hidalgo	2,540	26
D. F.	1,320	14
Tlaxcala	840	9
Puebla	100	1
<b>TOTAL</b>	<b>9,600</b>	<b>100</b>

Tabla 1.3. Distribución de la superficie de la cuenca del Valle de México.

#### **1.4.1. Ingreso de Agua a la ZMCM.**

##### **1.4.1.1. Precipitación Pluvial<sup>(6)</sup> .**

La temporada de lluvias en la cuenca, abarca generalmente los meses de mayo a octubre, presentándose el resto del año lluvias aisladas. El total de las lluvias dan una recarga al acuífero del orden de los 725 millones de  $m^3$  anuales, equivalente a  $23m^3/s$  existiendo una sobreexplotación aproximada al 193% de la recarga.

En conjunto, las corrientes superficiales del Valle de México tienen un caudal medio de  $19m^3/s$  que equivalen al 9% del volumen que llueve en un año.

##### **1.4.1.2. Flujo Superficial<sup>(6)</sup> .**

Desde el punto de vista hidrológico, el Valle de México puede dividirse en once zonas principalmente que son:

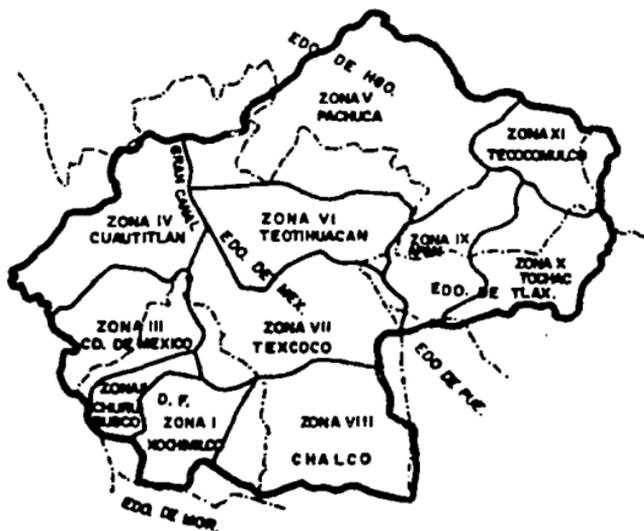
**Zona 1.** La zona 1 comprende las cuencas de los ríos que desciende de la Sierra del Chichinautzin, la cual presenta formaciones basálticas de gran permeabilidad. El caudal medio de los ríos San Gregorio, San Lucas, Santiago y San Buenaventura, situados en esta zona, es únicamente de  $38l/s$ ; sin embargo, durante tormentas excepcionales ocurren avenidas importantes, especialmente en el Río San Buenaventura, donde se han presentado caudales cercanos a los  $100 m^3/s$ .

**Zonas 2 y 3.** Las zonas 2 y 3 incluyen el área urbanizada de la Ciudad de México y los ríos que bajan hacia ella desde el poniente del Valle. Estas corrientes son intermitentes, salvo los ríos Magdalena, Mixcoac, Tacubaya, Hondo y Tlalnepantla los cuales tienen escurrimientos perennes.

**Zona 4.** La zona 4 abarca las cuencas desde los ríos Tepotzotlán y Cuautitlán, que se originan en el noroeste del Valle.

**Zonas 5 y 6.** Corresponden básicamente a las cuencas de los ríos de las Avenidas de Pachuca y San Juan Teotihuacan respectivamente.

**Zona 7.** En la zona 7 se incluyen los ríos que desembocan en el ex-Lago de Texcoco por el oriente.



0 5 10 15 30 50 60km.

ESC. GRAFICA.

SIGNOS CONVENCIONALES

PARTEAGUAS —————

LIMITE DE ESTADO - - - - -

LIMITE ZONA HIDROLOGICA ————

ZONAS HIDROLOGICAS		
No.	NOMBRE	Area Km <sup>2</sup>
I	XOCHIMILCO	822
II	CHURUBUSCO	236
III	CD. DE MEXICO	729
IV	CUAUTITLAN	872
V	PACHUCA	2087
VI	TEOTIHUACAN	920
VII	TEXCOCO	1148
VIII	CHALCO	1126
IX	APAN	837
X	TOCHAC	880
XI	TECOMILCO	822
	TOTAL	8 806

Figura 1.3 Zonas hidrológicas de la Cuenca del Valle de México.

**Zona 8.** La zona 8 localizada también en el oriente comprende los ríos que se sitúan entre el San Francisco y el Milpa Alta: en esta zona se genera un caudal medio de  $0.6\text{m}^3/\text{s}$ .

**Zonas 9, 10 y 11.** Finalmente, las zonas 9, 10 y 11 se extienden desde la cuenca del Río Tizar hasta las corrientes alimetadoras del Río Tecomulco y todas ellas generan  $6\text{m}^3/\text{s}$ ; en un principio, estas zonas no formaban parte de la cuenca pero se incorporaron a ella en forma artificial.

#### 1.4.1.3. Importación de Agua de Cuencas Externas al Valle de México<sup>(6, 8)</sup>.

La ciudad de México, desde la antigüedad, ha estado sujeta a problemas derivados de la escasez del agua, que se ha acentuado con el aumento de la población de las últimas 60 décadas. En el Valle de México se consume todos los días de 57 a  $62.5\text{m}^3/\text{s}$ , existiendo un déficit que es mayor en el Estado de México que en el Distrito Federal. Las fuentes de suministro de este caudal corresponden en un 71.2% ( $44.5\text{m}^3/\text{s}$ ) a los acuíferos del Valle de México, otro 26.6% se importa de otras cuencas (del Lerma 5.1% y del Cutzamala 11.5% aproximadamente) y el 2.2% restante proviene de obras superficiales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Las regiones más viables para el abastecimiento de agua potable con fuentes externas corresponderán en el futuro a las cuencas que se enlistan en la siguiente Tabla 1.4. que incluye los caudales aportados por cada uno así como su inversión.

FUENTE	CAUDAL APORTADO $\text{m}^3/\text{s}$	INVERSION INICIAL miles de N\$
Cutzamala (tercera etapa)	8.0	1,776.52
Libres / Oriental	7.0	1,601.66
Alto Amacuzac	13.0	2,990.29
Medio Amacuzac	48.0	10,070.00
Tecolutla	5.5	3,529.81
Taxhimay / Tlautla	5.0	4,019.62
Taxhimay / Tula	5.0	545.89

Tabla 1.4. Fuentes de abastecimiento de agua a la ZMCM.

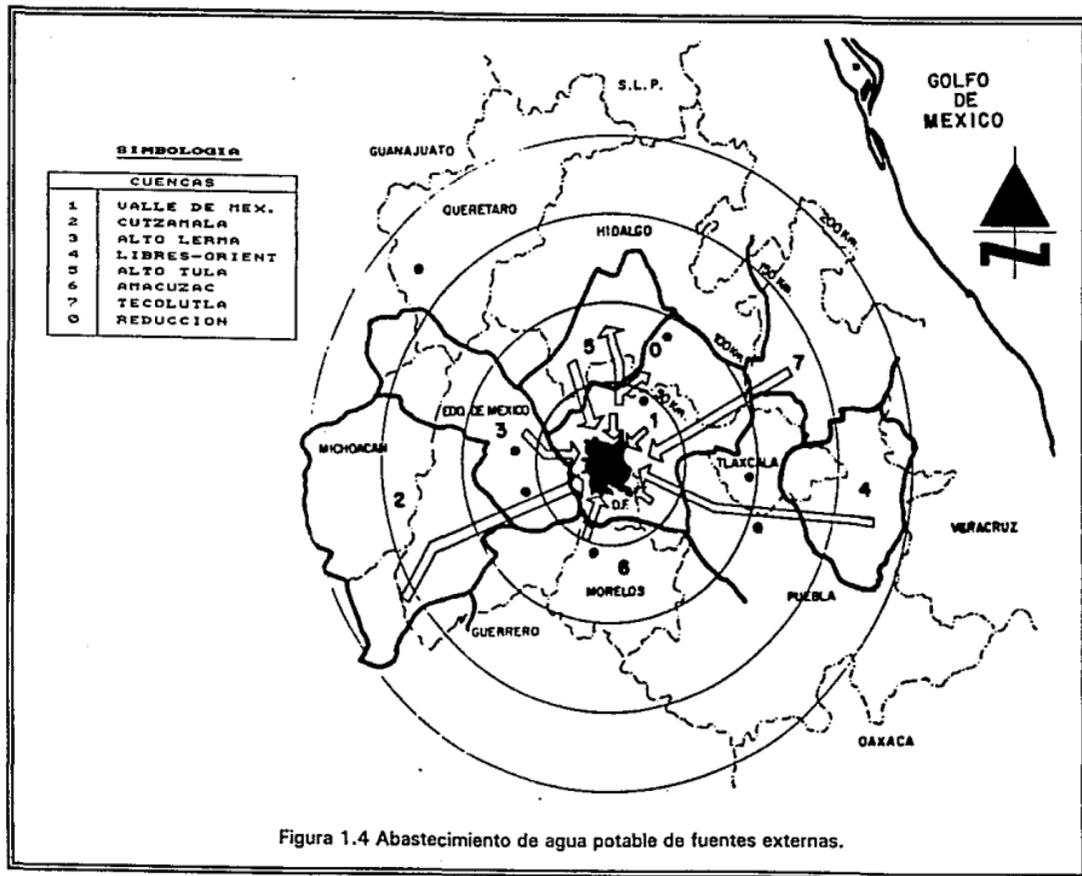


Figura 1.4 Abastecimiento de agua potable de fuentes externas.

Con lo que se estima se podrán cubrir las demandas del vital líquido hasta el año 2010. La Figura 1.4. muestra la localización de las cuencas mencionadas de posible abastecimiento futuro para la ZMCM.

### **1.5. Drenes Principales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México<sup>(3, 6)</sup>.**

El sistema de desalojo de las aguas residuales y pluviales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se caracteriza por tener enormes obras hidráulicas cuya función adicional es la de proteger a las zonas urbanas de las inundaciones a la que se ha estado sometida desde su fundación.

Hace más de tres siglos, el sistema Hidrológico del Valle de México estaba formado por una serie de lagos y lagunas de gran extensión. Respecto a los antecedentes del desagüe de la Cuenca del Valle de México, la construcción del Tajo de Nochistongo, es la primera salida artificial ubicada al norte del Valle, el cual consistía en llevar las aguas del Lago Septentrional de Zumpango y las del Río Cuautitlán por medio de un canal y de un túnel hasta el Río Tula; la segunda salida artificial es el Tajo de Tequisquiác, el cual partía desde el Lago de Texcoco, el cual daba salida a las aguas del Valle de México por el Río Tequisquiác. En la actualidad, este sistema de drenaje es de tipo combinado y está constituido por corrientes naturales, colectores, estructuras de incorporación, presas de regulación y obras de alejamiento. En la ZMCM se generan alrededor de  $40.8\text{m}^3$  de aguas residuales, de las cuales, el Distrito Federal produce  $29\text{m}^3/\text{s}$  y los 17 municipios conurbados del Estado de México  $11\text{m}^3/\text{s}$ .

Las áreas con servicio del Distrito Federal cuentan con drenaje combinado casi en su totalidad, salvo en algunos pueblos y colonias de las Delegaciones Tláhuac, Tlalpan y Xochimilco donde se recogen las aguas residuales únicamente. Las aguas que se colectan descargan a cuatro grandes drenes:

- Río Churubusco
- El Gran Canal del Desagüe
- El Interceptor del Poniente
- Sistema de Drenaje Profundo.



En los municipios conurbados del Estado de México, es aún mayor el problema. El nivel de servicio promedio es de 64%, aproximadamente 2.9 millones de habitantes carecen de instalaciones para recolección y desalojo de aguas residuales. Existen tres salidas para las aguas del Valle de México: Emisor del Poniente, Gran Canal del Desagüe y el Emisor Central.

**El Emisor del Poniente** es la salida más antigua. Se construyó originalmente para desalojar las aguas del Río Cuautitlán que producía inundaciones en época de crecientes. En la actualidad recibe también aportaciones del Distrito Federal a través del Interceptor Poniente ( $25\text{m}^3/\text{s}$ ). Tiene una longitud de 47.8 km y conduce hasta  $80\text{m}^3/\text{s}$ , descarga al Río El Salto, afluente del Río Tula.

**El Gran Canal del Desagüe**, tiene una longitud de 47.4 km, se construyó durante la época del Porfiriato, tiene capacidad para conducir más de  $115\text{m}^3/\text{s}$ . Descarga a través de dos túneles al Río Salado, también afluente del Río Tula. Se inicia en la zona urbana, cercana a la antigua estación de trenes de San Lázaro, y a lo largo de todo su recorrido por el Distrito Federal y parte del Estado de México, atraviesa numerosas colonias, produciendo un impacto negativo en sus habitantes.

**El Emisor Central** es la estructura más reciente, forma parte del Sistema de Drenaje Profundo con una longitud de 49.7 km. Fue construido con el propósito de operar sólo en épocas de avenida. Tiene una capacidad máxima de  $220\text{m}^3/\text{s}$ ; descarga al Río El Salto y a través del Canal Salto-Tlamaco concluido en 1988, deriva aguas hacia el Distrito de Riego 03.

La localización de estos drenes se encuentra en la Figura 1.5. Por su parte, los conductos de agua residual que afectan actualmente al Distrito Federal son: Río Buenaventura, Canal Nacional, Río Churubusco, Gran Canal del Desagüe, Bordo de Xochiaca, Bordo Poniente o Canal de las Sales, Río de los Remedios, Río Tlalnepantla, Río San Javier y Río Magdalena.

Dentro de los cuerpos receptores de aguas residuales juega un papel muy importante el Lago de Texcoco, por que recibe las aportaciones de agua pluvial de los ríos del Oriente y los desechos líquidos del Río de la Compañía y del Río Churubusco. Cuenta con una gran capacidad de

regulación además que permite la reutilización de aguas residuales para muy diversos fines y descarga a su vez al Gran Canal del Desagüe.

Las zonas ubicadas al sur - oriente de la cuenca que cuentan con servicios de drenaje descargan al Río de la Compañía, que a su vez, conducen los caudales al Lago Texcoco (Nabor Carrillo); las colonias ubicadas al oriente y poniente del Gran Canal, descargan a este conducto, y las del poniente de la cuenca, al Emisor del Poniente. Las tres salidas de agua del Valle de México conducen a las aguas residuales de la ZMCM al Río Tula donde finalmente se utiliza para riego.

#### 1.6. Consumo de Agua Potable en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México<sup>(6, 8)</sup> .

Como ya se mencionó en el punto anterior, en el Valle de México se consumen todos los días de 57 a 62.5m<sup>3</sup>/s. La distribución de dicho consumo por sectores se presenta como sigue:

ENTIDAD	SECTOR	CONSUMO %
Distrito Federal	Doméstico	57
	Industria	14
	Servicios	11
	Uso público y perd. en el sma.	15
Estado de México		80
	Industria	15
	Comercio	5

Tabla 1.5. Consumo de agua potable por sectores

Para el año 2000 la Zona Metropolitana albergará alrededor de 28 millones de habitantes que demandarán 88m<sup>3</sup>/s de agua potable, con una dotación de 270lt/hab/día.

## **1.7. Reuso del Agua Renovada<sup>(6, 9)</sup> .**

El uso que se le ha dado al agua residual tratada ha sido variado, va desde el riego de áreas verdes hasta el industrial pasando por el riego agrícola y recreativo.

El aprovechamiento a mediano y largo plazo del agua residual tratada son los de:

- Recarga de acuíferos.
- Agua potable.

### **1.7.1. Reuso del Agua Residual en la Agricultura<sup>(10, 11, 12, 13)</sup> .**

El aprovechamiento de aguas residuales en riego agrícola es una actividad que se ha realizado en México desde el siglo pasado hasta la fecha; sin embargo su aprovechamiento generalmente se ha afectado en forma no controlada, por lo cual, pocas han sido las medidas implementadas para prevenir los efectos nocivos que este tipo de agua puede causar al sistema suelo-planta-animal-hombre.

En el país actualmente se encuentra bajo riego con agua residual una superficie estimada de 185,000has., con un volumen anual de 2455 millones de metros cúbicos, de los cuales el 44% corresponden al riego con agua residual proveniente de la Ciudad de México.

El aprovechamiento más significativo en México de agua residual para riego, se tiene en el Distrito de Riego 03 en Tula, Estado de Hidalgo, donde se riegan hoy en día más de 50,000 hectáreas.

En México la aplicación de las aguas residuales en el riego agrícola generalmente se realiza en forma "cruda", esto es, sin tratamiento previo; en otros casos cuando se llegan a someter a algún tipo de tratamiento, éste, o es insuficiente, o es inadecuado para el fin que está destinado.

Nivel de Tratamiento Requeridos para la reutilización del Agua Renovada según su Uso.

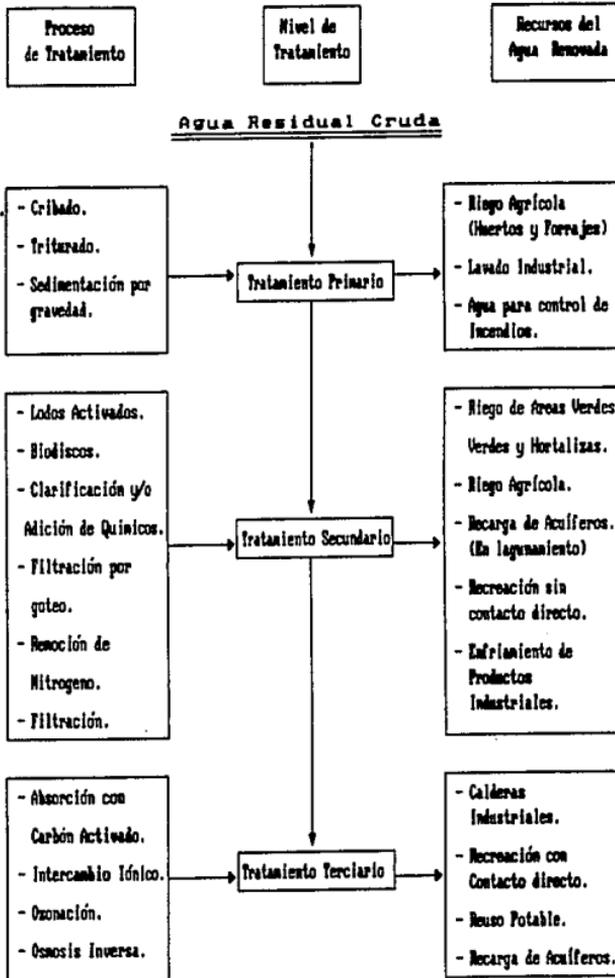


Figura 1.6 Reuso del agua renovada.

### **1.7.1.1. Criterios de Calidad para el Agua de Reuso en Actividades Agrícolas.**

Toda agua que se pretenda utilizar en riego agrícola, incluyendo agua residual cruda o tratada, debe ser evaluada en términos de ciertos criterios de calidad para la protección de suelos y cultivos, los aspectos más relevantes en este uso son:

- Nutrientes.
- Carga orgánica.
- Patógenos.
- Elementos trazas.
- Sales disueltas.
- Sólidos suspendidos.
- Detergentes.
- Grasas y aceites.
- Potencial de hidrógeno.
- Otros compuestos.

#### **a) Nutrientes.**

La presencia de elementos como el nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en las aguas residuales, es muy significativa. Generalmente se considera que las aportaciones de estos elementos al suelo resultan benéficas; sin embargo, cuando sus concentraciones son excesivas ocasionan numerosos problemas, tanto en su tratamiento como en sus efectos al sistema suelo-planta-animal-hombre.

El exceso de nitrógeno en el suelo ocasiona varios problemas de carácter agronómico, algunos de ellos son los siguientes:

- Excesivo crecimiento vegetativo.
- Disminución en el tamaño y calidad de los frutos cosechados.
- Encamado de los cultivos.
- Retraso de la madurez o tiempo de cosecha.
- Disminución del contenido de azúcar o de almidón.
- Afectación de la textura, sabor y color de los frutos y vegetales.
- Acumulación de nitratos en niveles tóxicos para la salud animal y humana (especialmente infantes) <sup>(14)</sup>.

Un problema de especial significancia cuando se tienen altos niveles de nitrógeno como nitrato ( $\text{NO}_3$ ), es su potencial riesgo de contaminación de los acuíferos, lo cual en México ya se ha comprobado en la región del Valle del Mezquital<sup>(15)</sup>.

La concentración permisible de este elemento en el agua residual, no deberá ser mayor de 5mg/l, ya sea como nitrato o como amoniaco<sup>(16)</sup>.

El exceso de fósforo en el agua residual no parece afectar de manera directa a los cultivos. El fósforo sin embargo puede inmovilizar dentro del suelo a elementos tales como Fe, Cu, Zn y Al, reduciendo su disponibilidad y causando síntomas de deficiencia en el cultivo<sup>(16)</sup>.

La mayor parte del fósforo que entra en el suelo generalmente es absorbido o precipitado, disminuyendo significativamente su disponibilidad.

Las concentraciones permisibles del fósforo no deben exceder los 60mg/l.

La concentración de potasio en el efluente no se considera como un problema para los cultivos.

#### **b) Carga Orgánica.**

Las aguas residuales contienen una gran variedad de compuestos orgánicos naturales y sintéticos usualmente expresados en forma colectiva, en términos de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO); Demanda Química de Oxígeno (DQO) o contenido de Carbono Orgánico Total.

Cuando el suelo es fuertemente cargado con compuestos orgánicos, los sólidos del agua residual y los sólidos formados por la actividad bacteriana en el suelo pueden incrementarse debido a las condiciones anaeróbicas que crean la alta demanda de oxígeno. Esto último se traduce finalmente en una reducida tasa de infiltración en el suelo debida a la lenta biodegradación de la materia orgánica.

La disminución de oxígeno disponible en el suelo producto de las elevadas concentraciones de compuestos orgánicos afecta no sólo el crecimiento de las plantas, sino que también ocasiona la reducción de elementos tales como el Fe y el Mn, a formas divalentes más solubles que pueden crear condiciones tóxicas para las plantas<sup>(17, 18)</sup>.

Se considera que un efluente de agua residual de buena calidad debe tener una DBO de alrededor de 10-20mg/l y una DQO de 30-60mg/l y un contenido de CDT de 10-30mg/l<sup>(18)</sup>.

### **c) Patógenos.**

El agua residual que se emplea en el riego agrícola, posee una gran cantidad de organismos patógenos. Los grupos de microorganismos encontrados incluyen partículas virales, bacterias, protozoarios, hongos y huevecillos de helmintos. Algunas de las enfermedades transportadas potencialmente por el agua residual incluyen la disentería bacilar y amibiana, fiebre tifoidea, gastroenteritis, salmonelosis, cólera, hepatitis infecciosa y ascariasis, etc.<sup>(19)</sup> .

Las bacterias son los patógenos más frágiles y generalmente son reducidos en un gran porcentaje en los sistemas de tratamiento, así como también por diversas condiciones ambientales, tales como luz de sol, secado o competición en el suelo. El tiempo de sobrevivencia es muy variable pero en términos generales es de una a dos semanas<sup>(20)</sup> .

Los virus pueden persistir en el suelo y en la vegetación por varias semanas o meses. Su exposición a la luz del sol y secado eventualmente resulta en algún grado de inactivación<sup>(20)</sup> .

En cuanto a los patógenos del tipo de los helmintos, se han reportado tiempo de sobrevivencia para huevos de parásitos y cisticercos, superiores a los 3 años en el suelo<sup>(20)</sup> .

Se pide la remoción casi completa de huevecillos de nemátodos y coliformes fecales cuando se use el agua en riego agrícola sin restricciones<sup>(21)</sup> .

Media Geométrica menor o igual a 1 huevo de nemátodo viable por litro.

Media Geométrica menor o igual a 1000 coliformes fecales por litro.

El propósito de la remoción de huevecillos de helmintos es proteger la salud del productor y se pide la remoción del 99.99% de bacterias fecales, para protección del consumidor, principalmente en verduras (hortalizas)<sup>(21)</sup> .

### **d) Elementos Traza.**

Las aguas empleadas para el riego de cultivos contienen tanto iones de elementos mayores como de elementos traza. Estos últimos, son aquellos que se encuentran en concentraciones menores a unos pocos mg/l<sup>(17)</sup> .

La cantidad presente de elementos traza en el agua residual depende principalmente de las aportaciones que realiza el sector industrial. En

México, la captación y conducción conjunta de las aguas residuales domésticas e industriales, incrementan considerablemente el contenido de estos elementos en el efluente final.

ELEMENTO	mg / l
B	0.7
Al	5.0
As	0.10
Be	0.10
Cd	0.01
Co	0.05
Cr	0.10
Cu	0.20
F	1.0
Fe	5.0
Li	2.5
Mn	0.20
Mo	0.01
Ni	0.20
Pb	5.0
Se	0.02
V	0.10
Zn	2.0

Tabla 1.6. Concentraciones máximas de elementos traza.

Cuando las aguas residuales son sometidas a un tratamiento primario o secundario, un buen porcentaje de elementos traza son concentrados en los lodos producidos por estos sistemas de tratamiento<sup>(22)</sup>.

Sin embargo, cuando el agua residual se aplica "cruda", al suelo, el porcentaje adicionado de estos elementos es considerable.

La importancia que tiene la presencia de los elementos traza en el agua residual, se debe a su potencial de acumulación en el suelo, su fitotoxicidad y su capacidad para introducirse en la cadena alimenticia humana, vía el consumo de cultivos contaminados o animales que se alimentan de éstos, o bien, vía la contaminación de acuíferos<sup>(23)</sup>.

Los elementos considerados de mayor importancia por su fitotoxicidad y potencial de peligro para los animales y el hombre, incluye al Cd, Pb, Hg, As, Ce, Zn, Co y Ni; de ellos se considera al Cd, Co, Ni, Zn y Mo como prioritarios debido a la facilidad con la que se acumula en las plantas, lo cual evidentemente representa un riesgo mayor para la cadena alimenticia animal y humana(24) .

Algunos otros elementos como el Co, Cr, B, Al, Mn y As, etc.; aunque no representa un serio riesgo para la cadena alimenticia si son importantes desde un punto de vista fitotóxico.

Las concentraciones permisibles de estos elementos en el agua residual, se presentan en la Tabla 1.6. y toman en cuenta su fitotoxicidad, su acumulación a largo plazo en el suelo y su potencial peligro para la cadena alimenticia.

#### **e) Sales Disueltas.**

Las aguas residuales salvo excepciones, presentan un elevado contenido salino, el uso municipal pero sobre todo el uso industrial del agua, aunado a la escasa o nula remoción que sufren las sales en los sistemas de tratamiento, son las principales causas de su presencia en el agua residual.

Cuando el agua residual presenta una elevada concentración de sales, en las que el sodio (Na) está prácticamente ausente, éstas tienden acumularse en los primeros centímetros del suelo(25) .

La forma en que éste exceso de sales afecta al cultivo, consiste fundamentalmente en una reducción de la disponibilidad del agua, producto del incremento de la presión osmótica del suelo. Algunas veces se presentan problemas de toxicidad en las plantas dependiendo del tipo de sales presentes; esto es particularmente cierto para el sodio (Na ) y el cloro (Cl )(25) .

Las concentraciones permisibles de sales en el agua residual se evalúan a través de su conductividad eléctrica (CE) expresada en miliOhms por centímetro (mmho/cm) a través de su contenido de sólidos disueltos (SDT), los cuales están dados en miligramos por litro (mg/l). En ambos casos las concentraciones no deberán exceder los siguientes valores:

CE de 0.7 a 3.0 mmho/cm.

SDT de 450 a 2000 mg/l.

En el caso de toxicidades específicas de sales, las más comunes son las ocasionadas por las sales de sodio y/o cloro; la concentración en que ambas sales dañan a los cultivos, varían dependiendo de la forma en que se apliquen al cultivo y generalmente se encuentran entre los siguientes valores:

Na (Evaluado por RAS)	3
Cl	147.5mg/l.
Riego por aspersión (Absorción foliar)	
Na	69 mg/l.
Cl	106 mg/l.

Ahora bien, cuando en las aguas residuales se tiene un bajo contenido salino y una excesiva concentración de sodio de carbonatos, y/o de bicarbonatos, se presenta una acumulación de sodio en el suelo, el cuál sustituye al calcio y al magnesio del complejo de intercambio ocasionando la dispersión o defloculación del suelo. La dispersión del suelo resulta en una pérdida de su estructura y como consecuencia, se tienen una reducida permeabilidad al aire y al agua<sup>(25)</sup>.

La reducción en la permeabilidad del suelo se traduce también en serios problemas de inundación, alta incidencia de enfermedades radiculares, compactación y formación de costras en la superficie que impide el desarrollo de los cultivos.

El peligro de dosificación de un suelo se evalúa a través de la relación de adsorción de sodio (RAS) y a través de su contenido de carbonato de sodio residual (CSR); este último expresado en meq/l. Ambos parámetros no deben de sobrepasar los siguientes valores:

RAS	3 - 9
CSR	125meq/l

#### **f) Sólidos Suspendidos.**

Los sólidos suspendidos que recibe el suelo cuando se riega con agua residual usualmente son partículas finas y principalmente en forma orgánica.

La acumulación de éstos sólidos sobre el suelo, forma una capa de alta impermeabilidad hidráulica, lo cuál reduce la tasa de infiltración y la

velocidad de descomposición de la materia orgánica, ocasionando un déficit de oxígeno en el suelo. Este descenso de oxígeno puede causar en plantas pequeñas y recién germinadas, la muerte<sup>(18)</sup> .

La obstrucción de los poros del suelo puede ocurrir en diferentes profundidades del mismo, siendo más difícil rectificar esta obstrucción cuando ocurre a una gran profundidad<sup>(18)</sup> .

La obstrucción de espacio poroso además de reducir la tasa de infiltración, promueve la creación de condiciones anaerobias que son la causa de una menor tasa de descomposición de la materia orgánica.

Generalmente se recomienda que el contenido de sólidos suspendidos en el agua residual sea inferior a 100 mg/l<sup>(17)</sup> .

#### **g) Detergentes.**

Los detergentes o agentes de superficie activa, son sustancias que se encuentran en las aguas residuales en cantidades considerables, usualmente arriba de 20mg/l.

Los detergentes aniónicos son los más ampliamente usados, y de ellos el conocido como ABS (Alquil Bencil Sulfonato) se utiliza en más del 90% de los productos de limpieza que se elaboran en México<sup>(26)</sup> .

Los efectos de los detergentes sobre las plantas parecen estar ligados a los efectos de los mismos sobre el suelo. Los detergentes afectan la permeabilidad del suelo en varios grados, pues no solo propician la dispersión de las partículas del suelo, sino que hacen infiltrar el agua a una mayor profundidad hasta horizontes donde no hay cultivos que puedan aprovecharla.

En el suelo los detergentes aniónicos implementan la susceptibilidad y persistencia de los plaguicidas y otros compuestos nocivos para las plantas.

También, disminuyen la flora nitrificante del suelo y es muy posible que contaminen las aguas subterráneas<sup>(27, 28)</sup> .

En cuanto a las concentraciones permisibles de este compuesto, es difícil establecer un valor único absoluto, ya que se ha observado una gran variabilidad en la susceptibilidad de los cultivos. Como dato de referencia se cita el siguiente rango:

Detergentes      2 - 4 mg/l.

#### **h) Grasas y Aceites.**

Se consideran como grasas a los ácidos grasos, ésteres simples y ceras. Los aceites incluyen a una amplia variedad de hidrocarburos de origen mineral con bajo peso molecular, abarcando desde la gasolina hasta combustibles y lubricantes. Adicionalmente se incluyen a todos los glicéridos de origen animal y vegetal que son líquidos a temperatura ambiente<sup>(29)</sup>.

Debido a que las grasas y los aceites de origen animal y vegetal son de fácil biodegradación, el mayor problema lo constituyen los aceites de origen mineral o sintéticos, los cuales son de muy lenta y difícil degradación<sup>(29)</sup>.

Las grasas y los aceites pueden encontrarse en el agua de dos formas diferentes: dispersas (emulsificadas) y no dispersas (forman película). Estas últimas son relativamente fáciles de remover, no ocurriendo lo mismo con los aceites emulsificados.

La formación de una película en la superficie del suelo, o la obstrucción de su espacio poroso por las grasas y aceites emulsificados, reducen notablemente la actividad microbiana, impermeabiliza el suelo, crea condiciones anaeróbicas e incrementa la temperatura del mismo; todo lo cuál repercute en la productividad de la planta.

Los límites permisibles para estos compuestos son muy variados, en general se recomienda que las concentraciones de grasas y aceites, sean inferiores a los 30mg/l<sup>(14)</sup>.

#### **i) Potencial de Hidrógeno.**

El pH del agua de riego parece tener poco significado en cuanto a los efectos que causa al suelo, ya que éste funciona como un sistema amortiguador de pH.

Los efectos del pH sobre el suelo y los cultivos son más bien indirectos. Aguas de riego con un pH mayor de 8.3 son indicativas de elevadas concentraciones de sodio, carbonatos y/o bicarbonatos. El agua con un pH inferior a 4.8 y aplicada a suelos ácidos promueve la solubilidad de muchos metales fitotóxicos.

El control del pH es un factor de mayor importancia en el suelo, que en el agua; sin embargo, valores extremos en el agua residual o en el suelo pueden ser corregidos através de la adición de cal.

Se recomienda como límite permisible un rango de pH de entre 6.5 y 8.4 en el agua residual<sup>(16)</sup> .

**j) Otros Compuestos.**

Dentro de este parámetro se incluyen a compuestos orgánicos del tipo de los plaguicidas, policlorobifenilos (PCBs), hidrocarburos clorados y fenoles. También se considera aquí el contenido de sulfatos.

La presencia de plaguicidas, hidrocarburos clorados y PCBs en el agua residual es importante debido a los conocidos efectos carcinógenos, mutagénicos o teratogénicos que causan al hombre.

Sin embargo, es poca la información que se tiene a cerca de las cantidades en las que se presentan en el agua residual y de los efectos que causan a las plantas<sup>(30)</sup> .

La utilización del cloro como desinfectante de las aguas residuales puede resultar en la formación de una amplia gama de compuestos clorados. Se ha sugerido por lo mismo que las concentraciones de cloro residual no excedan los 0.5mg/l<sup>(14)</sup> .

Los fenoles por su carácter bactericida afectan algunos procesos microbianos del suelo, en especial la nitrificación. Las concentraciones permisibles de este compuesto generalmente son del orden de 50mg/l<sup>(31)</sup> .

Finalmente, en cuanto al contenido de sulfatos es importante señalar que la susceptibilidad de un cultivo a este compuesto presenta una notable variación entre las diferentes especies cultivadas. Los límites permisibles para este compuesto son relativamente altos y se encuentran entre 150 y 320mg/l<sup>(32)</sup> .

## **2. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

## 2. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

Existe un gran número de procesos de las aguas residuales cuya aplicación depende tanto de las características de las aguas que ingresan a las plantas de tratamiento (influyente) como de la calidad que se desea obtener en su salida (efluente).

Los contaminantes presentes en las aguas de desechos pueden ser eliminados por medios físicos, químicos y biológicos. No obstante de ésta gran variedad, el tratamiento de las aguas residuales pueden ser clasificados en un pretratamiento y tres niveles generales (33) .

En la Figura 2.1. se puede observar un esquema simple de la clasificación de los tratamientos de aguas residuales.

### 2.1. Pretratamiento<sup>(9, 13, 33)</sup>.

El tratamiento preliminar está definido como el acondicionamiento del agua residual en su fuente antes de la descarga al sistema de entrada de la planta. El propósito del tratamiento preliminar es remover o neutralizar sustancias que podrían dañar al sistema de entrada o que afecta adversamente la operación de la planta de tratamiento. Dicho material incluye madera, cartón, trapos, plásticos, arena, grasas y espuma.

Las operaciones de pretatamiento son las siguientes (No obstante, una planta de tratamiento puede incluir una o varias de estas operaciones según su importancia y la calidad del agua residual):

#### a). Cribado.

Se trata de eliminar los elementos de grandes dimensiones que se hayan en el agua de albañal cruda ( trapos, materias plásticas, ... ), que pueden entorpecer el funcionamiento hidráulico de la planta. Se intercala con este fin una rejilla cuyas barras tienen una separación del orden de un centímetro.

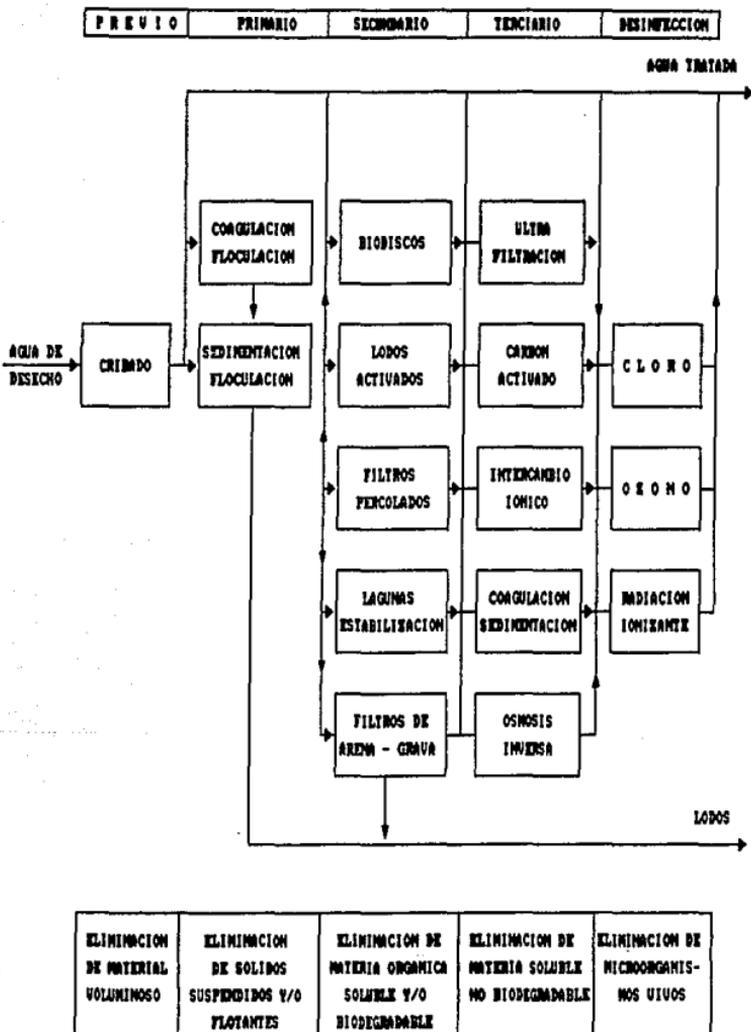


Fig. 2.1 Clasificación de los tratamientos de aguas residuales.

#### **b). Separación de aceites.**

Las aguas urbanas de desecho contienen a menudo materias flotantes que pasan a través de las rejillas ( aceites, hidrocarburos, restos de grasas y fragmentos de materias plásticas, ..). Los aceites y los hidrocarburos forman una capa delgada en la superficie, entorpeciendo así el proceso de aeración en el caso de los lodos activados; en cuanto a las materias sólidas flotantes, se corre el riesgo de que formen tapones que pudieran obstruir los canales o los orificios en la planta; por lo tanto, es necesario atrapar dichas sustancias en el nivel del tratamiento preliminar, por medio de un dispositivo de desnatado.

#### **c). Desarenado.**

Después del cribado quedarán aún en el agua fragmentos sólidos que pueden decantar con facilidad, pero cuya dureza y tamaño relativamente importante, superior a 0.2 mm de diámetro, podrían llevar abrasión de ciertos equipos de las plantas de tratamiento, en especial las bombas. Estos materiales fácilmente decantables se eliminan en pequeños tanques rectangulares o circulares.

### **2.2. Tratamiento Primario.**

El tratamiento primario tiene por objeto la remoción de la materia orgánica e inorgánica suspendida en las aguas residuales. En este tipo de tratamiento tenemos la sedimentación y la coagulación<sup>(33, 34)</sup>.

La sedimentación, es el proceso de asentamiento y depósito de la materia suspendida en el agua, por la fuerza de la gravedad. Generalmente se logra disminuyendo la velocidad del líquido por debajo del punto en que pueda arrastrar el material suspendido<sup>(34, 39)</sup>.

La floculación es la formación de un flóculo de materias sedimentable. A medida que éste se sienta a través del líquido, empuja hacia abajo otras partículas sedimentables con él, aumentando así la eficiencia de la eliminación de las sustancias sedimentables y reduciendo el tiempo necesario para ello. Los flóculos pueden formarse por medios químicos o

biológicos. El procedimiento más común de floculación, es la floculación química, que consiste en adicionar al agua un coagulante adecuado. La floculación biológica o biofloculación, se ha atribuido a la secreción de polielectrolitos naturales, como los polisacáridos y poliaminoácidos complejos, durante las fases declinantes y endógenas, de algunas bacterias<sup>(35, 36)</sup>.

### 2.3. Tratamiento Secundario ( Procesos Unitarios Biológicos).

En los procesos biológicos los microorganismos se utilizan para transformar los productos residuales de la sociedad humana en materiales inocuos<sup>(38)</sup>.

Los objetivos que persigue el tratamiento biológico del agua residual son la coagulación y la eliminación de sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica<sup>(38)</sup>.

En los Estados Unidos de Norte América, se define al tratamiento biológico como aquel que logre la siguiente calidad en el efluente<sup>(8)</sup>:

PARAMETRO	MEDIA MENSUAL	MEDIA SEMANAL
DBO	30 mg/l	45 mg/l
SOLIDOS SUSPENDIDOS	30 mg/l	45 mg/l

Tabla 2.1. Calidad en el efluente para un proceso biológico.

Los procesos biológicos se pueden clasificar según la dependencia del oxígeno por parte de los microorganismos fundamentalmente responsables del tratamiento de los residuos<sup>(38, 39)</sup>.

a) Procesos aerobios: Aquí se utilizan microorganismos aerobios facultativos.

b) Procesos anaerobios: Aquí se utilizan microorganismos anaerobios y facultativos.

### 2.3.1. Procesos Aerobios.

Los procesos que se conocen son:

Lodos activados.

Filtros percoladores.

Biodiscos o reactores biológicos rotatorios.

Zanjas de oxidación.

Lagunas de oxidación.

Lagunas aeradas.

Aeración extendida.

#### 2.3.1.1. Lodos Activados<sup>(36, 39, 40, 41, 42)</sup> .

En 1914 y 1915, Ander y Lockett fueron los primeros en discutir las nociones fundamentales del actual proceso de lodos activados.

En el proceso de lodos activados, un residuo se estabiliza biológicamente en un reactor bajo condiciones aerobias. El ambiente aerobio se logra mediante la inyección de aire por medio de difusores o sistemas mecánicos. Al contenido del reactor se le denomina licor - mezcla. Una vez que el agua residual ha sido tratada en el reactor, la masa biológica resultante se separa del líquido en un tanque de sedimentación y parte de los sólidos biológicos sedimentados son retornados al reactor; la masa sobrante es eliminada. El nivel al cual se debe mantener la masa biológica depende de la eficiencia deseada del tratamiento y otras consideraciones referentes a la cinética de crecimiento.

En el proceso de lodos activados las bacterias son los microorganismos que realmente degradan el residuo orgánico, pero también son importantes otros microorganismos como son: protozoos y rotíferos que actúan como depuradores de los efluentes.

La operación plena de las unidades de lodos activados se alcanza generalmente en un tiempo de 10 días a 2 semanas.

El proceso de lodos activados es muy flexible y puede adaptarse a casi cualquier tipo de problema relativo al tratamiento biológico de las aguas residuales. A continuación se indican los tipos de procesos de lodos activados más comunes:

#### **(a) Convencional.**

Es un sistema de flujo en pistón con recirculación celular. Esto consiste en un tanque de aeración, un clarificador secundario y una línea de retorno de lodos; la purga de lodos se puede realizar indistintamente desde la conducción del licor mezclado o desde la de retorno de lodo, por lo que se refiere al flujo en pistón, esto es, tanto el agua residual efluente sedimentada, como el lodo recirculado entran al tanque por un extremo y son aerados durante un espacio de 6 horas más o menos. Ambos son mezclados por la acción de la aeración mecánica y por difusores de aire que permanecen constantes conforme el licor mezclado se desplaza a lo largo del tanque. Durante este período se produce la absorción, la floculación y oxidación de la materia orgánica. El licor mezclado se hace sedimentar en un tanque para la clarificación de aproximadamente, 25 al 50 % del gasto influente.

#### **(b) Mezcla Completa con Recirculación Celular.**

El contenido del reactor está en condiciones de mezcla completa y supone que no hay microorganismos en el agua residual afluente. El sistema contiene un dispositivo sedimentador en que las células del reactor se depositan y, a continuación, son introducidas de nuevo al reactor. La carga orgánica en el tanque de aeración y la demanda de oxígeno son uniformes de uno a otro lado del tanque. El licor mezclado al ir atravesando el tanque de aeración, desde la entrada hasta el canal efluente está completamente mezclado por medio de la aeración mecánica o por difusores de aire.

#### **(c) Aeración Graduada.**

El objetivo que persigue la aeración graduada es acoplar la cantidad de aire suministrada a los microorganismos conforme el agua atraviesa el tanque de aeración. La aeración graduada afecta únicamente a la disposición de los difusores en el tanque de aeración y a la cantidad de aire consumido, su uso es muy extendido y en el sentido estricto, se trata en realidad de una modificación del proceso convencional. La demanda de oxígeno es muy grande en la entrada del tanque de aeración, donde el agua residual es sometida a sedimentación y el lodo activado de retorno entran en contacto por primera vez. Los difusores se colocan a pequeños intervalos iguales

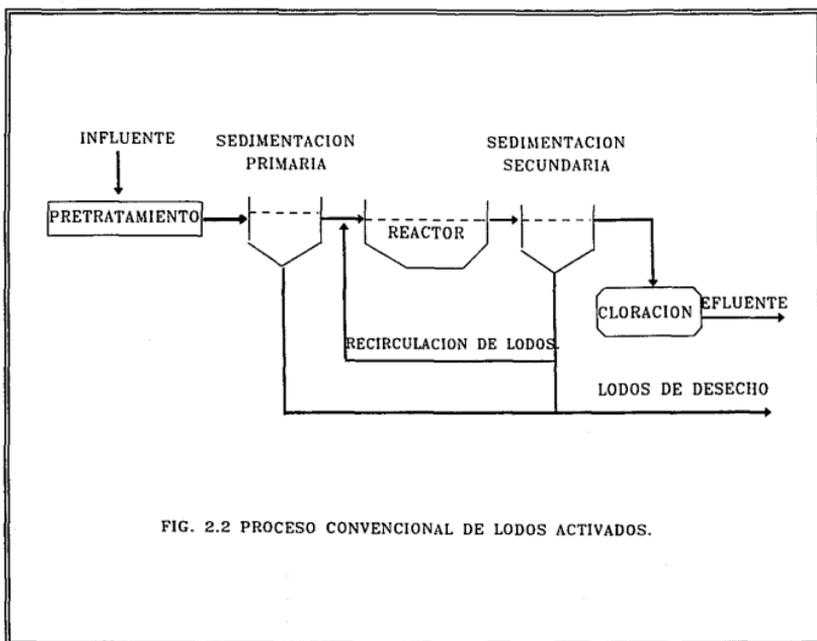


FIG. 2.2 PROCESO CONVENCIONAL DE LODOS ACTIVADOS.

para lograr una tasa elevada de oxigenación y satisfacer así la demanda. A medida que el licor mezclado atraviesa el tanque de aeración tiene lugar la síntesis de nuevas células aumentando el número de microorganismos y disminuyendo la concentración de alimento disponible, dando como consecuencia un descenso en la demanda de oxígeno. El espaciamiento entre los difusores aumenta entonces hacia la salida del tanque a fin de reducir la tasa de oxigenación.

**(d) Aeración Escalonada.**

El proceso de aeración escalonada es una modificación del proceso de lodos activados en el que se introduce el agua residual en distintos puntos del tanque de aeración para igualar la relación entre alimentos y microorganismos en todo el tanque, disminuyendo con ella la demanda pico de oxígeno. El tanque de aeración se subdivide por medio de unos deflectores en cuatro canales paralelos o más. Cada canal es una fase o escalón individual y las distintas fases se conectan entre sí en serie. El lodo de retorno entra en la primera fase del tanque de aeración junto con parte del agua residual sedimentada. El sistema de conducciones está dispuesto de tal modo que en cada fase se introduce agua residual en el tanque de aeración. Una de las características más importantes de este proceso es su flexibilidad. Sin embargo, en la aeración escalonada la demanda de oxígeno se distribuye uniformemente a todo lo largo del tanque de aeración dando como resultado una mejor utilización de oxígeno suministrado.

**2.3.1.2. Filtros Percoladores<sup>(33, 36, 37, 38)</sup>.**

El primer filtro percolador se puso en funcionamiento en Inglaterra, en 1893. El filtro percolador es un proceso con microorganismos adheridos a una superficie soporte. Normalmente se desarrolla una película o capa de microorganismos sobre piedra triturada, si bien las superficies de plástico están ganando popularidad. Las aguas residuales que contienen compuestos orgánicos se hacen pasar sobre superficies soporte en forma de una película líquida que desciende por gravedad. Conforme el líquido pasa a través del filtro, las impurezas orgánicas son eliminadas por la masa

microbiana. Los productos consisten en compuestos oxidados que poseen cadenas de carbono más cortas, dióxido de carbono y nitratos así como los microorganismos adicionales.

El filtro por goteo consiste usualmente en un lecho circular o rectangular de material disgregado que se mantiene sobre un sistema con drenaje apropiado en la parte inferior. El tamaño de las partículas está en un intervalo entre 2 y 15 cm de diámetro con una altura media de relleno de unos 2 metros. Las dimensiones de la superficie están limitadas sólo por la disponibilidad de terreno y por los medios adecuados para distribuir el efluente uniformemente sobre la superficie del filtro. Para delimitar el lecho pueden usarse muros de contención de hormigón y metal expandido o tela metálica. Un método más barato supone acumular la superficie con su ángulo normal de talúd. Durante la operación, el agua residual se pulveriza de forma continua sobre el lecho mediante un distribuidor, el cual es rotatorio en lechos circulares o se mueve de delante hacia atrás alternativamente en los lechos rectangulares. Este método de aplicación tiene efectivamente como resultado una alimentación intermitente. El efluente tratado pasa del medio al sistema de drenaje inferior y descargado mediante conductos apropiados (porosos) a través de la cual el aire puede circular. La carga hidráulica origina las velocidades de arrastre y la carga orgánica influye en la velocidad del metabolismo en la película biológica. Con base en estas cargas hidráulica y orgánica, los filtros suelen dividirse en dos clases: de baja carga y alta carga. En la comunidad biológica presente en un filtro se compone principalmente de protistas, incluyendo bacterias facultativas, aerobias y anaerobias, hongos, algas y protozoos. Suelen también encontrarse algunos animales superiores, como gusanos, larvas de insectos y caracoles. Las algas sólo pueden crecer en las capas superiores del filtro donde puede llegar la luz solar. Por lo general, las algas no toman parte directa en la degradación de residuos, pero durante las horas diurnas añaden oxígeno al agua residual que se está filtrando. Desde el punto de vista operacional, las algas son un estorbo, ya que pueden causar el taponamiento de la superficie del filtro. Los filtros percoladores maduran de pocas semanas en el verano, pero requieren varios meses durante el clima frío.

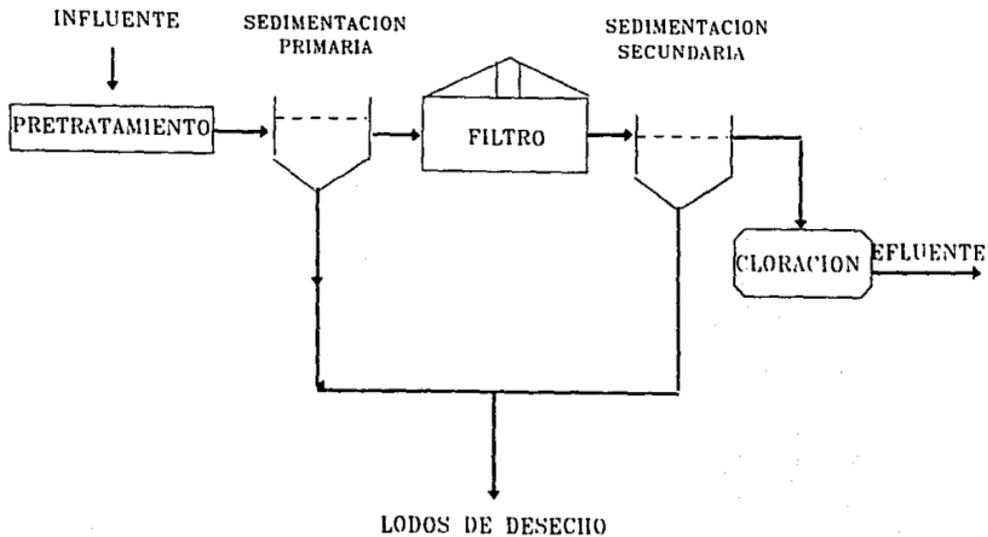


FIG. 2.3 PROCESO CONVENCIONAL DE FILTRO ROCIADOR.

### 2.3.1.3. Biodiscos<sup>(33, 36, 43)</sup>.

Los discos biológicos rotatorios, como un sistema de tratamiento secundario para las aguas residuales domésticas e industriales, se remonta al año 1990 en Alemania, en donde Wergand (Autotrol, Corp. ) usó por primera vez un contactor biológico rotatorio. Su patente para el reactor describe un cilindro construido con tablillas de madera. Los discos biológicos es uno de los sistemas más recientes de tratamiento biológico, es el contacto biológico rotatorio comúnmente conocido como biodiscos. Se trata de un sistema biológico aerobio de película fija el cual se emplea para la remoción de la materia orgánica soluble y nitrógeno amoniacal o para desnitrificación de efluentes nitrificados. El sistema de biodiscos consiste en una serie de discos de 2 a 4m de diámetro, fabricados de poliestireno o polietileno desplegado o corrugado, o de metal desplegado, 10 a 20 mm de ancho, soportados en una flecha horizontal e instalados en un tanque de concreto. La flecha y el medio plástico se hace girar por medio de un mecanismo motriz acoplado a la flecha, a una velocidad de entre 1 y 2 rpm manteniendo aproximadamente el 40% del área superficial del tambor sumergido en el agua residual. Los microorganismos presentes en el agua residual comienzan a fijarse y a crecer en la superficie de los discos que se cubren con una película biológica de 2 a 4 mm de espesor. Durante la rotación, el tambor acarrea una película de agua residual, la cual, al ponerse en contacto con el aire, absorbe el oxígeno requerido por los microorganismos de la película biológica, fijos a los discos, los cuales renuevan la materia orgánica soluble. La acción de giro de los biodiscos ocasiona una fuerza de fricción sobre la película biológica, lo que provoca que el exceso de biomasa se desprenda de los biodiscos, manteniendo en esta forma una película de espesor constante y conservando la biomasa desprendida en suspensión hasta que el flujo de agua lo lleve fuera del reactor para su posterior separación por sedimentación. La comunidad biológica es semejante a la de un filtro percolador.

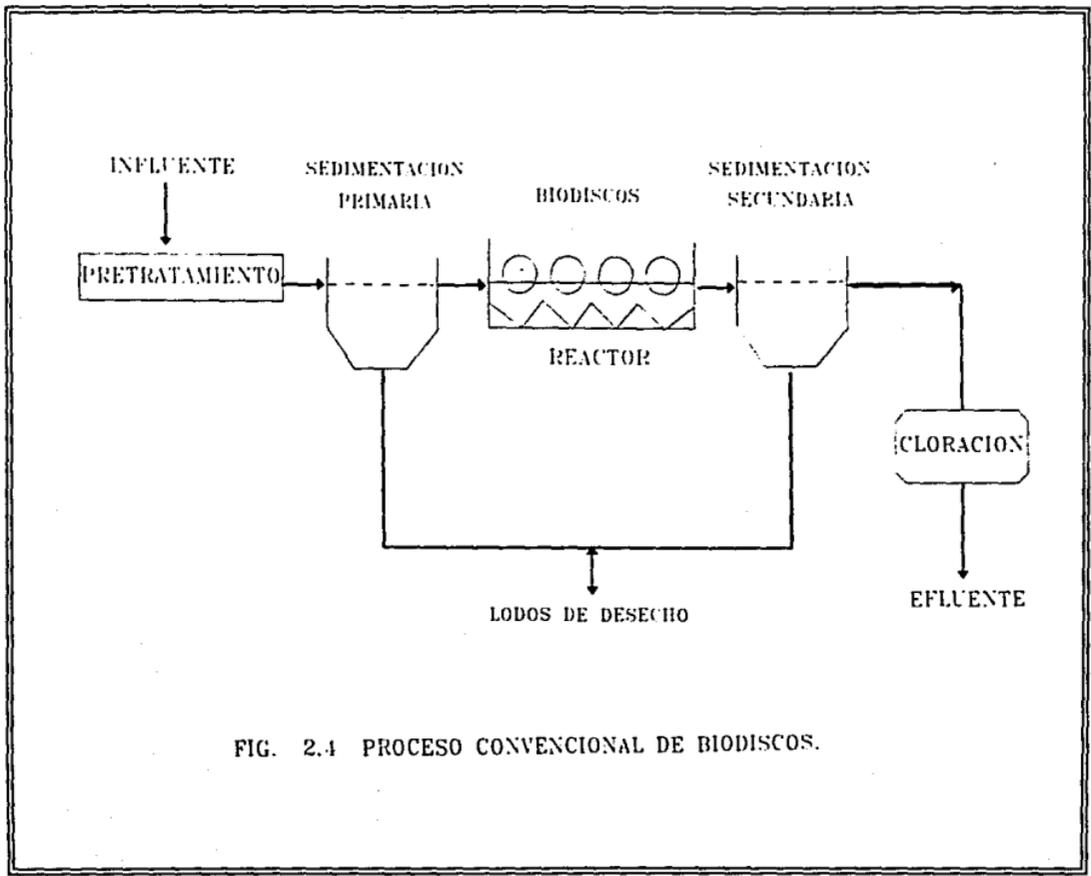


FIG. 2.4 PROCESO CONVENCIONAL DE BIODISCOS.

#### **2.3.1.4. Zanjas de Oxidación<sup>(36, 39, 42, 44)</sup>.**

Las zanjas de oxidación constituyen un tipo de sistema simplificado de tratamiento a partir del proceso de lodos activados, consisten fundamentalmente en la aeración intensa con turbulencia de las aguas residuales. Físicamente las zanjas de oxidación son precisamente zanjas o canales en forma de anillos alargados por donde circula el agua residual que está siendo tratada. En estas plantas, después de la eliminación de sólidos gruesos por medio de rejillas (único pretratamiento requerido) el agua residual entra a la fosa y se hace circular junto con los lodos activados para formar así, el licor mezclado. Esta masa de agua se aerea con cepillos rotatorios superficiales; después, el agua permanece en la zanja de uno a uno y medio días junto con todos los sólidos que el agua cruda arrastra, los cuales son de carácter orgánico y alcanzan un estado avanzado de mineralización que hace innecesario la instalación de digestores de lodo. Las zanjas con admisión de aguas crudas y extracción de agua tratada continua, están formadas por una zanja o canal en forma de anillo alargado y tiene adosadas dos fosas secundarias que sirven de sedimentadores secundarios. La comunidad biológica esta compuesta de los mismos organismos que se encuentran en los lodos activados, como bacterias y protozoarios principalmente, además de pequeñas cantidades de hongos, algas, metazoarios y otros.

#### **2.3.1.5. Lagunas de Oxidación<sup>(38, 42)</sup>.**

Las lagunas de oxidación o de estabilización son consideradas como reactores biológicos completamente mezclados sin recirculación de sólidos. El mezclado se lleva a cabo por procesos naturales (viento, convección, gases en el sistema), asimismo puede inducirse por medios mecánicos.

Excepto la población de algas, la comunidad biológica presente en una laguna de oxidación es semejante a la de un proceso de lodos activados.

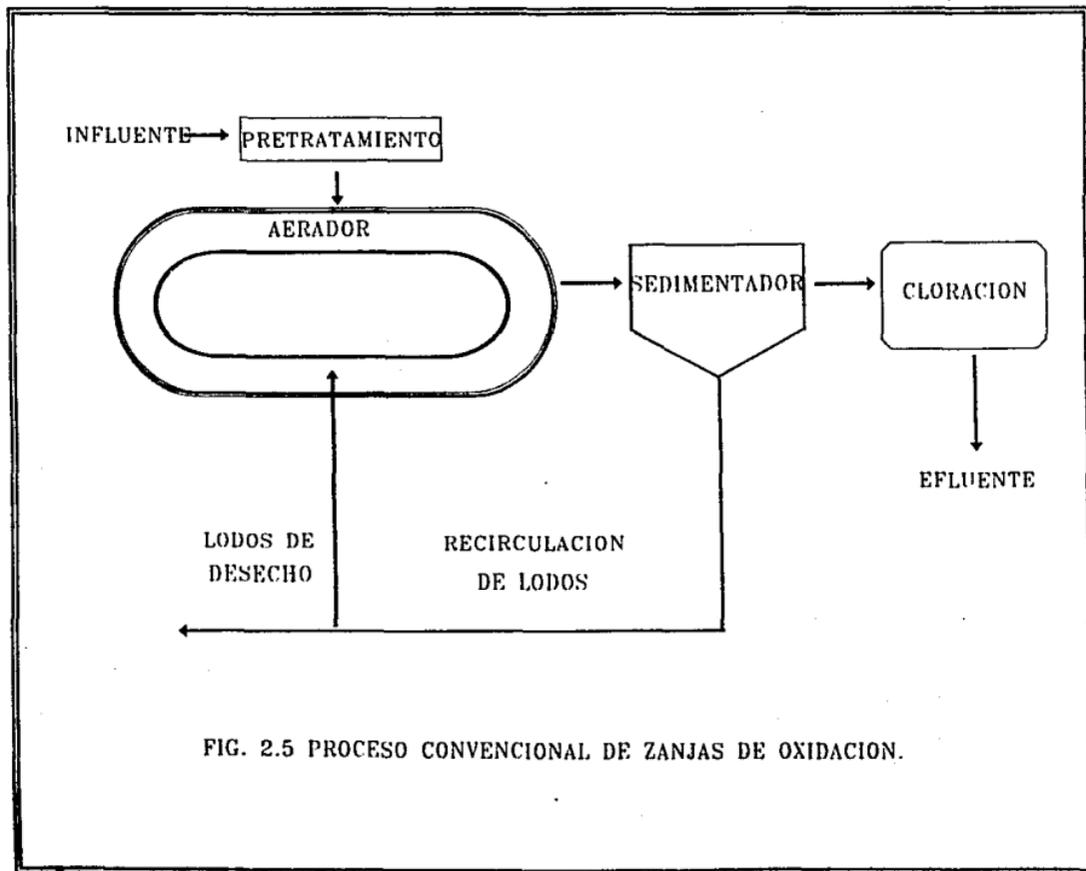


FIG. 2.5 PROCESO CONVENCIONAL DE ZANJAS DE OXIDACION.

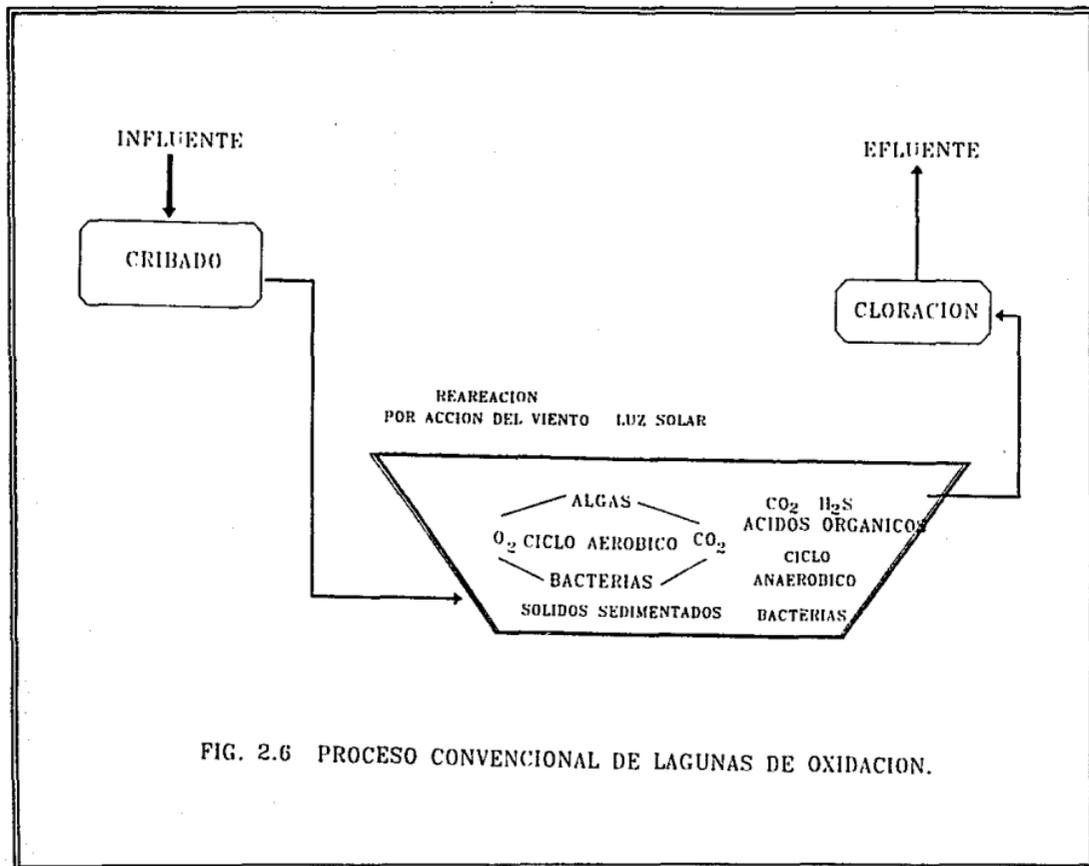


FIG. 2.6 PROCESO CONVENCIONAL DE LAGUNAS DE OXIDACION.

### **2.3.1.6. Lagunas Aeradas<sup>(42, 45)</sup>.**

Una laguna aerada es un estanque en el que se trata el agua residual que la atraviesa en forma continua, el oxígeno es generalmente suministrado por aeradores superficiales o unidades de aeración por difusión. La acción de los aeradores y de las burbujas de aire que ascienden desde el difusor mantienen en suspensión el contenido del estanque.

El contenido de una laguna aerobia está totalmente mezclado y no sedimentan ni los sólidos entrantes ni los biológicos producidos a partir del agua residual. La función esencial de este tipo de lagunas es la estabilización de desechos orgánicos.

Las bacterias, constituyen la mayoría de los organismos en este proceso, pero también contribuyen los hongos y protozoarios.

### **2.3.1.7. Aeración Extendida<sup>(44, 45, 46)</sup>.**

Este proceso es una modificación del proceso de lodos activados. Las unidades de aeración puede ser un tanque de concreto o de acero con aeración difundida, una cuenca de tierra alineada con aeradores mecánicos. Los períodos de aeración son de 24 a 36 hrs. Los organismos presentes son los mismos que un proceso de lodos activados.

### **2.3.2. Procesos Anaerobios<sup>(40)</sup>.**

El tratamiento anaerobio de aguas residuales supone la descomposición de la materia orgánica y/o inorgánica en ausencia de oxígeno molecular.

Este proceso sigue el mismo patrón que el sistema de lodos activados con la diferencia de que en este caso, los tanques, tanto el de reacción como el de sedimentación, están cerrados. En el reactor los organismos anaerobios y facultativos descomponen a la materia orgánica y/o inorgánica en productos gaseosos (metano y dióxido de carbono). Coexisten en el

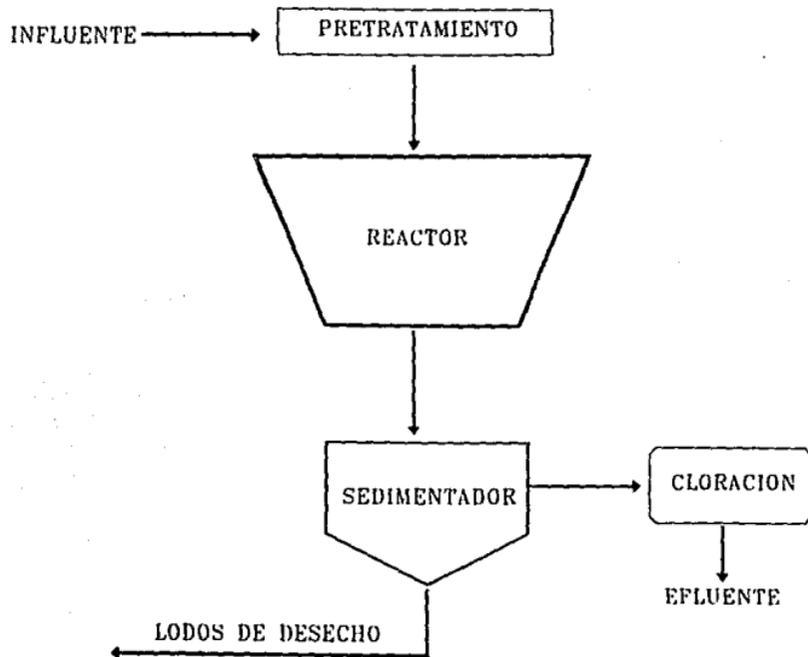


FIG. 2.7 PROCESO CONVENCIONAL DE LAGUNAS AERADAS.

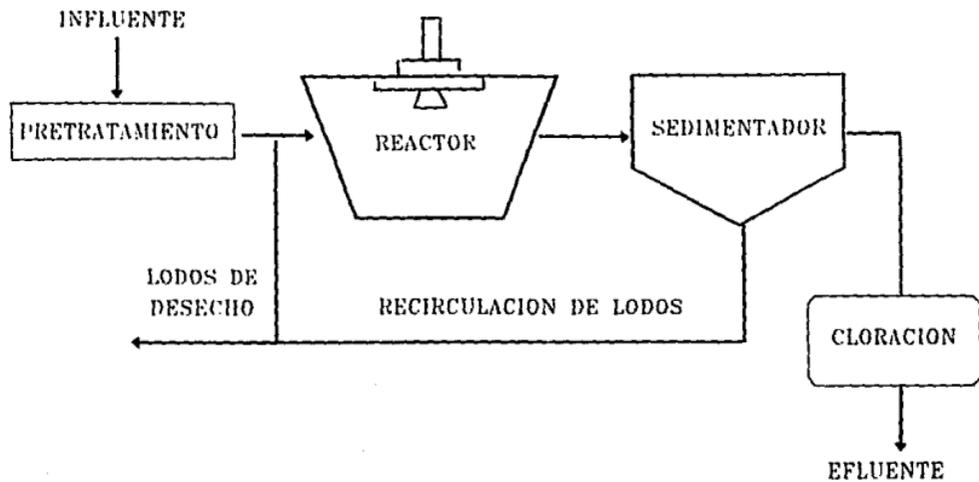


FIG. 2.8 PROCESO CONVENCIONAL DE AEREACION EXTENDIDA.

sistema dos grupos principales de microorganismos: 1) Bacterias formadoras de ácidos, que hidrolizan y fermentan compuestos orgánicos complejos en ácidos simples (ácido acético y ácido propiónico) y, 2) Bacterias formadoras de metano que convierten los ácidos orgánicos formados por el primer grupo en gas metano y anhídrido carbónico.

El tiempo de detención del líquido en el reactor oscila entre 10 y 30 días, incluso más, según como opere el sistema.

#### **2.4. Tratamiento Terciario<sup>(33, 47)</sup>.**

Es un tipo de tratamiento que consiste en operaciones para eliminar algunos contaminantes que no fueron eliminados en las etapas anteriores. Estos contaminantes incluyen compuestos inorgánicos solubles tales como fósforo y nitrógeno, compuestos orgánicos no biodegradables, compuestos coloidales, sustancias que producen color, etc.. Dentro de las operaciones más comunes se encuentra la coagulación, la filtración, la adsorción en carbón activado, el intercambio iónico y la ósmosis inversa.

#### **2.5. Desinfección<sup>(33, 35)</sup>.**

Es la última etapa utilizada en el tratamiento de aguas, tiene el objetivo de desactivar a los microorganismos presentes en el efluente, lo cual se puede realizar con cloro gaseoso, ozono o radiaciones.

### **3. COSTOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN MEXICO**

### 3. COSTOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN MEXICO.

La planificación preliminar de los proyectos de tratamiento de aguas residuales y los arreglos para el financiamiento se deben basar en datos confiables de costos. En los países en desarrollo, como México, es difícil obtener datos de costos en relación a los proyectos de tratamiento de aguas residuales, principalmente porque las dependencias gubernamentales han sido las responsables de la planificación y desarrollo de tales proyectos, y no han sistematizado dicha información.

#### 3.1. Métodos de Estimación de Costos<sup>(48, 49, 50)</sup> .

La estimación de costos para la construcción, operación y mantenimiento de una planta de tratamiento de aguas residuales, se puede obtener indirectamente, utilizando el siguiente tipo de información;

- 1.- Costos de plantas similares a las que se planea construir, construídas
- 2.- Costos de plantas construídas dentro del país.

Con lo que respecta a la primera opción, los costos de un país no son aplicables directamente a otros países; sin embargo, las relaciones entre los costos observados en los varios tipos de tratamiento son útiles, particularmente los costos unitarios en función del tamaño de la planta.

En algunos casos se tienen ecuaciones generales predictivas de costos desarrolladas para situaciones similares. Por ejemplo, la relación entre la capacidad de la planta y los costos de construcción a menudo se representan con la siguiente función de potencia.

$$C = aQ^b$$

donde:

**C** = Costos de construcción.

**Q** = Capacidad de la planta.

**a** y **b** = Constantes de ajuste, cuyo valor depende del tipo y tamaño de la planta.

La constante **b** determina la manera en la cual cambia el costo con la capacidad de la planta. Los grandes ahorros de escala se asocian con valores pequeños de **b**. La constante **a** es equivalente al costo de construcción de una planta con capacidad unitaria, y también es una función del índice de costos.

### **3.2. Factores que Influyen en los Costos de Tratamiento de Aguas Residuales**(48, 51, 52, 53) .

Se ha definido varios factores, que determinan los costos del tratamiento de agua residual, algunos de los más comunes son los siguientes:

- 1.- Tipo de planta.
- 2.- Capacidad de la planta.
- 3.- Costos locales de materiales y mano de obra.
- 4.- Criterios de diseño.
- 5.- Ubicación geográfica.
- 6.- Transportación.
- 7.- Condiciones climáticas.
- 8.- Nivel de competencia entre contratistas.
- 9.- Tiempo de entrega de componentes críticos.

Un factor de gran importancia, es el costo del equipo y materiales especialmente cuando dichos suministros se tienen que importar. Obviamente, no sería factible incorporar todos estos factores en una estimación preliminar de costos para un proyecto particular; sin embargo, se deben considerar las condiciones conocidas que afectarán sustancialmente el costo de un proyecto, y ajustar así la estimación de costos.

### **3.3. Costos de Inversión Inicial de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales**(20, 51) .

Los costos de capital son todos los costos que básicamente incluyen: la compra de la propiedad, los derechos de vía, los pagos por el equipo y la construcción, así como por los servicios de ingeniería y legales, y los cargos por intereses durante la construcción.

### **3.4. Costos de Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales .**

Se entiende por operación el procedimiento organizado que permite el buen funcionamiento del equipo, una planta de tratamiento, u otro servicio, para realizar una función del proceso de tratamiento destinada, en él no se incluye la construcción inicial o instalación de la unidad<sup>(54)</sup> .

El mantenimiento es el procedimiento organizado para el cuidado del equipo, planta, servicio, o sistema en dicha condición que es capaz para realizar confiablemente y continuamente su función destinada<sup>(54)</sup> .

Los costos de operación y mantenimiento son muy variables y mucho más difíciles de estimar que los costos de construcción. Dichos costos de operación y mantenimiento dependen de los costos de mano de obra, calidad y costo del agua cruda, grado de utilización de equipo, y costos de materiales importados y de la complejidad de las instalaciones; además, dependen fuertemente de los costos de energía y reactivos químicos, los cuales son muy sensibles a los precios del mercado<sup>(48, 52)</sup> .

Los costos de mantenimiento tienden a aumentar con la edad de la planta de tratamiento de aguas residuales, razón por la cual se requiere más atención cuando envejece, porque la tendencia, tanto de los salarios como de los precios de los materiales, tienden a aumentar<sup>(2)</sup> .

Para hacer una comparación de dos procesos de tratamiento diferentes en términos de costos, hay que tener en cuenta lo siguiente: costo inicial, el costo de operación y mantenimiento, y el costo de amortización. Este último concepto es difícil de estimar, especialmente por que la mayor parte de las instalaciones pueden quedar obsoletas, porque los requerimientos se hagan más estrictos, a esto se debe que, algunas veces, se realicen las comparaciones de costos basándose únicamente en el costo de inversión inicial y en el costo de operación y mantenimiento<sup>(2, 34)</sup> .

### **3.5. Criterios Generales para Optimizar el Costo del Agua Renovada.**

#### **3.5.1. Esquema General de Implantación de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (2, 8, 51) .**

Desde su concepción original, el proyecto de un sistema de tratamiento sigue una serie de etapas, que van desde la definición del objetivo de la planta, hasta la etapa de instalación y prueba básicamente, donde ya se estará produciendo el agua con una calidad determinada. El proceso para la implantación de la obra tiene la siguiente secuencia: planeación, diseño, construcción, operación y mantenimiento, y abandono o cierre.

**a). Planeación:** Es la actividad encaminada a la concepción de la obra que satisfaga los requerimientos de operación y destino final del proyecto. En esta etapa deben resolverse diversos aspectos, algunas veces frecuentemente conflictivos, entre los que se cuentan: la finalidad de la obra, su impacto económico, las necesidades sociales, los factores ambientales y los factores políticos. Esta etapa se caracteriza por la realización de estudios de campo y de gabinete, y por el desarrollo de estudios de factibilidad técnica, económica, social y financiera.

**b). Diseño:** Es la actividad que incluye las dimensiones y selección de los materiales y equipo que conforman toda la obra, tanto de estructuras permanentes como provisionales. El producto final está formado por planos y especificaciones, catálogos de cantidades de obra, especificaciones de construcción, especificación de procuración de equipos que permitan proceder a la etapa constructiva. En esta etapa se elaboran los manuales de operación y mantenimiento de la planta.

**c). Construcción:** Prácticamente, es la ejecución física de la obra; esta etapa que incluye el levantamiento de todo tipo de estructuras permanentes y provisionales, y sus instalaciones integrales; en ella se llevan a efecto los diseños realizados, procurando mantener los controles de calidad, de tiempo de ejecución y de costo de la obra.

**d). Operación y Mantenimiento:** Son las dos actividades que se realizan a lo largo de la vida útil del proyecto. La operación comprende las acciones requeridas para que la obra produzca los beneficios para los que fué creada. El mantenimiento consiste en la conservación de las estructuras y de las instalaciones para que funcionen en forma eficiente durante su vida útil. Hay mantenimiento operativo (lubricación, limpieza, reposición de partes menores, etc.), preventivo (substitución de partes) y correctivo (emergencias, rehabilitación y reposición).

**e). Abandono:** Al término de su vida útil, las obras deben retirarse del servicio por obsolescencia funcional, economía, desgaste de materiales, etc.. Para ello, se requiere la demolición y desmantelamiento de las estructuras e instalaciones y el aprovechamiento de materiales y del terreno de la obra.

### **3.5.2. Localización de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales** (2, 51)

Es conveniente determinar el lugar en que se ha de instalar una planta de tratamiento de aguas residuales; en general esto se hace en dos etapas: en la primera, se selecciona el área en que se estima conveniente localizar la planta; y en la segunda, se elige la ubicación precisa del equipo.

#### **1.- Factores determinantes de la localización de la planta.**

Los factores que inciden con mayor peso en la localización de una planta de tratamiento de aguas residuales son los siguientes:

- 1.- Localización de los posibles consumidores.
- 2.- Localización de las fuentes de disposición de las aguas residuales.

La localización y grado de dispersión de los consumidores ejerce una gran influencia puesto que implica consideraciones sobre la distribución y movilidad del agua tratada, lo que se traduce en economía del proceso. La distancia que debe recorrer el agua tratada desde la planta hasta el consumidor; por lo tanto el costo y la distancia que recorre el agua son directamente proporcionales; por lo tanto, al acercarse la planta al consumidor se reduce el costo de transportarla, sin embargo, es por ello que la localización consistirá esencialmente en efectuar una comparación de los

costos de transporte y de las pérdidas originadas por la disminución en los volúmenes de las aguas.

- 3.- Mano de obra (disponibilidad y características).
- 4.- Factibilidad de transporte.
- 5.- Costos de energía.
- 6.- Disponibilidad de predios ( costo del terreno ).
- 7.- Facilidad de eliminación de desechos.
- 8.- Disposiciones legales, fiscales o de política económica.
- 9.- Actitud de la comunidad.

**II.- Factores determinantes en la ubicación de la planta ( ubicación precisa del equipo).**

La determinación del sitio específico para la ubicación definitiva de la planta de tratamiento de aguas residuales es el siguiente paso después de determinar la zona de localización. Los factores que influyen en esta decisión son:

- 1.- Tipo de construcción a efectuarse.
- 2.- Area requerida inicialmente y para posibles expansiones futuras.
- 3.- Necesidades de transporte de agua.
- 4.- Consumo de energía.
- 5.- Volúmenes de producción de aguas tratadas.
- 6.- Volúmenes de desperdicios y facilidades para su desalojo.
- 7.- Disponibilidad de predios.
- 8.- Topografía del terreno.
- 9.- Características mecánicas del suelo.
- 10.- Costo del terreno.
- 11.- Futuros desarrollos en los alrededores del predio.

La construcción y operación de una planta de tratamiento de aguas residuales es un proceso que consume tiempo y requiere de inversión. A pesar de la importancia y complejidad del problema, no hay en México un proyecto prototipo para el tratamiento de aguas residuales. De hecho, la variedad de las características hidráulicas y químico biológicas del influente, la calidad requerida del agua tratada, las etapas de tratamiento seleccionadas, el tipo de subsuelo y los procedimientos constructivos requeridos, explican que el diseño de cada planta sea un resultado único y diferente.

### **3.5.3. Factores que Influyen en el Costo de la Obra Civil de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales<sup>(51, 55)</sup> .**

El funcionamiento de las estructuras de una planta de tratamiento es afectado por la topografía, las condiciones geotécnicas, la solución de la cimentación, la impermeabilidad de las estructuras, la durabilidad de los materiales, los procedimientos constructivos, los sistemas de interconexión y la operación y conservación del sistema. Si estas condiciones no se consideran en forma adecuada, pueden afectar la operación, produciendo variación de cargas y gradientes hidráulicos, hundimiento general y diferencial de estructuras, fugas y filtraciones, flotación de tanques, desintegración del concreto, corrosión del acero y rupturas de tuberías. En este tipo de obras existen recomendaciones especiales en los procedimientos constructivos, que incrementan la inversión inicial o en apariencia dificultan los procedimientos y costos de construcción; pero a fin de cuentas es en beneficio del sistema y, ante enormes inversiones y esfuerzo que implica la ejecución de este tipo de obras, bien vale la pena prevenir gastando un poco más al principio, que construir plantas de tratamiento de aguas residuales que representen inversiones inútiles, debido a grandes costos de operación, fracasos técnicos y el desaliento y reclamo general de la sociedad a la que se pretende beneficiar.

### **3.6. Costos de Inversión Inicial y, Costos de Operación y Mantenimiento en México.**

Los costos presentados en este trabajo, fueron elaborados por Tecnoadecuación Ambiental S.A., basándose en los programas CAPDET y ADA-plantas de la Comisión Nacional del Agua y ECO Ingeniería S.A., respectivamente. Resulta importante agregar que la estimación de los costos fué realizada en Diciembre de 1992<sup>(56)</sup> .

CAUDAL (l/seg)	AREA REQUERIDA (m <sup>2</sup> )	COSTO INVERSION INICIAL ( MILES \$ )	COSTO OPERACION Y MANTENIMIENTO ( MILES \$ )	EFICIENCIA REMOCION DBO <sub>5</sub> ( % )	CARGA ORGANICA ( DBO <sub>5</sub> mg/l )	
					INFLUENTE (kg)	EFLUENTE (kg)
1.0 - 4.0	400	741 - 645	70.2 - 74.4	90 - 95	250	25
5.0 - 7.5	600	645 - 1315	67.3 - 116.4	90 - 95	250	25
7.5 - 15.0	800	1315 - 2093	116.4 - 185.2	90 - 95	250	25
15.0 - 30.0	1,200	2093 - 3330	195.2 - 294.7	90 - 95	250	25
30.0 - 50.0	4,440	3330 - 4489	294.7 - 415.0	90 - 95	250	25
50.0 - 75.0	7,800	4489 - 6152	415.0 - 544.3	90 - 95	250	25
75.0 - 100.0	9,000	6152 - 7460	544.3 - 668.2	90 - 95	250	25
100.0 - 150.0	10,400	7460 - 9709	668.2 - 866.3	90 - 95	250	25
150.0 - 200.0	11,200	9709 - 11870	866.3 - 1050.5	90 - 95	250	25
200.0 - 300.0	12,000	11870 - 15575	1050.5 - 1370.4	90 - 95	250	25
300.0 - 400.0	13,000	15575 - 19886	1370.4 - 1671.4	90 - 95	250	25
400.0 - 500.0	21,000	19886 - 21931	1671.4 - 1940.9	90 - 95	250	25

Tabla 3.1 Costos para un proceso básico de lodos activados.

CAUDAL (l/seg)	AREA REQUERIDA (m <sup>2</sup> )	COSTO INVERSION INICIAL ( MILES ₱ )	COSTO OPERACION Y MANTENIMIENTO ( MILES ₱ )	EFICIENCIA REMOCION DBO <sub>5</sub> ( % )	CARGA ORGANICA (DB <sub>5</sub> ) mg/l	
					INFLUENTE (%)	EFLUENTE (%)
1.0 - 4.0	415	383 - 965	14.9 - 37.5	80 - 90	250	50
7.0 - 7.5	620	1120 - 1467	43.5 - 57.0	80 - 90	250	50
7.5 - 15.0	830	1467 - 2329	57.0 - 90.4	80 - 90	250	50
15.0 - 30.0	1,960	2329 - 3698	90.4 - 143.6	80 - 90	250	50
30.0 - 50.0	4,540	3698 - 5198	143.6 - 201.0	80 - 90	250	50
50.0 - 75.0	8,040	5198 - 6811	201.0 - 264.4	80 - 90	250	50
75.0 - 100.0	9,360	6811 - 8251	264.4 - 320.3	80 - 90	250	50
100.0 - 150.0	10,720	8251 - 10813	320.3 - 419.8	80 - 90	250	50
150.0 - 200.0	11,400	10813 - 13090	419.8 - 508.5	80 - 90	250	50
200.0 - 300.0	12,400	13098 - 17164	508.5 - 666.4	80 - 90	250	50
300.0 - 400.0	13,400	17164 - 20722	666.4 - 807.2	80 - 90	250	50
400.0 - 500.0	21,700	20722 - 24127	807.2 - 936.7	80 - 90	250	50

Tabla 3.2 Costos para un proceso básico de filtro percolador.

CAUDAL (l/seg)	AREA REQUERIDA (m <sup>2</sup> )	COSTO INVERSION INICIAL ( MILES N\$ )	COSTO OPERACION Y MANTENIMIENTO ( MILES N\$ )	EFICIENCIA REMOCION DBO <sub>5</sub> ( % )	CARGA ORGANICA (DBO <sub>5</sub> mg/l)	
					INFLUENTE (kg)	EFLUENTE (kg)
1.0 - 4.0	390	421 - 1061	15.0 - 37.0	90 - 95	250	25
5.0 - 7.5	580	1231 - 1613	43.0 - 57.4	90 - 95	250	25
7.5 - 15.0	700	1613 - 2561	57.4 - 91.2	90 - 95	250	25
15.0 - 30.0	1,040	2561 - 4065	91.2 - 144.7	90 - 95	250	25
30.0 - 50.0	4,230	4065 - 5714	144.7 - 203.4	90 - 95	250	25
50.0 - 75.0	7,540	5714 - 7407	203.4 - 266.5	90 - 95	250	25
75.0 - 100.0	0,700	7407 - 9070	266.5 - 322.9	90 - 95	250	25
100.0 - 150.0	10,100	9070 - 11895	322.5 - 423.1	90 - 95	250	25
150.0 - 200.0	10,900	11895 - 14398	423.1 - 512.6	90 - 95	250	25
200.0 - 300.0	11,600	14398 - 18067	512.6 - 671.7	90 - 95	250	25
300.0 - 400.0	12,555	18067 - 22055	671.1 - 813.7	90 - 95	250	25
400.0 - 500.0	20,300	22055 - 26521	813.7 - 944.2	90 - 95	250	25

Tabla 3.3 Costos para un proceso básico de biodiscos.

CAUDAL (l/seg)	AREA REQUERIDA (m <sup>2</sup> )	COSTO INVERSION INICIAL ( MILES N\$ )	COSTO OPERACION Y MANTENIMIENTO ( MILES N\$ )	EFICIENCIA REMOCION DBO <sub>5</sub> ( % )	CARGA ORGANICA (DBO <sub>5</sub> mg/l)	
					INFLUENTE (%)	EFLUENTE (%)
1.0 - 4.0	3.185	313 - 788	22.6 - 57.0	90 - 95	250	25
5.0 - 7.5	4.776	914 - 1198	64.1 - 86.7	90 - 95	250	25
7.5 - 15.0	6.367	1198 - 1900	86.7 - 137.3	90 - 95	250	25
15.0 - 30.0	13.122	1900 - 3018	137.3 - 218.3	90 - 95	250	25
30.0 - 50.0	35.018	3018 - 4241	218.3 - 306.7	90 - 95	250	25
50.0 - 75.0	62.077	4241 - 5558	306.7 - 402.0	90 - 95	250	25
75.0 - 100.0	71.628	5558 - 6713	402.0 - 487.0	90 - 95	250	25
100.0 - 150.0	83.770	6713 - 8823	487.0 - 638.0	90 - 95	250	25
150.0 - 200.0	89.137	8823 - 10687	638.0 - 773.0	90 - 95	250	25
200.0 - 300.0	95.504	10687 - 14004	773.0 - 1012.8	90 - 95	250	25
300.0 - 400.0	103.462	14004 - 16965	1012.8 - 1227.0	90 - 95	250	25
400.0 - 500.0	167.130	16965 - 19687	1227.0 - 1424.0	90 - 95	250	25

Tabla 3.4 Costos para un proceso básico de zanjas de oxidación.

CAUDAL (l/seg)	AREA REQUERIDA (m <sup>2</sup> )	COSTO INVERSION INICIAL ( MILES NS )	COSTO OPERACION Y MANTENIMIENTO ( MILES NS )	EFICIENCIA REMOCION DBO <sub>5</sub> ( % )	CARGA ORGANICA (DBO) mg/l	
					INFLUENTE (%)	EFLUENTE (%)
1.0 - 4.0	32.740	303 - 764	4.3 - 10.0	60 - 70	250	100
5.0 - 7.5	49.110	886 - 1161	12.6 - 16.3	60 - 70	250	100
7.5 - 15.0	63.483	1161 - 1043	16.3 - 26.2	60 - 70	250	100
15.0 - 30.0	153.520	1843 - 2925	26.2 - 41.5	60 - 70	250	100
30.0 - 50.0	260.150	2925 - 4112	41.5 - 58.4	60 - 70	250	100
50.0 - 75.0	438.450	4112 - 5389	58.4 - 76.5	60 - 70	250	100
75.0 - 100.0	736.670	5389 - 6528	76.5 - 92.7	60 - 70	250	100
100.0 - 150.0	831.260	6328 - 8554	92.7 - 121.5	60 - 70	250	100
150.0 - 200.0	916.740	8554 - 10363	121.5 - 147.1	60 - 70	250	100
200.0 - 300.0	983.220	10363 - 13579	147.1 - 192.8	60 - 70	250	100
300.0 - 400.0	1.064.069	13579 - 16449	192.8 - 233.6	60 - 70	250	100
400.0 - 500.0	1.710.800	16449 - 19088	233.6 - 271.0	60 - 70	250	100

Tabla 3.5 Costos para un proceso básico de lagunas de oxidación.

CAPITAL (1/acre)	AREA REQUERIDA (m <sup>2</sup> )	COSTO INVERSION INICIAL (MILES NQ)		COSTO OPERACION Y MANTENIMIENTO (MILES NQ)		EFICIENCIA REMOCION DBO <sub>5</sub> (%)		CARGA ORGANICA CUBIERTA (kg/acre/dia)	
		MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
1.0	4.0	322	812	27.2	60.6	85	95	150	50
3.0	13.3	942	2334	77.6	169.3	85	95	150	50
7.5	33.0	2350	5859	194.3	425.5	85	95	150	50
15.0	66.0	4710	11699	388.5	850.9	85	95	150	50
30.0	132.0	9420	23398	777.0	1701.8	85	95	150	50
75.0	330.0	23550	58495	1942.5	4254.5	85	95	150	50
150.0	660.0	47100	116990	3885.0	8509.0	85	95	150	50
300.0	1320.0	94200	233980	7770.0	17018.0	85	95	150	50
750.0	3300.0	235500	584950	19425.0	42545.0	85	95	150	50
1500.0	6600.0	471000	1169900	38850.0	85090.0	85	95	150	50
3000.0	13200.0	942000	2339800	77700.0	170180.0	85	95	150	50
4000.0	5000.0	1240000	3020000	103700.0	221300.0	85	95	250	50

Tabla 3.6 Costos para un proceso básico de lagunas aeradas.

CAUDAL (l/seg)	AREA REQUERIDA (m <sup>2</sup> )	COSTO INVERSION INICIAL ( MILES \$ )	COSTO OPERACION Y MANTENIMIENTO ( MILES \$ )	EFICIENCIA REMOCION DBO <sub>5</sub> ( % )	CARGA ORGANICA ( DBO <sub>5</sub> mg/l )	
					INFLUENTE ( % )	EFLUENTE ( % )
1.0 - 4.0	410	375 - 945	30.2 - 76.1	90 - 95	250	25
5.0 - 7.5	610	1097 - 1437	80.3 - 113.7	90 - 95	250	25
7.5 - 15.0	815	1437 - 2281	113.7 - 183.4	90 - 95	250	25
15.0 - 30.0	1.925	2281 - 3621	183.6 - 291.5	90 - 95	250	25
30.0 - 50.0	4.460	3621 - 5090	291.5 - 409.7	90 - 95	250	25
50.0 - 75.0	7.905	5090 - 6569	409.7 - 536.9	90 - 95	250	25
75.0 - 100.0	9.120	6569 - 8079	536.9 - 650.4	90 - 95	250	25
100.0 - 150.0	10.540	8079 - 10587	650.4 - 852.2	90 - 95	250	25
150.0 - 200.0	11.350	10587 - 12825	852.2 - 1032.4	90 - 95	250	25
200.0 - 300.0	12.160	12825 - 16085	1032.4 - 1352.8	90 - 95	250	25
300.0 - 400.0	13.175	16085 - 20350	1352.8 - 1638.8	90 - 95	250	25
400.0 - 500.0	21.280	20350 - 23624	1638.8 - 1901.7	90 - 95	250	25

Tabla 3.7 Costos para un proceso básico de aeración extendida.

### 3.7. Análisis Costo - Beneficio<sup>(49, 57, 58, 59)</sup> .

El análisis costo - beneficio, es un procedimiento que permite evaluar la conveniencia de un proyecto poniendo en la balanza los beneficios contra los costos.

La relación que permite o ayuda a decidir, sobre la salud económica de un proyecto; se conoce como Relación Costo / Beneficio, y puede expresarse como:

$$CB_{(i)} = \text{Beneficios Equivalentes} / \text{Costos Equivalentes}$$

donde:

**Beneficios:** Ventajas - desventajas, para el usuario.

**Costos:** Todos los desembolsos.

Para que un proyecto se considere sano, los beneficios deben exceder sus costos; es decir, la relación entre los beneficios y los costos debe ser mayor que la unidad.

Las actividades públicas generan una variedad tal de beneficios, que muchas veces es imposible valorarlos en términos monetarios. Entre los proyectos públicos se encuentran: construcción de carreteras, presas, parques, tratamiento de aguas residuales y purificación del aire.

La estimación de los beneficios de los proyectos de aguas han sido a menudo un tema de gran controversia, porque hay dificultades en dar una medida tangible, del efecto que puede tener este tipo de proyecto en la vida cotidiana.

Algunos de los beneficios que se generan al construir una planta de tratamiento de aguas residuales son los siguientes:

- Protección al medio ambiente.
- Aumento en la producción agrícola.
- Reducción de la dependencia de suministro externo de agua.
- Ahorros en el costo de la compra de agua de alta calidad.
- Prevenir la diseminación de enfermedades hídricas.
- Fuente de trabajo.

### FIGURA 3.1. AREA REQUERIDA

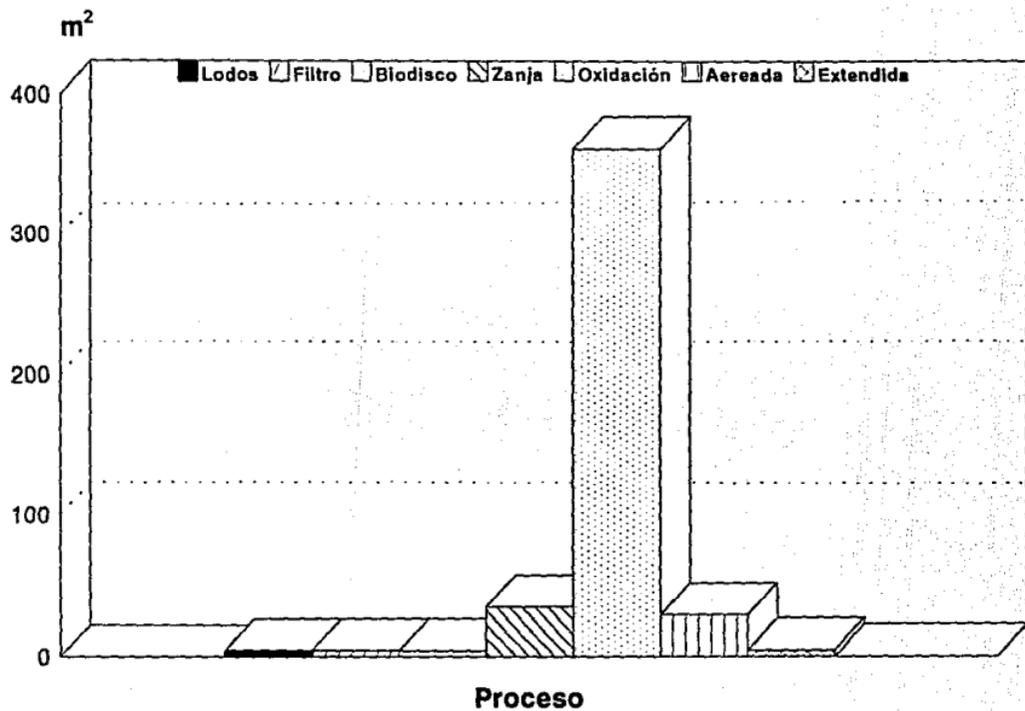
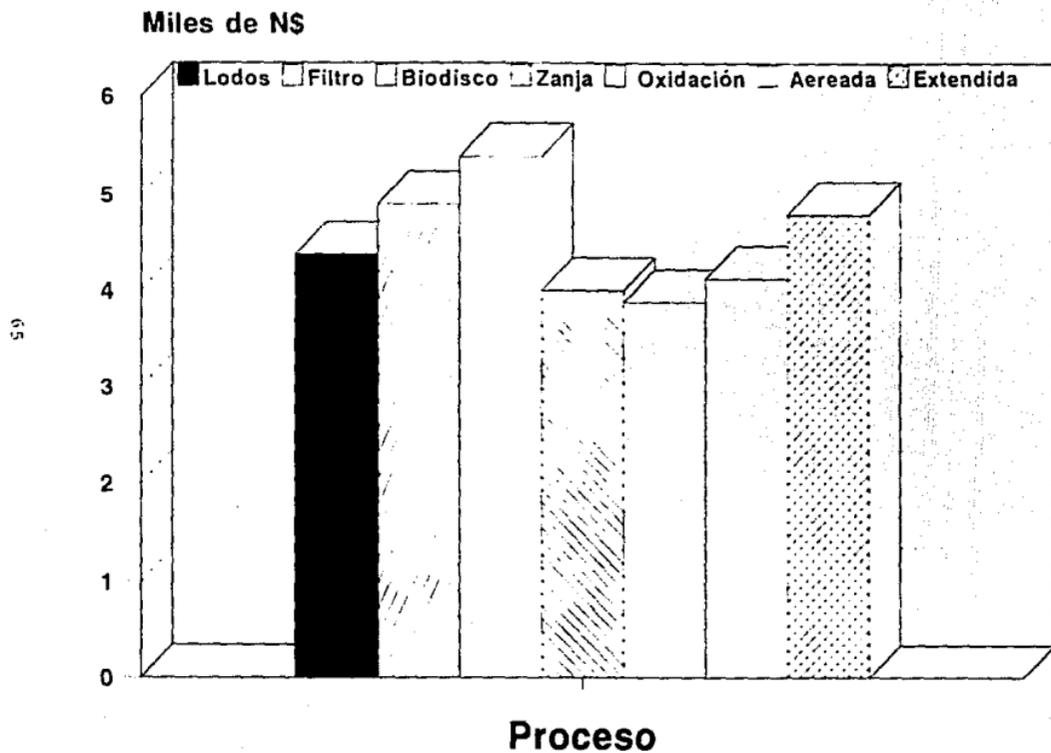
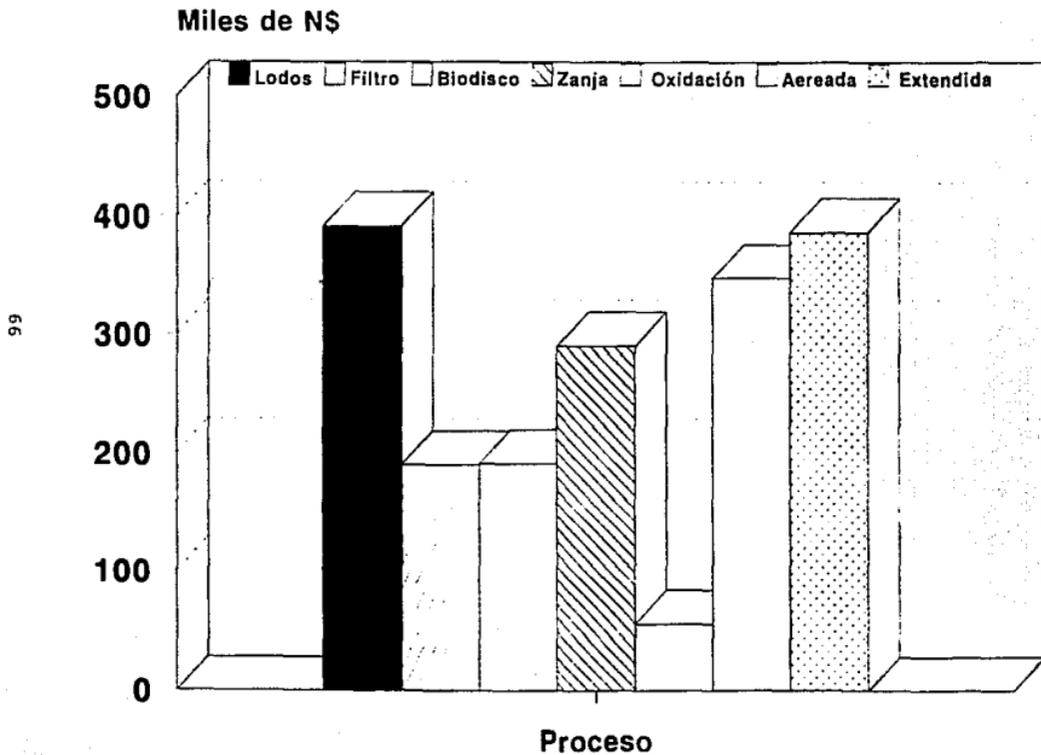


FIGURA 3.2. COSTO DE INVERSION



**FIGURA 3.3. COSTO DE OPERACION Y MANTENIMIENTO**



### 3.8. Análisis Comparativo de Procesos Aerobicos.

El análisis que se presenta a continuación, de los siete procesos aerobicos; es un estudio comparativo de dichos procesos, en términos de los parámetros que representan los costos de la inversión inicial, de operación y mantenimiento, área requerida y eficiencia; para un gasto de 60l/s.

En la Figura 3.1. se presenta el área mínima necesaria para la implementación de siete procesos aerobicos, para un gasto de 60l/s. Es claro que el proceso de lagunas de oxidación requiere una superficie mucho mayor que la requerida por cualquier otro proceso (361,021m<sup>2</sup> vs. 4,274m<sup>2</sup>, de lagunas de oxidación vs. biodiscos, respectivamente).

Una comparación entre un proceso de filtro percolador y un proceso de lodos activados, permite evidenciar que; el proceso de filtro percolador tiene un área de terreno ligeramente mayor (3% más) que un proceso de lodos activados ( 4,554m<sup>2</sup> vs. 4,415m<sup>2</sup> ). Los costos de inversión inicial de los procesos de filtros percoladores tienden a ser altos, pero el costo de operación tiende a ser bajo, debido a que su consumo de energía es relativamente baja, comparados con los procesos de lodos activados. Estos procesos de lodos activados se consideran como más sensibles a las cargas de choque y son menos estables en operación, lo que requiere un control más preciso del proceso. Los percoladores tienen la reputación de estabilidad de operación, simplicidad de diseño y facilidad de operación, pero es difícil pronosticar su funcionamiento. Se ha demostrado que los percoladores son menos efectivos en la eliminación de organismos causantes de enfermedades en el tratamiento convencional de aguas negras, que los procesos de lodos activados, por lo tanto, en la selección de un proceso determinado se debe especificar muy bien el objetivo principal. En las tablas 3.1 y 3.2, se puede apreciar que el proceso de fitro percolador tiene una eficiencia de 80 - 90% y, el proceso de lodos activados tiene una eficiencia de remoción de DBO del 90 - 95%.

Comparando un proceso de biodisco con un proceso de filtro percolador; el biodisco requiere aproximadamente un 8% menos de área de terreno que un filtro percolador. Como se puede observar en la Figura 3.2., el proceso de biodisco tiene aproximadamente un 10% más en el costo de inversión inicial que un proceso de filtro percolador. Entre las características más importantes de un proceso de biodiscos tenemos: capacidad de acomodar cargas de choque, corto tiempo de retención, bajos requerimientos de energía, no necesita las canalizaciones a las que son susceptibles los percoladores convencionales, baja producción de lodos y excelente control del proceso. Sin embargo, se tiene que los cojinetes y las unidades de impulsión requieren frecuentemente mantenimiento. El costo de operación de ambos procesos es casi similar (Figura 3.3.). La eficiencia para un proceso de biodiscos es de 90 - 95% y, de un 80 - 90 % para un filtro percolador.

En la Figura 3.2., se puede notar que un proceso de biodisco requiere una mayor inversión inicial que un proceso de lagunas de oxidación. El proceso más popular en tratamiento de aguas residuales es el de lagunas de oxidación, debido a sus bajos costos de operación, y que ofrece una ventaja financiera significativa sobre los otros procesos. Sin embargo, el proceso de lagunas de oxidación tiene una eficiencia de remoción de la carga orgánica de un 60 - 70% (ver Tabla 3.7). Si se pretendiera implementar una laguna de oxidación en la FES - Cuautitlán, Campo 4, se requerirá un área de 36.10ha, que equivale al 55% del área total que se dedica al cultivo e investigación en la Unidad Académica de Enseñanza Agropecuaria de FES - Cuautitlán.

Otro de los procesos, que requiere costos de inversión y de operación bajos, es el de zanjas de oxidación. Los costos de inversión inicial y de operación de un proceso de zanjas de oxidación representan una fracción de los costos de una planta convencional de lodos activados. Se puede considerar el costo de inversión inicial de zanja de oxidación como de un 30-40% más bajo que el de un proceso de lodos activados. Las ventajas que tiene el proceso de zanjas de oxidación, es la de no requerir, en general, sedimentación primaria, y la de permitir mediante largos tiempos de retención celular, la estabilización de los lodos, los cuales no requieren de procesos de digestión previos a su disposición final. Sin embargo, requiere

un área de terreno grande, comparandolo con los otros procesos, excepto el proceso de laguna de oxidación.

Realizando una comparación del proceso de aeración extendida y lodos activados, tenemos que: un proceso de aeración extendida requiere aproximadamente 2% más de área de terreno que un proceso de lodos activados, como se aprecia en la Figura 3.2. La principal característica de la aeración extendida, es que opera con tiempos de retención celular prolongados, normalmente entre 15 y 20 días, lo que provoca que los lodos generados en plantas de este tipo, estén prácticamente estabilizados, disminuyendo así los problemas de disposición final. Sin embargo, se ha identificado un mayor costo de operación y mantenimiento debido a los sistemas de transferencia de oxígeno. El proceso de lodos activados tiene un costo inicial más bajo que un proceso de aeración extendida (4,364 miles de N\$ y 4,786 miles de N\$, respectivamente), y los costos de operación de ambos procesos son similares, y son los más altos de los siete procesos aeróbicos estudiados en este trabajo. Ambos procesos tienen una eficiencia del 90 - 95%.

Comparando un proceso de lagunas aereadas con un proceso de lodos activados, una laguna aereada requiere de una mayor superficie de terreno para su implementación, que un proceso de lodos activados (29,499m<sup>2</sup> vs. 4,415m<sup>2</sup>). La ventaja de una laguna aereada es de no requerir estructuras costosas para sedimentación, equipos para recirculación de lodos lo que permite que generalmente los tanques de areación se formen con muros de tierra compactada, por lo que su costo de inversión inicial, es menor que el de un proceso de lodos activados. Sin embargo, el aspecto negativo de este proceso estriba en el alto consumo de energía necesaria para mantener en suspensión a los flóculos biológicos, en tanques de estas proporciones, lo cual se ve reflejado en los costos de operación y mantenimiento (348 miles de N\$ vs 391 miles de N\$). El proceso de lagunas aereadas tiene una eficiencia de 80 - 90%.

De acuerdo a las tablas de relación de costos, dadas por la D.G.C.O.H, los datos acarrear una carga orgánica de 250 mg/l, esto quiere decir que, si la calidad del agua varía de 250 mg/l, también varía el costo del proceso de tratamiento.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es claro que por tratarse de un estudio técnico - económico en su primera etapa, es conveniente proponer aquellos procesos que resultan atractivos de acuerdo a las restricciones primarias del estudio: eficiencia, costos de los procesos investigados y el área que pudiera estar disponible para la instalación del sistema de tratamiento de aguas residuales. En este sentido, los procesos que resultan atractivos en esta etapa y que deberán investigarse cuidadosamente en una etapa de evaluación posterior son los siguientes: aeración extendida, biodiscos, filtro percolador y lodos activados. Sin embargo, a fuerza de ser concluyentes el orden que pudiera esperar que fuesen eficientes es: Biodisco, aeración extendida, lodos activados y filtro percolador.

Se sugiere que en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, se haga investigación en relación con los procesos ya mencionados a nivel piloto, para poder definir claramente cual es el proceso indicado para que posteriormente se realice el proceso a gran escala, en beneficio de la comunidad.

En el futuro se pueden utilizar los datos de costos que se presentan en este trabajo pero debidamente ajustados mediante índices de precios adecuados.

Aunque parezca redundante, es conveniente enfatizar que la investigación, diseño, construcción y operación de este tipo de proyectos, deben ser realizados por profesionales especializados en este campo, como lo demuestra el hecho de existir carreras y postgrados en ingeniería ambiental.

## **BIBLIOGRAFIA**

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- Athié Lambarri, Mauricio. **Calidad y Cantidad del Agua en México.** Editorial Universo Veintiuno, México, 1989. pp. 71-77, 115, 123.
- 2.- Baca Urbina, G.. **Evaluación de Proyectos. Análisis y Administración de Riesgos.** Segunda edición, Editorial Mc Graw Hill, pp. 165 - 181, México, D.F., 1990.
- 3.- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. **Boletín Hidrológico 32. Datos del Valle de México.** México, D.F., 1987.
- 4.- Entrevista personal con el M. en C. Ricardo Cázarez G. de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán.
- 5.- Entrevista personal con el Ing. Agrícola Miguel Angel Farías Ocaña de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán.
- 6.- Quadri de la Torre, Gabriel. **Aguas Residuales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Impactos y Perspectivas.** Fundación Friedrich Ebert, México, D. F., 1988.
- 7.- Cortés, M.J.. **Plantas de tratamiento de Aguas Residuales.** Ingeniería Ambiental, Vol. 5, No. 14, pp. 19 - 23, México, D.F., 1992.
- 8.- Benitez Eslava, Edgar Ulises. **Perspectivas de la Construcción de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.** Tesis DEPEFI - UNAM., México, 1992.
- 9.- Hardenbergh y Rodie. **Ingeniería Sanitaria.** Primera edición, Editorial CECOSA, pp. 789, 791, 795 - 801, México, D.F., 1975.
- 10.- Alvarez Rosas, José. **Criterios Propuestos para el Uso y Manejo de las Aguas Residuales en la Agricultura.** Memorias del VI Congreso Nacional de Sanamiento Ambiental, Queretaro Qro., México, 1988.

- 11.- **Ramírez González, Antonio. Criterios Técnico - Sanitarios para el Aprovechamiento de Aguas Residuales en el Riego Agrícola.** Memorias del VI Congreso Nacional de Sanamiento Ambiental, Queretaro Qro., México, 1988.
- 12.- **Tejeda González, Carlos. El Riego con Aguas Residuales en México. Efectos en la Salud y Propuestas de Soluciones Técnicas.** Ingeniería Ambiental, Vol. 4, No. 10, pp. 5 - 15, México, D.F., 1991.
- 13.- **Gamrasni, M. A.. Aprovechamiento Agrícola de Aguas Negras Urbanas.** Primera edición, Editorial Limusa, pp. 7 - 15, México, D.F., 1988.
- 14.- **Middlebrooks, E. J.. Water Reuse.** Primera edición, Editorial Ann Arbor Science Publishes, pp. 137 - 151, U.S.A., 1982.
- 15.- **ECO Ingeniería. Evaluación del impacto Ambiental del Transporte y Uso de las Aguas Residuales del A.M.V.M. en la Agricultura.** pp. 155. México, D.F., 1980.
- 16.- **Kandeiah, A.. Water Quality in Food Production.** Water Quality Bulletin. Vol. 2, No. 1. Canada, 1987.
- 17.- **EPA. Water Quality Criteria.** Environ Protection Agency. pp. 323. U.S.A., 1972.
- 18.- **Bower and Chaney. Land Treatment of Wastewater.** Advances in Agronomy. Editorial Academic Press. Vol. 4, pp. 133 - 169. U.S.A., 1974.
- 19.- **Wasserman et al.. Health Aspects of Agricultural Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater.** pp. 551 - 560. Water Forum '81. San Francisco, Calif., 1981.
- 20.- **Loer R.C.. Preapplication Strategies for Wastewater Irrigation Systems.** Vol. 1, pp. 120 - 132. International Symposium of State Knowledge. Land Treatment of Wastewater. Hanover, New Hampshire, 1978.

21.- Engelberg Report. **Health Aspects of Wastewater and Excreta Use in Agriculture and Aquaculture.** pp. 35. World Bank/World Health Organization. U.S.A., 1985.

22.- D'itri, M.F.. **Municipal Wastewater in Agriculture.** Primera edición, Editorial Academic Press, pp. 492. London, England, 1981.

23.- Rajagopal, L. et al.. **Land Application of Sewage Sludge the Status.** Environmental Sanitation Reviews, No. 213, pp.60. U.S.A., 1981.

24.- Page, A.L.; Gleason, L.T.; et. al.. **Utilization of Municipal Wastewater and Sludge on Land.** pp. 700. U.S. EPA - University of California Riverside, C.A., 1983.

25.- Richards, L.A.. **Diagnóstico y Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos.** Sexta edición, Editorial Limusa, pp.125. México, D.F., 1973.

26.- Gallegos, G.R.. **Determinación de Residuos y Detergentes en Aguas de Riego.** Tesis Facultad de Ciencias U.N.A.M.. pp. 85. México, D.F., 1985.

27.- Instituto de Ingeniería. **Evaluación de los Estudios sobre ABS y LAS y los Efectos en la Agricultura y la Fauna.** pp. 60. U.N.A.M.. México, D.F., 1971.

28.- SARH - Instituto de Ingeniería. **Estudio del Impacto de los Detergentes en el Recurso Hidráulico.** Segunda y Tercera Etapa U.N.A.M.. pp. 60. México, D.F., 1973 - 1974.

29.- Rodríguez, G.S.. **Remoción de Grasas y Aceites en Distritos Regionales para el Control de la Contaminación del Agua.** Tesis DEPMI- U.N.A.M.. pp. 85. México, D.F., 1980.

30.- Braude, G.L. and Ralston, B.. **Use of Wastewater on Land - Food Chain Concerns.** International Symposium of State Knowledge, Land Treatment Wastewater. Vol. 47, pp. 57. Hanover New, Hampshire, 1978.

- 31- Orta, L.T.. **Crterios para el Aprovechamiento de Aguas Residuales en Mxico.** Tesis DEPTI - U.N.A.M.. pp. 127. Mxico, D.F., 1985.
- 32.- Garca, O. y Castillo, Y.. **Manual para la clasificacin de las Aguas para Riego Agrcola.** SARH. pp. 75. Mxico, D.F., 1981.
- 33.- Water Pollution Control Federation. **Operation of Wastewater treatment Plants ( a manual of practice ).**Primera edicin, Editorial Lancaster Press, pp. 13 - 15, USA, 1976.
- 34.- Harold. E Babbitt, Bauman Rober. **Alcantarillado y Tratamiento de Aguas Negras.** Quinta impresin, Editorial CECSA, pp. 789, 791, 795, 801. Mxico, D.F., 1975.
- 35.- Weber, Walter J.. **Control de la Calidad del Agua. Procesos Fiscoqumicos.** Primera edicin, Editorial Revert. Espaa, 1980.
- 36.- Winkler, Michael. **Tratamiento Biolgico de Aguas de Desecho.** Primera edicin, Editorial Limusa. Mxico, D.F., 1986.
- 37.- Atkinson, B.. **Reactores Bioqumicos.** Primera edicin, Editorial Revert. Espaa, 1986.
- 38.- Metcalf - Eddy. **Tratamiento y Depuracin de Aguas Residuales.** Primera edicin, Editorial Labor, pp. 391 - 441. Espaa, 1977.
- 39.- Jonguitud, Falcon Vicente. **Modulo III Tratamiento Aerobio de Aguas Residuales.** Primer Diplomado Internacional de Qumica Ambiental del Agua. Mxico, D.F., 1991.
- 40.- Irvine, Robert L.. **Sequencing batch Biological Reactors an Overview.** Journal Water Pollution Control. Vol. 51, No. 2, pp. 235 - 243. University of Notre Dame, Indiana, 1979.

- 41.- Ailken, Michael; Phillip, E. Heck; Mines, Richard O.; Sherrad, Joseph. **Activated Sludge**. Research Journal WPCF. Vol. 63, No. 4, pp. 376 - 384. U.S.A., 1991.
- 42.- Junkiins, Randy; Deeny, Kevin; Echhoff, Thomas. **The Activated Sludge Process. Fundamentals of Operation**. Primera edición, Editorial Ann Arbor Science Publisher, pp. 23 - 31. U.S.A., 1983.
- 43.- Teran Flores, Rodolfo Guillermo. **Investigación Bibliografica de los Discos Biológicos Rotatorios como Sistema de Tratamiento Secundario para las Aguas Residuales Domésticas**. Tesis DEPEFI - UNAM, 1980.
- 44.- Ramalho, R.S.. **Introduction to Wastewater Treatment Processes**. Primera edición, Editorial Academic Press, pp. 238 - 240. U.S.A., 1977.
- 45.- Hammer, Markk J.. **Water and Wastewater Technology**. Segunda edición, Editorial John Wiley and Sons, pp. 411 - 418, 423, 425. U.S.A., 1986.
- 46.- Goronszy. **Intermittent Operation of the Extended Aeration Process for Small Systems**. Journal Water Pollution Control. Vol. 51, No. 2, pp. 274 - 287. Indiana, U.S.A., 1979.
- 47.- Ketchum and Lia O.. **Tertiary Chemical Treatment for Phosphorus Reduction Using Sequencing Batch Reactors**. Journal Water Pollution Control. Vol. 51, No. 2, pp. 298 - 304. Indiana, U.S.A., 1979.
- 48.- Schulz, Christopher y Okun, Daniel. **Tratamiento de Aguas Superficiales para Países en Desarrollo**. Primera edición, Editorial Noriega Limusa. México, D.F., 1990.
- 49.- Thuesen, H.G.. **Ingeniería Económica**. Quinta edición, Editorial Prentice Hall. Hispanoamericana. México, D.F., 1986.
- 50.- Sanks Robert, L.. **Water Treatment Plant Design**. Primera edición, Editorial Ann Arbor Science, pp. 763 - 799. U.S.A., 1980.

51.- American Society of Civil Engineer. American Water Works Association. **Water Treatment Plant Design**. Segunda edición, editorial Mc Graw - Hill, pp. 453. U.S.A., 1990.

52.- Fair, Geyer y Okun. **Abastecimiento de Agua y Remoción de Aguas Residuales**. Primera edición, Editorial Noriega Limusa. México, D.F., 1990.

53.- Gaynor, W. Dawson. **Hazardous Waste Management**. Primera edición, Editorial John Wiley and Sons, pp. 356 - 360. U.S.A., 1986.

54.- Sewer, Charges. For Wastewater Colletion and Treatment. A. SURVEY. Pollution Control Federation. pp. 45 - 46. U.S.A., 1982.

55.- Murillo, F.R.. **Recomendaciones para la Obra Civil de Plantas de Tratamiento**. Memorias del VII Congreso Nacional. La Ingeniería Ambiental y la Salud. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Septiembre, México, 1990.

56.- Entrevista Personal con el Ing. Juan Carlos Guasch Saunders Jefe de U. Dep. de Proyectos de Tratamiento y Reuso de la DGCOH.

57.- Franzini, Joseph B.. **Water Resorces and Enviromental Engineering**. Tercera edición, Editorial Mc Graw Hill, pp. 354 - 370. U.S.A., 1979.

58.- Secretaría de Recursos Hidráulicos. **Metodología para la Presentación y Evaluación de Proyectos Integrados de Desarrollo Rural**. México, D.F., 1988.

59.- Riggs, James L.. **Ingeniería Económica**. Primera edición, Editorial Alfa Omega, pp. 270 - 273, 468 - 499. México, D.F., 1990.