



01146 1
2oj

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
Facultad de Ingeniería

"PERSPECTIVAS DE LA CONSTRUCCION DE PLANTAS DE TRATAMIENTO
DE AGUAS RESIDUALES EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA
CIUDAD DE MEXICO"

POR:

Edgardo Ulises Benítez Eslava

T E S I S

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

PRESENTADA A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO DE LA

FACULTAD DE INGENIERIA
DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERIA
(CONSTRUCCION)

CIUDAD UNIVERSITARIA
JUNIO DE 1992.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis 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.

"Perspectivas de la Construcción de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM)".

INDICE

Introducción.

1.	El Potencial de Tratamiento de las Aguas Residuales en la República Mexicana.	
1.1	La problemática del uso del agua en México.....	1
1.1.1	El Desarrollo Poblacional.....	2
1.1.2	La Generación de las Aguas Residuales.....	3
1.1.3	Infraestructura del Servicio de Agua Potable, Alcantarillado y Tratamiento.....	4
1.1.4	Los Recursos Humanos.....	6
1.1.5	El Reúso de Aguas Residuales.....	7
1.2	Ciclo Hidrológico del Valle de México.....	8
1.2.1	Ingreso de agua al valle de México.....	9
1.2.1.1	Precipitación pluvial.....	9
1.2.1.2	Flujo superficial.....	12
1.2.1.3	Importación de Agua de Cuencas externas al Valle de México.....	14
1.2.1.4	Agua bombeada proveniente de mantos acuíferos.....	15
1.2.2	Consumo de Agua Potable en la Cuenca del Valle de México.....	16
1.2.3	Egreso de agua del Valle de México.....	19
1.2.4	Tratamiento y Reúso actual en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.....	26
1.2.5	Tarifas de Agua en el Distrito Federal y los Municipios Metropolitanos.....	28
2.	Contaminación de las Aguas.	
2.1	Diferentes mecanismos de contaminación de las Aguas...	31
2.2	Calidad de las aguas residuales.....	33
2.2.1	Origen de las aguas residuales.....	34
2.2.2	Impurezas en el agua y su importancia.....	35
3.	Acciones para la reutilización del Agua Residual (AR).	
3.1	Industria.....	45
3.2	Acciones para el reúso del agua en la Industria.....	48
3.3	Agricultura.....	50
3.4	Sistemas de intercambio de agua tratada a nivel agrícola.....	51
3.5	Recarga de Acuíferos.....	53
3.6	Sistemas para la Utilización de las Aguas Pluviales...	55
3.6.1	Configuración de un Sistema para Manejo de Agua Pluvial.....	58
3.6.2	Financiamiento para Sistemas de Agua Pluvial.....	60
3.7	Programa del Uso Eficiente del Agua en la Ciudad de México (PUEDA).....	63

3.7.1	Acciones a nivel sistema.....	64
3.7.2	Acciones a nivel usuario.....	66
3.8	Otros usos para el Agua Renovada.....	67

4. Tratamiento de las Aguas Residuales.

4.1	Pretratamiento.....	69
4.1.1	Medición del gasto.....	69
4.1.2	Rejas, Tamices y Trituradores.....	71
4.1.3	Desarenadores.....	72
4.1.4	Tanques separadores de grasas y aceites.....	73
4.2	Tratamiento Primario.....	73
4.2.1	Sedimentación.....	73
4.2.2	Tanques Imhoff.....	75
4.2.3	Tanques de Flotación.....	76
4.2.4	Neutralización.....	77
4.3	Tratamiento Secundario.....	78
4.3.1	Procesos Aerobios.....	81
4.3.2	Procesos Anaerobios.....	91
4.4	Tratamiento Terciario o Avanzado.....	92
4.4.1	Remoción de Fósforo.....	93
4.4.2	Remoción de Nitrógeno.....	95
4.4.3	Remoción de Sólidos Suspendidos.....	95
4.4.4	Remoción de Materia Orgánica Soluble.....	95
4.4.5	Remoción de Sólidos Disueltos.....	97
4.4.6	Remoción de Organismos Patógenos.....	98

5. Criterios Generales y Constructivos para Optimizar el Costo del Agua Renovada.

5.1	Esquema General de Implantación de una Planta de Tratamiento de Agua Residual.....	102
5.1.1	Planeación.....	102
5.1.2	Diseño.....	103
5.1.3	Construcción.....	103
5.1.4	Operación y Mantenimiento.....	103
5.1.5	Abandono.....	104
5.2	Localización de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.....	104
5.3	Recomendaciones para la obra civil de Plantas de Tratamiento.....	107
5.3.1	Factores que influyen en el costo de la obra civil.....	108
5.4	Costos de Construcción, Operación y Mantenimiento de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en México.....	119

6. Legislación sobre el tratamiento de aguas residuales.

6.1	Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.....	130
6.2	Ley Federal de Protección al Ambiente.....	132
6.3	Ley Federal de Aguas.....	134
6.4	Ley General de Salud.....	135
6.5	Ley de Obras Públicas.....	136
6.6	Reglamento del Servicio de Agua y Drenaje para el	

	Distrito Federal.....	136
6.7	Ley Federal de Derechos en Materia de Agua.....	137
6.8	Normas Técnicas Ecológicas Correspondientes (SEDUE)...	139
7.	Perspectivas de la Construcción de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).	
7.1	Consideraciones Básicas.....	145
8.	Discusión, Conclusiones y Recomendaciones.....	160
9.	Bibliografía.....	166

1. El Potencial de Tratamiento de las Aguas Residuales en la República Mexicana.

Como su título lo indica, en el presente Capítulo de este trabajo se analiza el potencial de Tratamiento de las Aguas Residuales (AR) en la República Mexicana, así como las condiciones actuales en que se encuentra dicho Tratamiento; su problemática, la necesidad del saneamiento de las cuencas hidrológicas, etc. De igual manera, en este Capítulo se detalla, como un caso particular, el ciclo hidrológico del Valle de México, dada la importancia que tiene por ser la capital del país y por la problemática tan peculiar que presenta a fin de analizar las perspectivas que la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales tienen en el Valle de México así como los volúmenes que en ella se emplean y que son necesarios para satisfacer la demanda que se genera en el mismo para conocer cuáles y cuántos de ellos pueden ser sustituidos por agua renovada. La mayor parte que en la primera parte de este capítulo se presenta proviene de la referencia 1.2.

1.1 La problemática del uso del agua en México.

En las últimas décadas, la calidad del agua en el país se ha deteriorado sensiblemente debido a un conjunto de problemas de muy diversa naturaleza, con características muy complejas y con una elevada demanda de recursos técnicos y económicos para su solución. Dentro de esta problemática destacan por su importancia los puntos siguientes: la magnitud del crecimiento

demográfico y su distribución geográfica; la situación actual de la infraestructura de los servicios de agua potable y alcantarillado; las condiciones de la infraestructura del tratamiento de las aguas residuales; la carencia de suficientes recursos humanos calificados, y finalmente; el uso de las aguas residuales sin tratar en el riego agrícola.

1.1.1 El Desarrollo Poblacional.

Aunque el resultado del último censo de población (1991), 81.1 millones de habitantes, corresponde a una cifra menor a la esperada, el crecimiento demográfico en México sigue siendo mayor al deseable. Aunado a lo anterior se tiene que de las 125,300 localidades existentes en el país, en solamente 98 se concentra el 60% de la población total, lo cual provoca una concentración muy alta de personas en unas cuantas localidades, las cuales aglutinan a su vez, por este motivo, la mayor parte de la vida económica.

Por otra parte, la migración de la población rural a las ciudades es un fenómeno que ha sido constante en las últimas décadas, de tal manera que la población urbana pasó de representar el 50% del total de la población en 1960 al 70% en el año de 1990.

La suma de cada uno de estos componentes ha producido que la demanda de agua se haya incrementado desmesuradamente en unas pocas cuencas del país, en las cuales, sin embargo, se mantiene invariable la cantidad de agua disponible para consumo, lo cual dificulta la satisfacción de las necesidades del vital líquido.

1.1.2 La Generación de las Aguas Residuales.

Actualmente, la descarga de aguas residuales provenientes de los centros urbanos, llamadas por ello "domésticas", alcanza un gasto de 113.2 m³/s; de las cuales corresponden a la ciudad de México 40.8 m³/s, a la ciudad de Monterrey 8.5 m³/s y a la ciudad de Guadalajara 8.2 m³/s. Esto representa el 51% del total generado a nivel nacional.

Por lo que respecta al sector industrial, se tiene que éste genera aguas residuales de características muy variadas, las que en su mayoría resultan altamente contaminantes para los cuerpos de agua receptores por descargarse a los mismos sin tratamiento alguno.

Se estima que la industria genera, a nivel nacional, un gasto de aguas residuales de 82 m³/s, siendo los principales giros industriales responsables de la mayor carga, los correspondientes a la industria del azúcar, química, celulosa y papel, petrolera, de bebidas, textil, siderúrgica y de alimentos, lo cual puede observarse en el cuadro 1.1.

Principales Giros industriales responsables de las mayores descargas de aguas residuales en México.			
Tipo de Industria	Extracción (%)	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

Cuadro 1.1

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

Cuadro 1.1 Continuación.

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%, correspondiendo a los restantes seis giros señalados 22% y al resto del sector un 19% del total.

1.1.3 Infraestructura del Servicio de Agua Potable, Alcantarillado y Tratamiento.

Las cifras disponibles señalan que un 30% de la población total del país no cuenta con abastecimiento mediante un sistema formal de agua potable y que un 51% no dispone del servicio de alcantarillado. Este importante rezago dificulta la labor de saneamiento debido a la dispersión de descargas existentes y a la necesidad de realizar considerables inversiones en los sistemas de colección de aguas residuales como requisito previo a la construcción de la Infraestructura para el tratamiento de aguas residuales. El cuadro 1.2 muestra el tipo y número de plantas de tratamiento de AR que existen actualmente en México.

Tipo y Número de Plantas de Tratamiento Municipales existentes en México	
Tipo de instalación	Cantidad
Lagunas de Estabilización	181
Lodos Activados	79
Tanques Imhoff	24
Areación Extendida	23
Lagunas Aireadas	17
Tratamiento Primrio	15
Filtros Biológicos	8
Tratamiento Biológico (No identificado)	8
Digestión Anaerobia	2
Biodiscos	2
Tratamiento Físico Químico	1
No Identificados	1
Total	361

Cuadro 1.2.

En los últimos años la infraestructura en materia de tratamiento de aguas residuales ha aumentado en forma significativa, de acuerdo al inventario realizado en 1983, se identificaron 223 instalaciones municipales con una capacidad global de tratamiento de 16.5 m³/s. Dicho inventario, en proceso de actualización, señala la existencia de 361 plantas de tratamiento municipales, con una capacidad global instalada de 30 m³/s por lo que aproximadamente en 7 años se ha incrementado en casi un 62% de la capacidad instalada. Sin embargo, se ha identificado que solamente el 10% de las plantas existentes opera en forma adecuada, mientras que el 35% opera de manera ineficiente y el 50% se encuentra fuera de operación, siendo los principales problemas detectados los siguientes:

- Diseño inadecuado.
- Mala selección de Tecnología.

- Carencia de recursos humanos capacitados.
- Deficiencias de operación y mantenimiento.
- Errores en la Construcción.
- Mala estimación "a priori" de los costos de construcción y operación.

1.1.4 Los Recursos Humanos.

De acuerdo a la Oficina Sanitaria Panamericana se requiere de un ingeniero sanitario por cada 50,000 habitantes. Con base en tal índice, el número de ingenieros sanitarios requeridos por el país es de alrededor de 1,700. El fuerte déficit existente (1,250 en México) ha tenido que ser cubierto por profesionistas de diversas disciplinas de manera ampliamente improvisada.

Además de los recursos humanos de alto nivel, es también imprescindible la formación de cuadros técnicos que permitan la correcta ejecución de las acciones que los diversos programas demandan.

En forma específica, la infraestructura instalada actualmente en México en materia de tratamiento de aguas residuales se ha visto seriamente afectada por la carencia de operadores calificados, lo que en algunos casos ha representado la pérdida total de las inversiones realizadas.

1.1.5 El Reúso de Aguas Residuales.

Debido a la escasez de agua de primer uso y su difícil explotación, la tendencia a utilizar aguas residuales para uso agrícola ha mostrado un aumento paulatino. Este fenómeno se presenta principalmente en las inmediaciones de las ciudades de mayor población.

En el país actualmente se encuentran bajo riego con agua residual 165,000 Ha, aprovechando 51 m³/s de las descargas de las principales ciudades en las que se genera un gasto promedio de 72 m³/s. De esta superficie bajo riego, se puede mencionar como la más importante la del Distrito de Riego 03, que ha venido aprovechando desde principios de siglo las descargas de aguas residuales provenientes de la ciudad de México para desarrollo del Valle del Mezquital, de características semiáridas, cuya superficie de cultivo se ha incrementado hasta alcanzar en la actualidad 85,000 Ha bajo riego, con un gasto promedio de 31 m³/s.

Otras zonas con importantes aprovechamientos de agua residual en la agricultura son: Ciudad Juárez, Chih. para riego de 3,000 Ha en el Distrito de Riego no. 09 con un aprovechamiento de 1 m³/s; Puebla, en el Distrito de Riego no. 030 para 2,600 Ha con un gasto promedio de 0.83 m³/s; Tulancingo, Hgo. en el Distrito de Riego no. 065 para riego de 300 Ha con un gasto promedio de 0.11 m³/s y por último, distribuidas en el resto del país, se riegan con agua residual 65,000 Ha con 18.06 m³/s.

En los municipios se utiliza actualmente agua residual tratada en forma incipiente para riego de parques y jardines y en el llenado de lagos artificiales para fines recreativos.

En el sector industrial la práctica del reúso de agua tratada se aplica en mayor medida en los procesos de enfriamiento, estimándose que en 1990 se ocupó un volumen anual de 5,290 millones de metros cúbicos.

El alto costo que representa tratar el agua residual para usos industriales ha limitado este aprovechamiento correspondiendo a las ciudades de México, Monterrey y Guadalajara los mayores volúmenes de reuso de agua tratada con fines industriales, siendo éstos de 1.3, 1.2 y 0.5 m³/s respectivamente.

1.2 Ciclo Hidrológico del Valle de México.

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 Greenwich.

En su origen natural fue una cuenca cerrada (endorreica) que el hombre alteró al abrirla artificialmente por medio del túnel de Tequizquiac, el Tajo de Nochistongo, el Canal del Desagüe y el Emisor Profundo, cuyas descargas son aprovechadas para riego en los Estados de México e Hidalgo. La cuenca está rodeada de montañas, alcanzando algunas de ellas elevaciones de más de 5,000 m. La planicie en general tiene una elevación media de 2,240 m sobre el nivel del mar. Las sierras que la limitan son las

siguientes: al Norte, la Sierra de Pachuca, con una orientación general de Oeste a Este; al Noroeste, la Sierra de Tezontlalpan y Tepotzotlán; al Sur, la Serranía del Ajusco, con una orientación sensible de Este a Oeste; al Este, la Sierra Nevada cuya orientación general es de Norte a Sur; al Noreste la Sierra de Tepozán; al Oeste se encuentra limitada por las Sierras de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo, orientadas sensiblemente de Sureste a Noreste. La región limitada por estas sierras abarcan una superficie de 9,600 km². Ver figura 1.1. En la figura 1.2 se encuentra un esquema del Sistema Hidrológico del Valle de México donde se detalla desde la manera en que el agua parte del Sistema Hidrológico hasta llegar a los usuarios y de cómo esta misma agua retorna a dicho sistema por las diversas variantes que en éste se esquematizan.

1.2.1 Ingreso de Agua al Valle de México.

1.2.1.1 Precipitación Pluvial.

La precipitación pluvial en el Valle de México alcanza un promedio de 700 mm/año. En general, las lluvias ocurren de mayo a octubre y la época de secas abarca el resto del año. La precipitación media anual aumenta en el Valle del noreste hacia el suroeste y las lluvias se acentúan en las montañas del sur y del oeste. Sin embargo, esta tendencia es mucho menos notable en el caso de las precipitaciones de corta duración, por ello, los

Zonas Hidrológicas del Valle de México



ESCALA EN Km
0 10 20 30 40

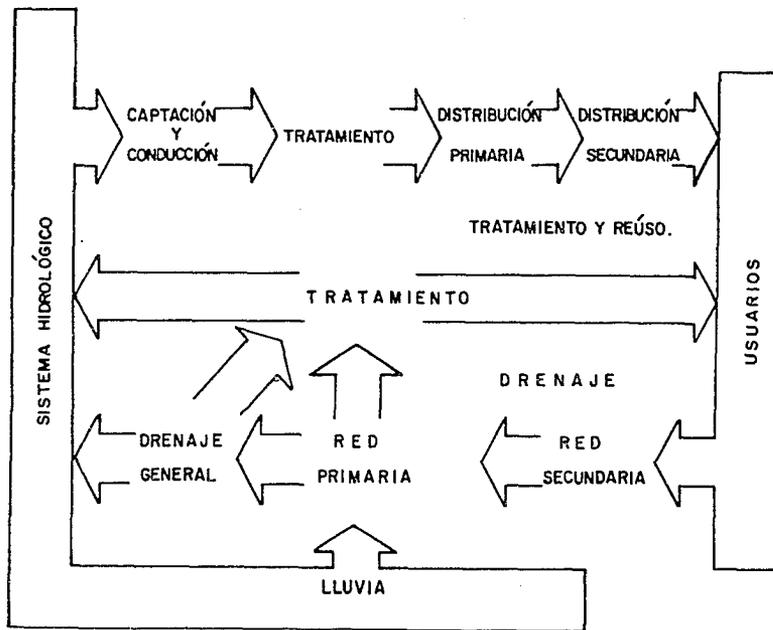


FIG. 1.2 SISTEMA HIDROLÓGICO DEL VALLE DE MÉXICO

grandes chubascos o tormentas pueden ocurrir casi indistintamente en cualquier parte del Valle y, en particular, en cualquier parte del Distrito Federal.

La distribución temporal de las lluvias en el Valle de México es muy desfavorable desde el punto de vista de su aprovechamiento o control, ya que casi la totalidad de la precipitación de un año se concentra en un número muy reducido de tormentas. Así, durante una sola tormenta es posible que se precipite entre el 7 y el 10% de la lluvia media anual; de este volumen, más del 50% se precipita en tan sólo 30 minutos, lo que provoca grandes pero cortas crecientes. De esta manera empieza a plantearse la paradoja que ha vivido la Ciudad de México a lo largo de su existencia: el exceso de agua producto de la lluvia ha contrastado con la falta de ella para su consumo en su calidad potable. Por un lado, es difícil controlar los escurrimientos generados durante las tormentas y desalojar esta agua, pero por el otro, la Ciudad se esfuerza por satisfacer sus necesidades de agua potable.

1.2.1.2 Flujo Superficial.

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 descienden 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 38 l/s; sin embargo,

durante tormentas excepcionales ocurren avenidas importantes, especialmente en el río San Buenaventura, donde se han presentado caudales cercanos a los 100 m³/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. Las 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.

Zona 8. La zona 8 localizada también en el oriente comprendelos ríos que se sitúan entre el San Francisco y el Milpa Alta: en esta zona se genera un caudal medio de 0.6 m³/s.

Zonas 9, 10 y 11. Finalmente, las zonas 9, 10 y 11 se extienden desde la cuenca del río Tizar hasta las corrientes alimentadoras del río Tecocomulco y todas ellas generan 1.6 m³/s; en un principio, estas zonas no formaban parte de la cuenca pero se incorporaron a ella en forma artificial.

En conjunto, las corrientes superficiales del Valle de México tienen un caudal medio de 19 m³/s que equivalen al 9% del volumen que llueve en un año. El total de las lluvias dan una recarga al

acuífero del orden de los 725 millones de m³ anuales, equivalente a 23 m³/s, existiendo una sobreexplotación aproximada al 193% de la recarga. En la misma figura 1.1 se pueden observar las regiones hidrológicas mencionadas en esta parte del trabajo.

1.2.1.3 Importación de Agua de Cuencas externas al Valle de México.

Los recursos hidráulicos disponibles para el abastecimiento de agua potable dentro del área metropolitana han evolucionado de acuerdo al crecimiento de la población y de la zona urbana. Para 1951, se inició la explotación del acuífero del río Lerma en el Estado de México y en 1982, el río Cutzamala se incorporó a su vez al sistema. En los próximos 20 años será necesario transferir agua desde otras cuencas como las del Tecolutla y del Amacuzac entre otros.

El sistema Lerma se inició con 4 m³/s y para 1974 llegó a aportar 14 m³/s, explotación que con el transcurso del tiempo ocasionó un severo abatimiento de los acuíferos de los Valles de Toluca e Ixtlahuaca, por lo que fue necesario reducir su explotación.

En 1972 se constituyó la Comisión de Aguas del Valle de México con el objeto de programar, construir, operar y conservar las obras necesarias para aprovechar los recursos hidráulicos del Valle de México, así como aquéllas que fueran necesarias para traer el líquido de otras cuencas.

Las regiones más viables para este abastecimiento con fuentes externas corresponderán en el futuro a las cuencas que se enlistan en el siguiente cuadro 1.3 que incluye los caudales aportados por cada una así como el costo de su inversión:

Fuente	Caudal Aportado	Inversión inicial (\$ miles de millones)	Inversión por m ³ /s instalado
Cutzamala (3a Etapa)	8.0 m ³ /s	1,776.52	222.06
Libres/Oriental	7.0	1,601.66	228.81
Alto Amacuzac	13.0	2,990.29	230.02
Medio Amacuzac	48.0	10,070.00	209.79
Tecolutla	5.5	3,529.81	227.73
Taxhimay/Tlautla	5.0	4,019.62	203.92
Taxchimay (Tula)	5.0	545.89	109.18

Cuadro 1.3 (pesos a junio de 1991).

Con lo que se estima se podrían cubrir las demandas del vital líquido hasta el año 2,010. La figura 1.3 muestra la localización de las cuencas mencionadas de posible abastecimiento futuro para la ZMCM.

1.2.1.4 Agua bombeada proveniente de mantos acuíferos.

La concentración demográfica y económica del Valle de México consume todos los días de 57 a 62.5 m³/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 m³/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 en la ZMCM.

A pesar de las grandes inversiones para extraer aguas de otras cuencas, desde 1950 se han sobreexplotado los acuíferos del

Z.M.C.M.

ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE DE FUENTES EXTERNAS

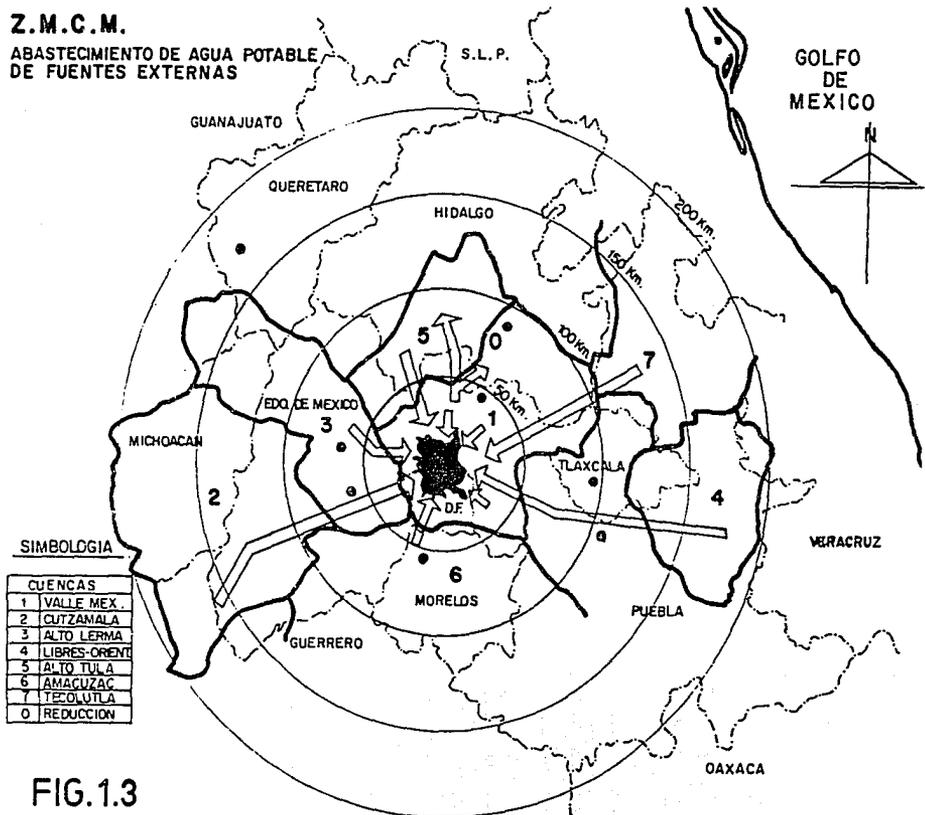


FIG.1.3

Valle, lo cual empieza a generar pérdidas en la capacidad de suministro, contaminación de algunos mantos subterráneos y acelera el proceso de hundimiento de la Ciudad y zonas aledañas. El abatimiento de los niveles de agua subterránea alcanza en algunas zonas como Tlalpan, Naucalpan y Tlalnepantla los 3.5 metros por año, lo que se traduce en una reducción de los caudales. En Milpa Alta e inmediaciones de la Sierra de Santa Catarina se han detectado problemas en la calidad del agua que se extrae, lo que se debe en algunos casos a la contaminación superficial por la urbanización sin condiciones sanitarias adecuadas y en otros casos, por la extracción de agua fósil de calidad deficiente.

Los hundimientos del terreno en las inmediaciones de Xochimilco y Tláhuac en el Distrito Federal y en Ecatepec, Nezahualcóyotl y Chalco en el Estado de México, han registrado hasta 30 cm anuales con el consiguiente daño al drenaje y a las edificaciones.

1.2.2 Consumo de Agua Potable en la Cuenca del Valle de México.

Como ya se mencionó en el punto anterior, en el Valle de México consume todos los días de 57 a 62.5 m³/s. La distribución de dicho consumo por sectores se presenta como sigue:

Entidad	Sector	Consumo (%)
Distrito Federal	Doméstico	57
	Industria	14
	Servicios	11
	Comercio	3
	Uso Público y Pérd. en el Sma.	15

Municipios	Doméstico	80
Metropolitanos	Industria	15
	Comercio	5

Cuadro 1.4 Continuación.

En 1951 el 50% de la población del Distrito Federal contaba con tomas domiciliarias. Dicha cifra se elevó al 70% en 1977 y al 97% en 1982; así, la Capital de la República ocupa el primer lugar en cuanto a nivel de servicio en relación con las ciudades del resto del país. A pesar de esto, sólo el 85% de los Municipios Metropolitanos cuentan con tomas domiciliarias y en el oriente y suroriente se tienen serias deficiencias de suministro por carecer de redes troncales de distribución.

Aunque el consumo para todos los usos es de 300 litros diarios por habitante en el Distrito Federal y 198 en el Estado de México en promedio, actualmente en el poniente existen colonias con dotaciones mayores a los 600 litros por habitante por día (l/hab/día) y en el oriente, vastas zonas con apenas 20 l/hab/día.

Por otra parte, las bajas tarifas prevalecientes facilitan desperdicios en el consumo y limitan la capacidad para ampliar y mejorar los sistemas ya que éstos no alcanzan a cubrir siquiera los costos de operación. En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se dificulta la aplicación de políticas financieras unitarias porque existe un mayor nivel de subsidio en el Distrito Federal.

En materia de ingresos por el servicio de agua en el Distrito

Federal, actualmente sólo se recupera el 6.67% del costo de otorgar el servicio, en tanto que por concepto de drenaje, la recaudación es prácticamente nula. En los Municipios Metropolitanos del Estado de México la recuperación asciende al 26%.

Para el año 2,000 la Zona Metropolitana albergará alrededor de 28 millones de habitantes que demandarán aproximadamente 88 m³/s de agua potable, con una dotación de 270 l./hab/día, reduciéndose en un 10% la dotación por habitante. La alternativa tradicional a esta situación consistiría en la extracción y conducción de agua desde otras cuencas como por ejemplo, la de los ríos Tecolutla y Amacuzac, lo cual requeriría de inversiones de 642 mil millones por metro cúbico la primera y 214 mil millones la segunda.

1.2.3 Egreso de agua del Valle de México.

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 la zona urbana de las inundaciones a la que ha estado sometida desde su fundación. Hace más de tres siglos, el sistema hidrológico del Valle de México estaba limitado al sistema lagunar del Valle, posteriormente, con la construcción del Tajo de Nochistongo, primera salida artificial ubicada al norte del Valle, se incorporó al río Tula a dicho sistema. 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 general, lo constituyen tres tipos de obras: obras primarias, redes secundarias y sistema general de desagüe.

En la ZMCM se generan del orden de 40.8 m³/s de aguas residuales, de los cuales, el Distrito Federal produce 29 m³/s y los 17 municipios conurbados del Estado de México los 11 m³/s restantes.

Según datos de 1982, cuando la población estimada era de 12 millones de habitantes, el promedio anual de aguas negras generadas, incluyendo escurrimientos de aguas superficiales era de aproximadamente 3.53 millones de metros cúbicos por día (40.8 m³/s) para la ZMCM, volumen que se ha mantenido constante ya que cabe señalar que del total del volumen de aguas negras, a 4.3 m³/s se les sujeta a algún tipo de tratamiento para su reuso, a su vez, las aguas ya renovadas son destinadas a los reúsos industrial y agrícola en 2.4 y 1.9 m³/s respectivamente. Estos egresos de agua de la cuenca ya incluyen al escurrimiento superficial que no logra almacenarse para su uso ni infiltrarse a los acuíferos y que equivale a 11.7 m³/s; las pérdidas por riego que van a dar al drenaje con un gasto de 0.9 m³/s; y las fugas que van a dar al emisor y que alcanzan los 2.0 m³/s. En el Distrito Federal, la mayor parte de caudal de aguas residuales se genera en las delegaciones más consolidadas, ubicadas en el centro de la Ciudad y en las delegaciones periféricas de Iztalapala y Gustavo A. Madero por su elevado número de habitantes.

El nivel de servicio promedio es del 74%, sin embargo, existen cuatro delegaciones donde apenas alcanza el 60%, éstas son: Coyoacán, Iztapalapa, Tlalpan y Tláhuac. La carencia de servicios origina problemas de diversa índole según las características de las zonas donde eso ocurre.

La Delegación Iztapalapa se localiza en el sur-oriente de la ciudad, donde los asentamientos del subsuelo dificultan enormemente la dotación de los servicios de alcantarillado ya que se requiere de obras de gran tamaño para poder desalojar las aguas residuales; obras que, por su magnitud, no pueden realizarse en su totalidad en el corto plazo. Por este motivo las descargas de aguas residuales se realizan en fosas sépticas, que en muchos casos no cumplen con los requisitos mínimos de mantenimiento. La Delegación de Tlalpan, al igual que una amplia zona de Coyoacán tiene como característica la presencia de basaltos fracturados. En esas Delegaciones es común también que la disposición de las aguas residuales se haga por medio de fosas sépticas, pero con la inconveniencia de que se trata de un área de recarga de acuíferos natural, debido a que las lluvias son más abundantes que en otras partes de la ciudad y a la alta permeabilidad del terreno por lo que las descargas de aguas residuales representan un serio riesgo. En las Delegaciones de Xochimilco y Tláhuac se hace difícil la construcción de infraestructura convencional para la recolección y disposición de las aguas residuales debido a la presencia de canales. Por esta razón existen numerosas descargas directas a los canales provenientes de asentamientos irregulares en sus márgenes,

situación que representa un serio riesgo para la salud porque el agua de los canales se utiliza para riego de legumbres mediante métodos inadecuados y por el contacto que pueda tener la población que utiliza los canales para actividades recreativas. Las Delegaciones ubicadas al Poniente se caracterizan por tener problemas de otro tipo; en ellas las descargas de zonas que no cuentan con servicios se realizan en cauces naturales, que son igualmente agresivas al medio ambiente. Es por estos motivos que todos los ríos y arroyos existentes en la zona están contaminados por aguas negras o bien se unen a conductos abiertos o cerrados.

Como ya se mencionó, las áreas de servicio 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. El sistema de drenaje es complejo y presenta problemas de falta de capacidad debido al hundimiento de la ciudad el cual modifica la inclinación original de las tuberías y obliga a depender de las plantas de bombeo. Las aguas que colecta, descargan a cuatro grandes drenajes:

- El río Churubusco.
- El Gran Canal de Desagüe.
- El Interceptor del poniente, y
- El sistema de drenaje profundo.

El emisor poniente es la salida de aguas residuales más antigua de la ciudad. Se construyó originalmente para desalojar las aguas de Río Cuautitlán que producía inundaciones en época de

crecientes. En la actualidad recibe también aportaciones del Distrito Federal a través del Interceptor del Poniente (25 m³/s). Tiene una longitud de 47.8 km y conduce hasta 80 m³/s; descarga al Río El Salto, afluente de Río Tula.

El Gran Canal del Desagüe tiene una longitud de 47.4 km, se construyó durante la época de Porfiriato y tiene una capacidad de conducción de más de 115 m³/s. Descarga al Río Salado que también es afluente del Tula, a través de dos túneles. Se inicia en la zona urbana, cercana a la antigua estación de tranes 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 construida más recientemente. Forma parte del Drenaje Profundo y tiene una longitud de 49.7 km. Fue construido con el propósito de operar sólo en épocas de avenidas. Tiene una capacidad máxima de 220 m³/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 presenta en la figura 1.4.

Por su parte, los conductos de agua residual a cielo abierto que afectan actualmente al Distrito Federal son: río San 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 juegan un papel muy importante el Lago de Texcoco porque recibe las aportaciones de agua pluvial de los Ríos del Oriente y los desechos líquidos de Río de la Compañía y del Río Churubusco. Cuenta con una gran capacidad de regulación además de 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, conduce los caudales al Lago de 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 extraen para riego.

En los municipios conurbados del Estado de México el problema es aún mayor que en la zona correspondiente al Distrito Federal. El nivel de servicio promedio es de 64%, por lo que aproximadamente 2.9 millones de mexicanos carecen de instalaciones para recolección y desalojo de las aguas residuales. Los problemas que se derivan de las carencias son similares a las señaladas para las delegaciones del Distrito Federal. Zonas como Chalco, que carecen de infraestructura suficiente están sujetas también a fuertes hundimientos del

terreno; o las del Poniente de Valle con cauces a los que descargan aguas residuales. Un resumen del balance hidrológico de la Cuenca del Valle de México se encuentra en la figura 1.5.

1.2.4 Tratamiento y Reúso actual en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

En la actualidad, existen 16 plantas de tratamiento de aguas residuales en el Distrito Federal: Rosario, Coyoacán, Ciudad Universitaria, Tlatelolco, 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 media de 4.3 m³/s. El agua se destina al riego de áreas verdes, llenado de canales en Xochimilco y de Lagos en Chapultepec y Aragón; también se destina el agua tratada a la industria principalmente en las Delegaciones de Iztapalapa y Azcapotzalco.

En el Estado de México existen 8 plantas de tratamiento de aguas residuales que opera el Gobierno del Estado, en Naucalpan y en 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 de FORD. También en el Plan del Lago de Texcoco existe una planta de tratamiento secundario, estas aguas tratadas se destinan al llenado del Lago Nabor Carrillo, entre otros usos. En el Estado de México además opera la planta de Nopalera en San Cristóbal. En la figura 1.6 se

BALANCE HIDROLOGICO DEL VALLE DE MEXICO

FUENTES EXTERNAS

(S.A.R.H. 1981 modificado)

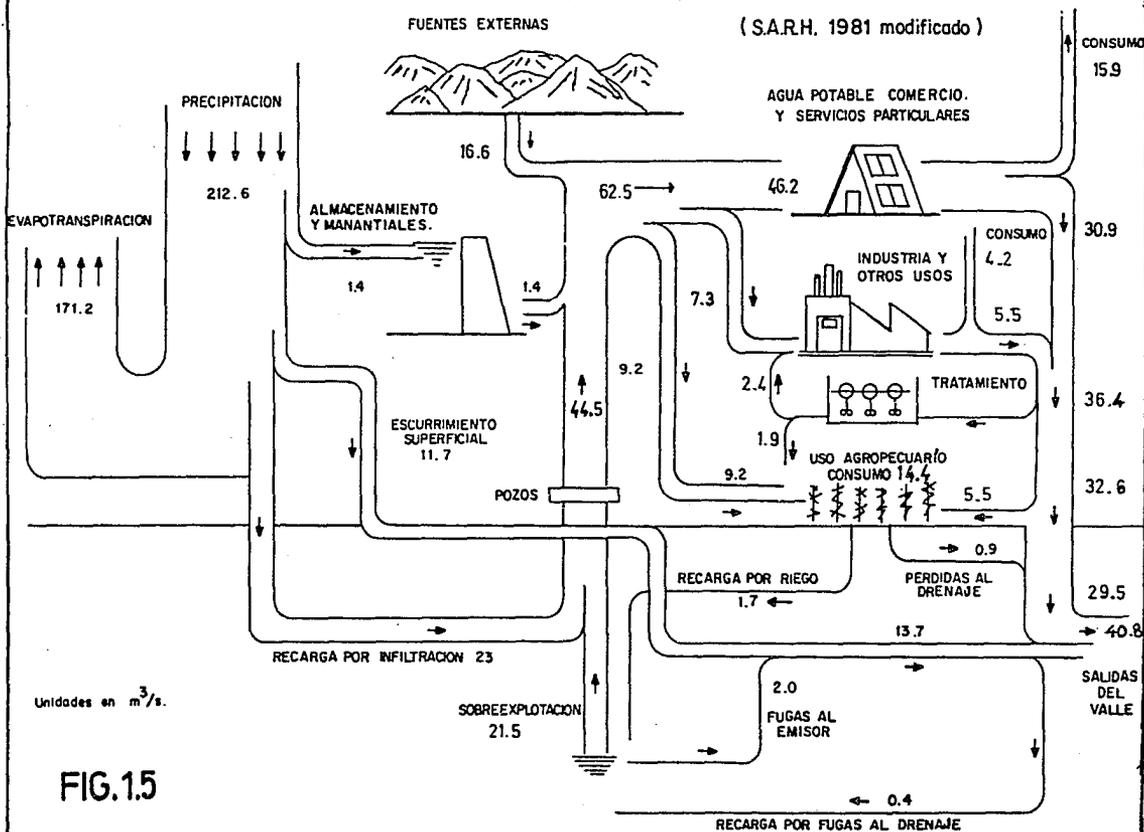


FIG.15

muestra la localización de las 24 plantas existentes en la ZMCM así como una zonificación de reuso posible para cada una de ellas.

1.2.5 Tarifas de Agua en el Distrito Federal y los Municipios Metropolitanos.

En la siguiente parte se presentan las tarifas que privan en el Distrito Federal y en los Municipios Conurbados de la ZMCM (precios a junio de 1991) en los cuadros 1.5 y 1.6.

Tarifas de Agua Potable en el Distrito Federal y los Municipios Metropolitanos.				
Entidad	Sector	Consumo (m3/bim)	Tarifa (pesos/m3)	Cuota Promed. (\$/bimestre)
Distrito Federal.	Doméstico	50	22	1,116
		100	36	3,609
		150	46	6,959
		500	61	30,409
	Industrial	100	620	62,000
		200	620	124,000
500		620	310,000	
Municipios	Doméstico	50	168	8,415
		100	280	28,050
		150	477	71,520
		500	589	294,525
	Industrial	100	513	51,300
		200	949	189,810
500		1,077	538,650	

Cuadro 1.5

Ingresos y Egresos Monetarios de los sistemas de Agua Potable			
Entidad	Costos Absolutos (m3)	Recuperación Absoluta (m3)	Diferencial Absoluto (m3)
Distrito Federal	\$ 935	\$62.40 (6.67%)	\$ 872.58

Cuadro 1.6

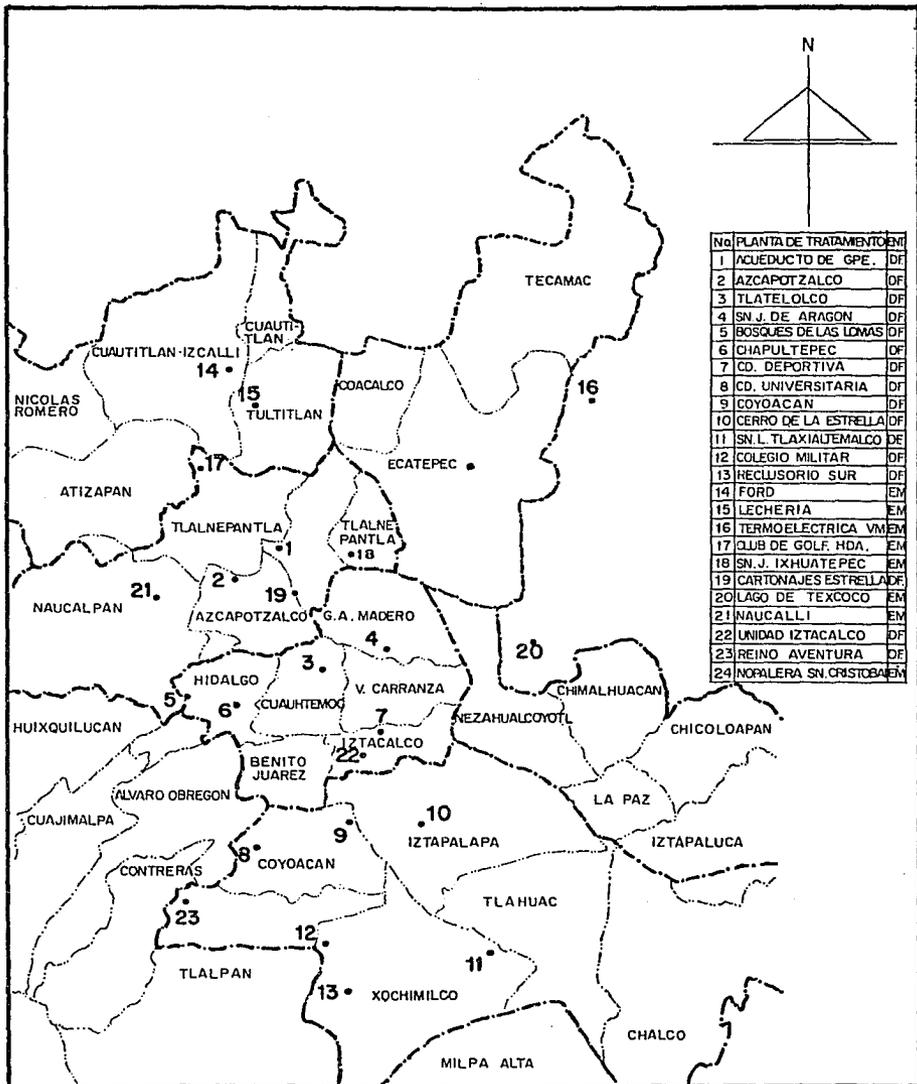


FIG.16 PLANTAS DE TRATAMIENTO DE LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO .

2. La Contaminación del Agua.

El agua tal como la encontramos en la naturaleza no es utilizable directamente para el consumo humano ni para la industria porque, salvo en raros casos, no es suficientemente pura. A su paso por el suelo, por la superficie de la tierra o incluso a través del aire, el agua se contamina y se carga de materias en suspensión o en solución: partículas de arcilla, residuos de vegetación, organismos vivos (plancton, bacterias, virus), sales diversas (cloruros, sulfatos carbonatos de sodio, calcio, hierro, manganeso...), materias inorgánicas (ácidos, residuos de las industrias...), gases, etc.

La presencia de esta gran variedad de impurezas exige el tratamiento de las aguas antes de su utilización para hacerlas aptas para las necesidades consideradas o después de su utilización para su reuso o bien para evitar todo daño al medio ambiente.

En el segundo capítulo de este trabajo se describirán el origen y la manera en que se contaminan las aguas, esto es, cómo y cuáles son los elementos contaminantes o impurezas que penetran en la misma, hasta hacerla inútil para el consumo humano directo. La cantidad y calidad de estos elementos contaminantes determinan a su vez la calidad de las aguas residuales lo que se reflejará en el costo del tratamiento necesario para habilitarlas para su reuso.

2.1 Contaminación del Agua.

Las aguas residuales domésticas e industriales contienen impurezas que van a depositarse a los cuerpos de agua al ser vertidas por los sistemas de alcantarillado.

Cualquier cuerpo de agua puede asimilar una cierta cantidad de contaminantes sin mostrar efectos negativos serios, debido a que el ciclo biológico que tiene lugar en él se ajusta al mayor abastecimiento de alimentos o a otras condiciones cambiantes tales como temperatura, alcalinidad o acidez, dureza, etc.

En una corriente con un contenido bajo de materia orgánica existen pocas sustancias nutritivas para sostener la vida, de tal forma que aunque se presenten muchos tipos diferentes de organismos vivos, existe solo un número pequeño de individuos de cada tipo. En cuerpos de agua con alto contenido de materia orgánica, las condiciones son inadecuadas para plantas y animales superiores, así que las bacterias son los organismos que predominan. Un fenómeno llamado "autopurificación" permite que eventualmente se establezca la materia orgánica y se restablezca una comunidad balanceada.

El fenómeno de la autopurificación involucra uno o más de los siguientes procesos: sedimentación, oxidación química de agentes reductores, decaimiento bacterial debido a las condiciones inhóspitas para los microorganismos patógenos y la oxidación química. Por supuesto, la naturaleza de los residuos y las

características del agua tendrán una influencia considerable en los efectos de una descarga en particular. Los desechos de mayor importancia en la contaminación del agua son:

A. Compuestos tóxicos que ocasionan la destrucción o inhibición de la actividad biológica en el agua. La mayor parte de ellos se originan en las actividades industriales e incluyen algunos de los siguientes materiales: metales pesados, fenoles, pesticidas y radioisótopos. Las aguas naturales también pueden contener concentraciones importantes de elementos tóxicos por disolución de los mismos en diversos estratos del suelo; estos compuestos permanecen después del uso del agua y se vierten a los cuerpos receptores. La actividad biológica en el agua también puede producir compuestos tóxicos, por ejemplo, hay algas responsables de desprender toxinas en el agua.

B. Materiales que afectan el balance de oxígeno en el agua y son:

a) Sustancias que consumen el oxígeno disuelto. Estas pueden ser materia orgánica que es descompuesta biológicamente y ocasiona una demanda bioquímica de oxígeno, o agentes inorgánicos reductores.

b) Sustancias que impiden la reoxigenación. El oxígeno disuelto en el agua es suministrado por transferencia desde la atmósfera. Productos tales como el aceite y los detergentes pueden formar una capa sobre la superficie del agua, reduciendo la tasa de transferencia de oxígeno y pueden, por tanto, amplificar los efectos de las sustancias consumidoras de oxígeno.

c) Descargas con alta temperatura que pueden alterar el balance de oxígeno porque la concentración de saturación del oxígeno disuelto disminuye al incrementarse la temperatura.

C. Altas concentraciones de sólidos inertes que pueden depositarse en el fondo de las corrientes y lagos impidiendo el crecimiento de la flora acuática que sirve de alimento a los peces.

D. La presencia de microorganismos patógenos pueden ocasionar brotes de enfermedades infecciosas si el agua se emplea para consumo humano.

Quando se considera el problema de la contaminación de las aguas existen muchos efectos indeseables y no sólo la presencia de organismos patógenos y el déficit de oxígeno. Dependiendo de la dilución disponible, puede haber un incremento importante en el contenido de sólidos disueltos, materia orgánica, nutrimentos (como el nitrógeno y fósforo), turbiedad y otros parámetros indicadores de contaminación. Los principales contaminantes biológicos son los virus, los parásitos y las bacterias.

2.2 Calidad de las aguas residuales.

El agua residual que ingresa en una planta de tratamiento acarrea consigo una gran cantidad de desechos producto de las diversas actividades humanas. Estos desechos incluyen materia fecal, desechos orgánicos, grasas y aceites, sólidos de muchos tipos, desechos industriales que pueden contener ácidos o bases muy fuertes, substancias tóxicas, substancias orgánicas

sintéticas complejas, etc., además de agua pluvial que al entrar en la planta arrastrará gravas y arenas así como basuras que puede haber recogido durante su paso por las calles.

2.2.1 Origen de las aguas residuales.

Existen muchas maneras de clasificar al agua residual aunque generalmente se acepta aquella que hace referencia a su origen según lo siguiente:

Agua Doméstica.- Es la que proviene de casas, oficinas, e instituciones tales como hospitales. Se origina en baños, lavanderías, cocinas, así como en la limpieza de pisos.

Agua Industrial.- Es el agua que se genera en la industria a través de sus diversos procesos de manufactura.

Agua Pluvial.- Es el agua de lluvia que ingresa a los sistemas de alcantarillado a través de las coladeras en las calles y patios de casas y edificios.

Una planta de tratamiento puede ser que reciba un solo tipo de agua o bien una combinación de las tres.

Algunos desechos industriales pueden ser tóxicos para un sistema de tratamiento biológico en vista de que dicho tratamiento depende de la acción de las muchas formas de vida que existen en el sistema. Para lograr una correcta operación de la planta es necesario conocer la composición de las aguas residuales, para determinar si los desechos que se reciben son, o pueden ser, tóxicos para el proceso.

2.2.2 Impurezas en el agua.

La calidad del agua puede ser definida como la variedad de características físicas, químicas y biológicas que la hacen adecuada o no para un uso específico, las cuales pueden ser:

A. Temperatura.

La temperatura del agua residual es un aspecto de gran importancia en una planta de tratamiento de aguas residuales. Es importante por su efecto en otras propiedades como: acelerar las reacciones químicas y biológicas y reducir la solubilidad de los gases, acentuar los olores y sabores, inhibirla vida, etc. Se mide empleando el termómetro. Los dos efectos más importantes de la temperatura en una planta de tratamiento son:

a. Solubilidad del oxígeno en el agua. Debido a la presión atmosférica, siempre existe una pequeña cantidad de oxígeno en el agua, y a medida que aumenta la temperatura del agua, disminuye su capacidad de disolver el oxígeno y, como consecuencia, éste irá disminuyendo en el agua.

b. Actividad microbiológica. Dentro de determinados rangos de temperatura, a medida que aumenta la temperatura del agua se incrementa la actividad de los microorganismos, como consecuencia de este incremento de actividad, los microorganismos necesitarán de más oxígeno.

Como conclusión se puede decir que mientras mayor sea la temperatura del agua, mayor será la cantidad de oxígeno que será necesario proveer para que el tratamiento se realice adecuadamente.

B. Color.

El color indica el tiempo en que las descargas de aguas residuales han estado dentro del sistema de alcantarillado. Las aguas residuales domésticas tienen color pardo grisáceo y cambian su apariencia a negruzco con el tiempo. Las aguas industriales pueden variar mucho de color, dependiendo del proceso en el que se usa el agua y de las sustancias que se le agregan.

El color que se presenta en el agua puede ser de origen mineral (Fe, Mn) o vegetal, como los producidos por materia orgánica en suspensión: algas, semillas, protozoarios, etc. En los desechos industriales puede deberse a sustancias solubles procedentes de minas, refinerías, productos químicos (sustancias orgánicas e inorgánicas), etc.

No existe una correlación entre color y su índice de contaminación o con un efecto específico a la salud, pero es de aspecto sospechoso y desagradable estéticamente. Relacionado con el pH, aumenta al aumentar éste; es decir, a mayor índice de pH, es más oscuro el color del agua. Se conocen los siguientes tipos de color:

Color Real o Verdadero: es el que se debe a sustancias en solución.

Color Aparente: es el debido a sustancias en solución y suspensión. Puede ser eliminado por centrifugación.

Se mide por comparación y se expresa en unidades de color. Una unidad se obtiene con 1 mg de platino (se usa cloro platinado de potasio) en un litro de agua.

C. Olor.

El olor es causado tanto por los gases que produce la descomposición de la materia y por los desechos industriales que transporta el agua. El olor indica el origen del agua y su grado de descomposición.

Es debido a una gran cantidad de sustancias, organismos microscópicos vivos (algas), vegetación en estado de descomposición, materia orgánica en descomposición (desagües domésticos e industriales) y a una gran cantidad de productos químicos. Se ha intentado controlar con la adición de cloro, pero hay sustancias que producen peor olor al combinarse con él.

No hay una relación directa entre el olor y la salud, pero desde el punto de vista estético, el empleo de aguas con olor puede ser sumamente desagradable.

D. Turbiedad.

Es la característica que hace aparecer al agua como sucia o borrosa. Es causada por partículas suspendidas y coloidales que limitan al paso de la luz a través del agua. Pueden ser partículas minerales (limo, arcilla, Zinc, Fierro, Manganeso) u orgánicas (microorganismos, aserrín, fibras orgánicas).

El origen puede ser el producto de la intemperización y erosión ejercida por los rios o desechos domésticos e industriales. El crecimiento del grado de turbiedad depende de la concentración de partículas, tamaño, dispersión y propiedades de absorción de la luz.

No existe una correlación directa de la turbiedad con los aspectos de la salud, ni siquiera con su contaminación con aguas residuales, sin embargo, las partículas que imparten turbiedad constituyen defensas para los microorganismos y les sirven de protección a la acción de desinfectantes.

D. Sólidos.

La remoción de sólidos es una de las principales preocupaciones de una planta de tratamiento de aguas residuales. Los sólidos se clasifican de la siguiente manera:

a. Sólidos orgánicos e inorgánicos: los sólidos orgánicos son aquéllos que tienen su origen a partir de la materia viviente. Lo sólidos orgánicos son aprovechados por las bacterias para su alimentación mientras que los inorgánicos lo son en una pequeña proporción. A los sólidos orgánicos se les conoce como volátiles debido a que la prueba mediante la cual se determinan consiste en elevar la temperatura de la muestra hasta niveles tales en que los compuestos orgánicos que los forman se volatilizan, es decir, se incorporan a la atmósfera en forma de gases y no es posible detectarlos pesando el residuo en una balanza. A los compuestos inorgánicos que no se volatilizan al elevar la temperatura se les conoce como fijos.

b. Sólidos totales: para comprender mejor éste parámetro, considérese una muestra de un litro de agua residual cruda que entra a una planta de tratamiento. A continuación se calienta la muestra hasta lograr que se evapore toda el agua y se pesa el material residual. Este peso incluye tanto los sólidos

disueltos, que son aquellos que pasan a través de un filtro, como los sólidos suspendidos, que son los que no son capaces de pasar a través de un filtro determinado.

c. Sólidos disueltos: para determinar la cantidad de sólidos disueltos se hace pasar una muestra de agua a través de un filtro, los sólidos suspendidos serán retenidos por el filtro y solo pasarán por este los sólidos disueltos por el agua. Puede ahora evaporarse el agua por medio de calentamiento y volver a pasar el residuo que queda después de la evaporación. El peso de este residuo será el contenido de sólidos disueltos. De este parámetro es importante saber que en una planta de tratamiento a nivel secundario (biológico), es muy pequeña la fracción de sólidos disueltos que se puede remover.

d. Sólidos suspendidos: los sólidos suspendidos se componen de: sólidos sedimentables y sólidos no sedimentables; la diferencia entre éstos depende fundamentalmente del tamaño, peso forma y volumen de las partículas de los sólidos. Las partículas más grandes tienden a sedimentar mejor que las partículas de menor tamaño. Para el operador de una planta de tratamiento es importante conocer la cantidad de sólidos sedimentables presentes en el agua, ya que de acuerdo a esta cantidad y conocido el volumen de las tolvas de lodos en los sedimentadores primarios, se puede determinar el tiempo que hay que dejar transcurrir entre purgas sucesivas. También es necesario conocer la cantidad de

sólidos sedimentables que entran a los sedimentadores y los que salen para poder conocer la eficiencia del sedimentador para la remoción de éstos.

e. Sólidos flotantes: son, como su nombre lo indica, aquellos cuerpos que flotan en la superficie del agua . Afortunadamente las unidades de tratamiento de aguas residuales están diseñadas para poder eliminarlos de las aguas en proceso mediante equipos denominados desnatadores. Su presencia en el efluente (salida del agua) de una planta indica, sin lugar a dudas, que dicha planta está funcionando ineficientemente.

E. Conductividad.

La conductividad, o mejor dicho, la resistividad de una solución se mide por medio de una celda constituida por dos electrodos conectados a un amplificador que, a su vez, alimenta a un instrumento indicador. Los fenómenos de polarización son despreciables si se utiliza una señal alterna de frecuencia conveniente.

F. Potencial de Hidrógeno (pH).

El pH es, desde un punto de vista totalmente práctico, una medida de la acidez de un agua. Los valores del pH varían entre 0 y 14 teniéndose dos rangos:

Si el pH está entre 0 y 7, el agua está en el rango ácido; si se encuentra entre 7 y 14 está en un rango básico; y si vale exactamente 7, el agua está en la neutralidad.

Este parámetro es sumamente importante ya que los organismos que degradan la materia orgánica no son capaces de sobrevivir si el valor del pH es menor a 4.5 ni mayor a 9.5. Por otra parte,

si se tienen valores de este parámetro muy bajos, existe la fuerte tendencia por parte de las aguas a corroer todas las tuberías metálicas con las que entren en contacto. Además influye en muchos procesos como la coagulación, desinfección, ablandamiento y en los procesos vitales.

G. Acidez.

Es la capacidad de neutralizar el hidróxido (OH). La acidez en las aguas naturales es generalmente debido a la presencia del bióxido de carbono. El bióxido de carbono proviene, en parte de la atmósfera y principalmente es el producto final de la descomposición de la materia orgánica. En aguas de pozo en que el bióxido de carbono (CO₂) no puede escapar a la atmósfera, no es difícil encontrar valores de 30 a 50 mg/l. Otra fuente de acidez en el agua es la presencia de ácidos minerales debidos a desechos industriales.

La acidez del agua le comunica a ésta un alto poder corrosivo, lo que puede ocasionar grandes pérdidas en tuberías y varillas de acero de refuerzo del concreto.

H. Alcalinidad.

Es la capacidad de un agua para neutralizar ácidos. La alcalinidad es debida a la presencia de los iones hidróxido, bicarbonato y carbonato. La alcalinidad no tiene gran importancia desde el punto de vista sanitario.

Altas concentraciones de alcalinidad pueden producir precipitación de sales de calcio en tuberías y artefactos. Además está relacionada con la dureza del agua.

I. Dureza.

La dureza de las aguas se debe a la presencia de cualquier catión polivalente, pero generalmente solo se consideran al Calcio y al Magnesio por ser los más abundantes en las aguas naturales.

Uno de los problemas generados por la dureza del agua es la formación de precipitados dentro de las tuberías, causando la reducción de su capacidad hidráulica.

No se ha demostrado correlación entre las aguas con alto contenido de dureza y daños al organismo. Los problemas son de tipo doméstico e industrial.

J. Algunos Elementos y Compuestos Químicos.

Cloro. Debido a la práctica de desinfectar el agua con cloro, es frecuente encontrar cloro residual en el agua.

Nitrógeno. Los compuestos nitrogenados son un índice químico de contaminación. Asimismo, es un elemento esencial para los diferentes procesos vitales, es indispensable para la formación de aminoácidos y proteínas. Por otro lado, una concentración mayor de amoniaco es evidencia de que existe poco material proteínico en descomposición.

Sulfatos. Los sulfatos son compuestos abundantes en las aguas naturales, en combinación con calcio y magnesio causan incrustaciones en tuberías y equipos. En combinación con materia orgánica y bacterias sulforreductoras causan corrosión.

Fosfatos. Son un nutrimento esencial para la vida. El exceso de ellos produce proliferación del crecimiento de plantas en el agua ya que en forma natural es un factor limitante.

Oxígeno disuelto. El oxígeno es un elemento indispensable para la vida en cualquiera de sus formas. Es también un gas que puede ser disuelto por el agua, razón por la cual se habla del "oxígeno disuelto en el agua". Cuando en un agua residual desaparece el oxígeno disuelto, se dice que se trata de una agua séptica, sin embargo, esto no quiere decir que por ello no haya vida en ella. A simple vista, un agua séptica es de color mucho más oscuro que un agua residual fresca, en ocasiones llega a tener un color negro y es posible detectar un olor sumamente desagradable. Cuando el agua residual permanece durante mucho tiempo sin aerearse, el oxígeno disuelto que pudiera haber es aprovechado por los microorganismos aerobios existentes para realizar sus funciones vitales hasta el punto que pueden agotar totalmente este elemento, a partir de ese momento, estos microorganismos empiezan a morir y comienzan a tomar su lugar los microorganismos anaerobios, los cuales son capaces de tomar el oxígeno que necesitan para vivir a partir de compuestos químicos presentes en los desechos; a este proceso se le denomina "descomposición anaerobia". Los productos de la descomposición anaerobia incluyen el ácido sulfhídrico (cuyo olor es similar al de los huevos podridos) con lo cual empiezan a aparecer burbujas en el agua, de hecho, el color negro de ésta se debe a la reacción entre el ácido sulfhídrico con el fierro del agua para formar sulfato ferroso, que es de color negro.

Substancias tóxicas. Son muchas las sustancias tóxicas que pueden llegar a las aguas residuales. Entre ellas destacan las siguientes: plomo, selenio, arsénico, cromo hexavalente, mercurio, cianuro, cadmio, bario, zinc y multitud de compuestos orgánicos que constantemente sinetiza la actividad industrial.

K. Demanda Bioquímica de Oxígeno.

El parámetro de la Demanda Química de Oxígeno (DBO) es una forma indirecta de medir la cantidad de materia orgánica presente en el agua residual. Lo que procede es medir en el laboratorio la cantidad de oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el agua para "estabilizarla", esto es, para reducir la materia orgánica a compuestos más simples y que no provoquen daños. Se puede decir, de otra manera, que la DBO es una medida de la cantidad de materia orgánica que tiene el agua. Cuanto mayor sea la DBO, mayor será la cantidad de materia orgánica en el agua.

L. Demanda Química de Oxígeno.

Es una medida de la cantidad de oxígeno requerida para la oxidación química de la materia presente en el agua. Como no sólo la materia orgánica es oxidable, sino que también lo son los compuestos inorgánicos; este parámetro normalmente es mayor que la DBO, debido a que es más simple la determinación analítica de la DQO.

3. Acciones para la reutilización del Agua Residual (AR).

Existen fundamentalmente tres tipos de reuso para las aguas renovadas que son descritos en este capítulo, los cuales son: el agrícola, el industrial y la recarga de acuíferos (entre otros más como los servicios y domésticos). Y aunque no puede ser considerado propiamente como una manera de reutilizar el agua residual, se incluyen además una parte referente a la utilización del agua pluvial y otra referente al Programa del Uso Eficiente del Agua implantado en la ZMCM por el D.D.F. como una manera de optimización del uso del agua.

3.1 Industria.

El agua destinada a reuso industrial debe tener una calidad que permita varios usos en una misma fábrica.

En la industria, las funciones elementales más frecuentes son las siguientes:

A. Producción de energía por vaporización, en centrales clásicas o nucleares, que exige un agua de la mayor pureza;

B. Transporte de Calor para la condensación de vapor, enfriamiento de fluidos o de aparatos. Se emplean generalmente caudales grandes y por ello se acepta un agua de calidad media;

C. El transporte de materias primas o de desechos:

-remolachas en la industria azucarera,

-cascarilla de trenes de laminación,

-carbón en los lavaderos,

-fibras de papelería, etc.

D. Procesos de fabricación (papeleras, industrias textiles y alimenticias, etc.) para las cuales existen generalmente normas estrictas y específicas.

E. Aclarado de piezas o lavado de productos (tratamientos de superficies, semi-conductores, industrias agrícolas o de la alimentación...) que exigen, según el caso, una calidad de agua potable, una esterilidad absoluta o incluso una desmineralización total.

F. Extinción de productos incandescentes y circuitos de enfriamiento (escorias, coque, etc).

G. Calderas de vapor y mantenimiento de la presión en yacimientos petrolíferos por inyección de aguas tratadas con gran cuidado y acondicionadas contra la corrosión, los lodos y la incrustación.

H. Preparación de redes de baños en utilidades diversas.

I. Redes de riego para zonas verdes y jardines.

Para diseñar una planta de tratamiento de aguas residuales industriales es necesario conocer los valores de los siguientes parámetros:

- Caudal a tratar.
- Características de las aguas residuales a tratar.
- Calidad requerida del agua tratada.

Los dos primeros de estos parámetros se definen de acuerdo con el uso industrial a que sean destinados. El tercero implica una investigación de calidades y gastos de las corrientes de aguas residuales.

El reúso del agua tratada puede plantear varios tipos de problemas distintos:

- Incrustación. Las incrustaciones dependerán del contenido de calcio bajo forma de bicarbonato de calcio, el contenido en calcio es poco afectado por el tratamiento biológico. Se puede decir que el riesgo de incrustaciones en los circuitos de enfriamiento o en las calderas de vapor depende de las características de las aguas vivas en una zona determinada y no proviene de la contaminación doméstica.

- Corrosión. La corrosión depende del contenido de oxígeno, del pH y de otros parámetros puramente químicos, ligados a las características de las aguas vivas.

- Desarrollo de microorganismos. Viene ligado al contenido en materias orgánicas y en materias en suspensión. El tratamiento elegido para las aguas residuales hará hincapié sobre la reducción de dichos parámetros.

- Espumas. Las espumas se deben principalmente a los detergentes y a la mezcla con las grasas y se producen después de una agitación fuerte. Estas espumas se notan, sobre todo, en las torres de enfriamiento aunque pueden producirse también dentro de las calderas de vapor donde favorecen el arrastre de gotas de agua en el vapor. El tratamiento seleccionado deberá de eliminar la mayor parte de las grasas y reducir el contenido de detergente, sabiendo que no podrá ser eliminado del todo debido a su no biodegradabilidad. Se conseguirá una cierta

reducción de los detergentes por absorción sobre los flóculos durante el tratamiento biológico y se mejorará considerablemente dicha reducción por filtración en carbón activado.

Por lo expuesto anteriormente, se deduce que de acuerdo a las posibilidades ofrecidas para resolver los problemas planteados por el reuso del agua tratada en las industrias, podrán existir varias soluciones de tratamiento.

3.2 Acciones para el reúso del agua en la Industria.

Existen principalmente tres esquemas de reutilización del agua en la industria, que pueden considerarse como lo más viables:

A. Que una planta industrial construya su propia planta de tratamiento de aguas residuales, las cuales podrían obtenerse de la industria misma o de una corriente ajena pero de localización cercana a fin de que el costo de la conducción no resulte muy alto. La calidad del agua tratada debe ser lo suficientemente apta para los procesos de fabricación de la planta industrial. La intención es de que el costo del agua tratada resulte menor que el del agua potable incluyendo el consumo de energía eléctrica, productos químicos, sueldos y amortizaciones del costo de construcción y otras inversiones. Sin embargo, este esquema tan positivo no podría ser empleado por todas las industrias porque es necesario un consumo mínimo de agua para que el proyecto sea rentable. Además, no se debe olvidar que la formación y capacitación de una plantilla técnica es indispensable.

B. El segundo esquema plantea la posibilidad de que un conjunto de industrias se asocien para construir en común una planta de tratamiento a la cual se le suministre agua negra de las fábricas mismas o bien del sistema de drenaje local. La planta de tratamiento podría distribuir el agua renovada al conjunto de socios en función de los volúmenes requeridos por cada uno de ellos. El almacenaje y distribución del agua renovada podría resultar un inconveniente dada la diferencia de horarios de labores así como de los volúmenes y calidad de los diferentes usos y requerimientos de cada industria, a menos que se instrumente un plan o programa de uso del conjunto.

C. El tercer esquema supone la construcción, operación, mantenimiento y comercialización de la planta de tratamiento de aguas residuales por parte de una empresa estatal o privada, quien sea la encargada de suministrar agua renovada a una fábrica o bien a un conjunto de ellas.

Cabe indicar que el proceso de tratamiento tanto de este esquema como del anterior, las opciones tendrían que incluir los trenes de tratamiento suficientes para satisfacer los requerimientos del agua de los solicitantes del servicio dado que éstas serían diferentes en medida de las diferencias en cada tipo de industria.

Por otra parte, podría pensarse también en un programa estatal que mediante incentivos fiscales o económicos (tal como el Derecho de descargas de agua de la Ley Federal de Protección al Medio Ambiente la cual puede consultarse en el último capítulo de

este trabajo) propiciara que las industrias redujeran los volúmenes de efluentes estudiando la posibilidad de crear circuitos de reúso del agua e inclusive la modificación de sus procesos de fabricación.

3.3 Agricultura.

Las aguas residuales de desecho urbano renovadas a ciertos niveles constituyen una gran alternativa para el riego agrícola; además de que las aguas aplicadas en este uso permiten liberar aguas claras necesarias para el consumo doméstico. Sin embargo, en México la aplicación de aguas residuales en suelos tiene como finalidad el riego de cultivos pero se aplican prácticamente crudas, ya que el único tratamiento que reciben en algunos casos es aquél que se presenta en forma natural durante el recorrido del agua por los canales de distribución o durante su almacenamiento en presas. Por esta causa la práctica de riego con aguas residuales crudas representa serios riesgos de afectación a la salud de los trabajadores agrícolas y consumidores de los productos ya que pueden generar enfermedades hidrotansmisibles. Bajo esta perspectiva deben formularse criterios de calidad de las aguas residuales para riego y recomendaciones para la protección de la salud en cuatro aspectos principales: el tratamiento de aguas residuales, la restricción de los cultivos, los métodos de aplicación de las aguas residuales y el control de la exposición humana.

En efecto, cuando las aguas residuales reciben un tratamiento, los riesgos para la salud se abaten considerablemente en comparación de cuando se usan completamente crudas.

3.4 Sistema de intercambio de agua tratada a nivel agrícola.

Se estima que en el valle de México se riega alrededor de 30,000 hectáreas con cerca de 9.2 m³/s de aguas subterráneas y superficiales las cuales podrían dedicarse al uso doméstico si se estableciera un programa de intercambio por agua residual tratada de menor calidad pero que a la vez beneficiaría el riego dados los nutrientes que ésta contiene.

En un programa de intercambio de aguas de riego por aguas residuales, es indispensable tener una estimación fundamentada de las opciones factibles evaluadas técnica y económicamente a efecto de asignar las prioridades más convenientes y programar los recursos complementarios.

Dicho programa tendría como objetivo, partiendo de una lista de las zonas de riego existentes, el lograr un panorama razonable del programa de intercambio, formular proyectos específicos a nivel de factibilidad así como evaluar las ventajas y desventajas de cada uno.

A su vez, cada proyecto debería desarrollarse a nivel de factibilidad, determinando los datos básicos de ingeniería conceptual de las obras de recolección de las aguas de riego, conducción, bombeo, potabilización, entrega en bloque,

regulación, así como las obras de captación de aguas residuales, tipo y sitio de tratamiento, bombeo, conducción y sistemas de distribución de cada zona de riego.

El realizar algunos estudios de gran visión, proporcionaría los lineamientos generales sobre las posibilidades de intercambio de agua clara por tratada para riego agrícola, mediante estos estudios se formularán los respectivos proyectos a nivel de factibilidad y se podría elaborar una cartera de proyectos con base en la información recabada, aunque ésta sería completada, revisada y evaluada para afinarla y darle una mayor consistencia, detalle y confiabilidad.

Al formular los proyectos a nivel de factibilidad se busca determinar, con el suficiente detalle y confiabilidad, las acciones y recursos que requieren, las características de las componentes de las obras (ubicación, dimensiones, datos básicos estructurales, hidráulicos y topográficos, geotécnicos, alternativas diversas, etc.) incluyendo sus costos de inversión y operación, las dificultades que se detectan en su realización y operación, las ventajas y desventajas, aportando elementos de juicio para la mejor toma de decisiones en la promoción de cada proyecto a los siguientes niveles de proyecto ejecutivo y de construcción.

3.5 Recarga de Acuíferos.

Los objetivos fundamentales de la recarga artificial de acuíferos son en el caso de la ZMCM:

-Recuperar parte del agua que sale de la cuenca (27.5 m³/s de aguas residuales y de 13.3 m³/s de agua de escurrimiento).

-Mantener o restaurar niveles a fin de disminuir (o suprimir) los efectos de la sobreexplotación.

-Almacenar agua para regular las necesidades de estación (p.e. la irrigación) o conservar agua para necesidades futuras.

-Explotar durante muchos años agua subterránea, expulsándola mediante efecto de pistón, al mismo tiempo que se mantienen los niveles.

-Mejorar, durante el trayecto subterráneo, la calidad de agua inyectada, y hacerla así, apta para su uso posterior agrícola, industrial o potable.

La recarga artificial de un acuífero puede efectuarse mediante tres tipos de dispositivos:

Mediante pozos.- el principal problema tecnológico por resolver es entonces el del tratamiento preeliminar puesto que el agua debe poder ser inyectada sin que el pozo se obture rápida e irremediablemente. Por otra parte, el grado de afinado debe ser tal que, teniendo en cuenta los fenómenos físicoquímicos y biológicos en el acuífero (p.e. efecto de pistón, mejoramiento durante el trayecto subterráneo, etc.) y las posibilidades de tratamiento posterior durante el rebombeo, hacen que el sistema sea económicamente interesante.

Mediante estanques de infiltración.- estos dispositivos necesitan superficies importantes, pero presentan a su vez medios de tratamiento eficaces para ciertos elementos contenidos en el agua residual (materias en suspensión, materias orgánicas y bacterias entre otros). Pueden adaptarse a calidades de agua muy pobremente tratadas, a condición de aumentar las superficies de estanque. El punto esencial es el de llegar a la mejor condición económica entre la calidad de las aguas por infiltrar, el grado de depuración obtenido durante la infiltración y, por otra parte, la superficie necesaria.

Mediante el esparcido de las aguas producto de las crecidas.- lo que podría ser considerado al sur y al poniente del Valle de México dada la alta permeabilidad de su subsuelo pero sin olvidar cuidar la calidad del agua pluvial.

Los proyectos viables podrían ser los 3 siguientes:

-PROYECTOS DE GRAN ESCALA.- (5, 10 ó 20 m³/s) que permitan resolver globalmente los problemas de la Ciudad de México y que consistirían en tratar las aguas residuales hasta un nivel compatible con su inyección por pozos o infiltrarlas mediante estanques (o bien agrupando las dos técnicas) o finalmente infiltrar aguas de crecidas. Este tipo de proyectos requerirían de varios estudios preliminares antes de ser implementados y requerirían además de fuertes inversiones.

-PROYECTOS DE MENOR ESCALA.- que consisten en utilizar de la mejor manera la capacidad de las Plantas de Tratamientos actuales de lodos activados con esto, se podrían emplear sus efluentes para la recarga de la capa freática.

-PROYECTOS PARA RESOLVER EL PROBLEMA DEL HUNDIMIENTO.- que consistiría en inyectar agua de la red de los pozos para mantener en un mismo nivel a la capa freática, la cual no podría considerarse como pérdida ya que sería extraída por bombeo un poco más lejos.

3.6 Sistemas para la Utilización de las Aguas Pluviales.

El abastecimiento de agua y los sistemas de drenaje son manejados de manera muy diferente al que puede ser el tercer subsistema de agua urbana: el agua pluvial. El agua de lluvia es la parte que liga al sistema urbano de agua, esto quiere decir que constituye una fuente de abastecimiento de agua y a la vez de agua residual. Aunque no se tiene la capacidad de controlar su llegada o su cantidad, la lluvia proporciona limpieza para las calles y humedad para los prados y los acuíferos. El manejo de un sistema de agua pluvial puede llegar a conformar una parte muy importante de un sistema urbano de agua pero ha recibido, históricamente, muy poca atención. La razón de este retraso se debe a que se ha atendido más al abastecimiento de agua y a los sistemas de drenaje dado que resultan ser necesidades básicas e inmediatas. La realidad es que la gente puede vivir sin tomar en cuenta el agua de lluvia y puede aún permanecer relativamente libre de enfermedades aunque la calidad de vida del medio

ambiente sufra las consecuencias. Sin embargo, con el crecimiento de las ciudades y con los problemas para localizar las fuentes de contaminación del agua, la importancia real del manejo del agua pluvial se vuelve cada vez más aparente.

El manejo del agua pluvial ha sido un término poco usado antes de los años sesentas tanto como el del drenaje urbano. No fue sino a partir de los años setentas en que el término ha cobrado importancia. El problema radica en que algunos han usado este término para referirse tan sólo al drenaje, mientras otros piensan tan sólo en el aspecto que representa el control de la contaminación del agua aunque en realidad el manejo del agua de lluvia debería ser visto como una actividad desarrollada con múltiples propósitos, incluyendo el de la calidad y la cantidad del agua.

En esta parte del presente trabajo, se estudiarán por separado los sistemas para recolección del agua pluvial y para un sistema de drenaje combinado, y aunque sus problemas de diseño son muy similares, la diferencia principal se debe a que el Sistema de Drenaje Combinado (SDC) involucra el problema que significan las inundaciones, lo que quiere decir que el agua de lluvia se mezcla con las aguas negras altamente contaminadas. Sin embargo, los escurrimientos de agua pluvial pueden contener en sí misma niveles de contaminación más altos que la misma agua residual.

Por otra parte, se puede decir en su favor, que los sistemas de manejo de agua pluvial proporcionan dos servicios básicos: el drenaje de las tormentas menores y el control de las inundaciones. Estos dos servicios básicos se distinguen por sus

beneficios que son la comodidad, limpieza y seguridad para el drenaje de tormentas pequeñas y prevención en contra de daños materiales, así como la seguridad de las vidas en caso de inundaciones. Los sistemas de drenaje combinado proporcionan en general, los mismos servicios de drenaje y a su vez desalojan las aguas residuales en épocas de secas. Si así se diseñan, los programas para agua pluvial pueden proporcionar beneficios con otros tres servicios: control de la erosión; control de la calidad de los escurrimientos urbanos a través del buen manejo y tratamiento de los mismos y; el mejoramiento de los arroyos o ríos del ambiente urbano.

Al evaluar los beneficios del servicio del agua pluvial, se puede pensar primero en emplear las técnicas de análisis económico desarrolladas para otros programas de uso del agua, sin embargo, es difícil aplicar estas técnicas en este caso, puesto que muchos de los beneficios son intangibles y no pueden llegar a ser cuantificados. Por otra parte, la mayoría de los beneficios que pueden ser cuantificados en la prevención de inundaciones no son muy visibles para el público excepto justo después de una catástrofe. La estimación formal de los daños urbanos potenciales es una técnica en la cual muchos ingenieros no tienen mucha experiencia y además, en realidad existen pocas oportunidades para mejorarlas. Los otros beneficios se encuentran mucho más ligados a las conveniencias de la vida diaria y no son del tipo que se presten a un análisis costo-beneficio.

Aunque los beneficios son difíciles de medir y de cuantificar,

los programas para el uso del agua pluvial pueden ser mejor aprovechados con la introducción de programas múltiples de mejoramiento terreno/agua dentro de proyectos de desarrollo regional. A pesar de la dificultad de medir los beneficios del agua pluvial, existe una aproximación para una evaluación económica. A continuación se presenta la lista de beneficios contra costos que puede ser útil para hacer una evaluación económica de este servicio :

Beneficios.	Costos
Tangibles	
Reducción de daños por inundaciones Alza en el valor de los predios Reducción de retrasos en el tránsito	Costos de Construcción Costos de Terreno Costos de Administración Costos por Seguros Costos de Reconstrucción
Intangibles	
Reducción de problemas de Salud Pública	Costos Sociales y Ambientales.

Tabla 3.1

Existe además un beneficio adicional asociado al agua pluvial el cual consiste en la limpieza de las ciudades que de esta manera pasa a ser agua residual dada la calidad con la que la lluvia escurre a las alcantarillas.

3.6.1 Configuración de un Sistema para Manejo de Lluvia.

La configuración general de un sistema para manejo de agua pluvial se muestra en la figura 3.1, en donde las divisiones básicas van de sistemas "menores" a "mayores" correspondiendo al drenaje y al control de inundaciones cada uno. El sistema de drenaje "menor", el cual ha sido también llamado "sistema

inicial" trabaja a base de zanjas, pequeñas fosas y alcantarillas, embalses de retención y pequeños canales a fin de manejar los escurrimientos. Este sistema podría describirse como un "sistema de drenaje para lluvia" en un contexto de programas para el desarrollo de la comunidad. El sistema "menor" es fácilmente reconocible puesto que es la parte visible del sistema de manejo de la lluvia que la gente ve operando y proporcionando servicio.

El sistema "mayor" no es visible usualmente ya que su propósito es el desalojar y manejar las inundaciones extraordinarias cuando éstas ocurren. El sistema "mayor" es comparable a los vertederos de las presas ya que no son usados por años pero deben estar ahí cuando son necesarios.

En Sistemas de Drenaje Combinado (SDC) la configuración del sistema toma una forma más complicada que la de un sistema de drenaje "menor" puesto que los elementos del mismo que tienen que ver con la calidad del agua están incluidos. En realidad, un Sistema de Drenaje Combinado consiste en un híbrido entre los sistemas de drenaje para lluvia y un sistema de alcantarillado sanitario. Sólo recientemente se ha dado la suficiente atención al agua pluvial puesto que se ha vuelto necesario el prestar más atención a la calidad del agua de los ríos, así como al reúso del agua pluvial con la observación concerniente sobre cómo separar a los sistemas de alcantarillado combinado o bien tratar sus descargas.

En general, un SDC es lo mismo que un sistema menor para agua pluvial excepto que incluye facilidades para su regulación y tratamiento. La figura 3.1 muestra como un SDC comienza en el mismo colector que el sistema pluvial menor hasta que alcanza el albañal interceptor que conduce al flujo de tiempo de sequía a la planta de tratamiento. Si la capacidad del interceptor o de la planta de tratamiento son excedidas, entonces ocurrirán inundaciones que pueden ser fuente de severos problemas de contaminación del agua. La figura 3.1 también muestra en qué parte del sistema se podría aplicar el tratamiento por separado al agua pluvial si éste fuese incluido, así como su posible reúso en las ciudades.

3.6.2 Financiamiento para Sistemas de Agua Pluvial.

La administración de los sistemas de drenaje de agua pluvial, cuando existe, corresponde en mayor número a los gobiernos locales y dado que ha sido tradicionalmente difícil obtener ayuda financiera para construir y dar mantenimiento a los sistemas de agua pluvial podría existir una tendencia hacia el intento de obtener "utilidades" del manejo de sistemas del agua pluvial en los próximos años. La idea consiste en considerar y manejar al agua pluvial como un servicio prestado aparte de los otros sistemas de aprovisionamiento de agua .

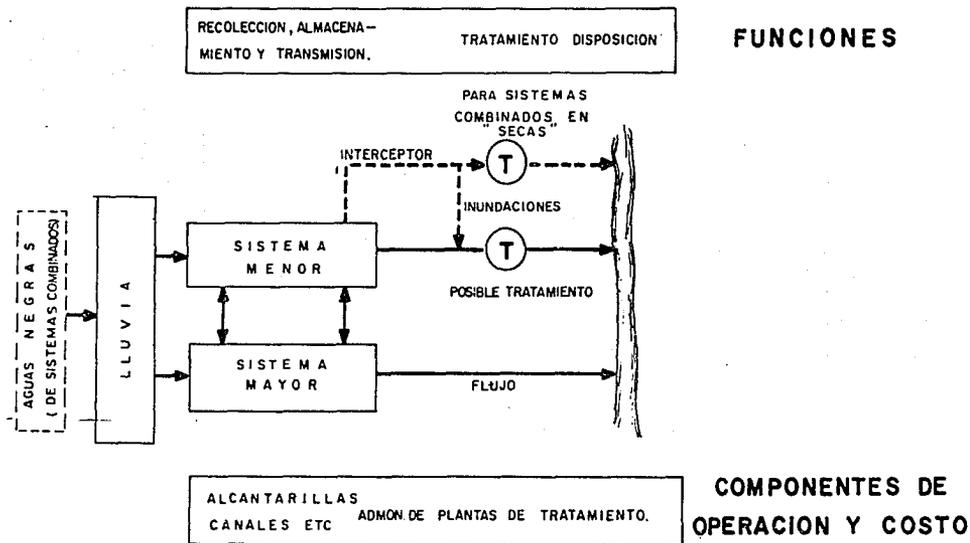


FIG. 3.1 CONFIGURACION DE UN SISTEMA URBANO PARA AGUA PLUVIAL

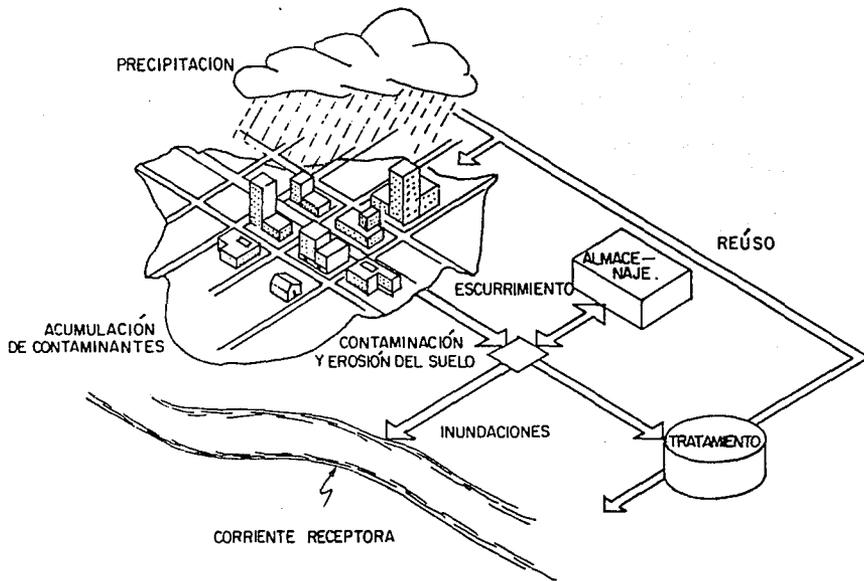


FIG. 3.2 ESQUEMA DE UN SISTEMA URBANO DE AGUA PLUVIAL

En los Estados Unidos de Norteamérica por ejemplo, muchos gobiernos locales han encontrado al servicio de drenaje pluvial como un resultado de la urbanización y de la construcción de caminos y no como un servicio expofeso para obtener utilidades.

A pesar de ello, se han planteado las siguientes opciones de financiamiento de este tipo de sistemas: Fondos Federales, Préstamos sobre utilidades posteriores, cargos e impuestos especiales por la prestación del servicio. Estos ingresos servirían para cubrir los gastos de de operación, construcción incremento de capital a fin de prever futuras ampliaciones, así como para gastos de administración.

En cuanto al costo de construcción de este tipo de sistemas, se puede decir que no se han desarrollado todavía métodos para la estimación precisa de su costo puesto que cada sistema es muy diferente. Sin embargo, se ha encontrado que el factor preponderante de costo reside en la longitud y diámetro de las tuberías.

3.7 Programa del Uso Eficiente del Agua en la Ciudad de México (PUEDA).

A partir de 1984 el Departamento del Distrito Federal implantó de manera formal el Programa de Uso eficiente del Agua con la finalidad de reducir los consumos de los usuarios sin dejar de satisfacer sus necesidades básicas ni afectar el desarrollo de las actividades productivas.

Este programa contempla los siguientes objetivos específicos:

- A.Utilizar al máximo los caudales de abastecimiento.
- B.Mejorar la administración de los servicios de agua potable y drenaje.
- C.Activar la implantación del reglamento de los servicios de agua potable y drenaje.
- D.Inducir a los usuarios para que contribuyan al uso eficiente del agua, y
- E.Reducir los consumos de agua en los muebles sanitarios y accesorios hidráulicos.

3.7.1 Acciones a nivel sistema.

Entre las acciones que a nivel sistema se han llevado a cabo durante los últimos años para cumplir con los objetivos antes mencionados destacan:

-La actualización del catastro de la infraestructura mediante el levantamiento de las redes de agua potable y drenaje, lo cual es básico para realizar eficazmente diversas acciones de planeación, diseño, operación y mantenimiento.

-Elaboración de estudios que permitan evaluar y seleccionar el equipo a utilizar tanto para la macromedición como para la pitometría de redes.

-La ejecución permanente y sistemática de los programas de detección y eliminación de fugas visibles y no visibles de la red de distribución.

-La automatización del funcionamiento de componentes del sistema hidráulico a fin de mejorar su eficiencia y confiabilidad.

-La operación de una planta piloto para experimentar procesos no convencionales que permitan la potabilización de agua subterránea de deficiente calidad, característica del oriente de la Ciudad, lo que contribuye a definir la ingeniería básica a emplear en futuras plantas potabilizadoras.

-El estudio de procesos de tratamiento avanzado de aguas residuales en una planta piloto, donde se definen los parámetros de diseño y los procesos más adecuados para plantas de este tipo.

-La sustitución de agua potable por agua residual tratada, principalmente en el riego de áreas verdes y el llenado de lagos recreativos y canales, y fomentar dentro de los sectores comercial e industrial el empleo de esta agua en aquellos usos donde no se requiera de calidad potable, como por ejemplo, en algunos procesos de enfriamiento y limpieza y en el lavado de vehículos automotores.

-El saneamiento de los pueblos de las delegaciones del sur del Distrito Federal, como parte del Programa de Rescate de las Zonas lacustres de Mixquic, Tláhuac y Xochimilco, a fin de conservar el agua de lluvia, así como el inicio de la operación del primer módulo de la planta de tratamiento avanzado de aguas residuales de San Luis Tlaxialtemalco para incrementar la oferta de agua residual tratada en la zona turística y chinampera, permitiendo además, iniciar un proyecto piloto para recarga artificial del acuífero.

3.7.2 Acciones a nivel usuario.

Dentro de las acciones más importantes a nivel usuario sobresalen las siguientes:

-En el Laboratorio de Ingeniería Experimental de la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica se han realizado diversos estudios relacionados con los muebles sanitarios de bajo consumo y sus herrajes, que sirvieron de apoyo a la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial para la elaboración de las normas actuales de inodoros que consumen seis litros por descarga. Además, se han diseñado prototipos de sifones de alta eficiencia hidráulica que se han suministrado como apoyo a varios fabricantes de muebles sanitarios.

-La verificación domiciliaria del buen funcionamiento de los muebles y accesorios hidráulicos para detectar las fugas existentes y proceder a su eliminación con personal capacitado.

-La utilización de muebles sanitarios y accesorios hidráulicos que requieran de cantidades inferiores de agua a las comúnmente usadas en la Ciudad de México. En este sentido cabe mencionar que se está llevando a cabo el Programa de Substitución de Muebles de Bajo Consumo de Agua, dentro del cual se contempla el reemplazo de dos millones de muebles que tradicionalmente requieren de 16 litros por descarga por otros que únicamente utiliza seis, con lo cual se ahorrará un caudal aproximado de 4,300 litros por segundo.

-La revisión de los criterios de diseño para la fontanería en viviendas nuevas y los estudios de reducción del consumo de agua en otros inmuebles domésticos como lavadoras de ropa y de vajillas.

-Las campañas de concientización para el usuario a través de los medios masivos de comunicación.

La concesión de la operación, mantenimiento y comercialización de la planta de tratamiento de aguas residuales Acueducto de Guadalupe al grupo empresarial Aguas Industriales de Vallejo.

-La implantación del reglamento del servicio de agua y drenaje para el Distrito Federal, cuyos objetivos básicos son que los usuarios utilicen de manera eficiente el agua que les es suministrada; además, de sancionar el vertido de sustancias agresivas a la red de drenaje y a quien deteriore o destruya parte de las instalaciones del sistema hidráulico del Distrito Federal.

-Se considera que los esfuerzos que se están desarrollando contribuirán a que el sistema hidráulico del Distrito Federal funcione de manera más eficiente y a que el usuario valore la importancia de utilizar en mejor forma este vital líquido, lo que se reflejará en un mejor suministro y uso del agua en beneficio de todos.

3.8 Otros usos para el Agua Renovada.

Otros usos diferentes a los ya mencionados para el agua renovada lo constituyen su aprovechamiento para el llenado de lagos, por citar algunos ejemplos se mencionan los lagos de

Chapultepec y el más importante en el Valle de México lo es el Lago Nabor Carrillo situado en la zona federal del Lago de Texcoco. También el agua residual puede ser empleada para ciertos servicios municipales que no requieren de una calidad muy alta del agua como lo puede ser el riego de parques, zonas verdes, camellones, etc.

4. 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 de las mismas en su salida (efluente). No obstante esta gran variedad, el tratamiento de las aguas residuales pueden ser clasificadas en un pretratamiento y tres niveles generales que en este capítulo se describen.

4.1 Pretratamiento.

Antes de su tratamiento propiamente dicho, las aguas residuales se someten, generalmente, a un pretratamiento que comprende un cierto número de operaciones físicas o mecánicas. El pretratamiento tiene por objeto separar del agua la mayor cantidad posible de las materias que, por su naturaleza o tamaño crearían problemas en los tratamientos posteriores.

Las operaciones del pretratamiento son las siguientes (aunque una planta de tratamiento puede incluir una o varias de estas operaciones según su importancia y la calidad del agua residual):

4.1.1 Medición del gasto.

La medición del gasto no es parte de los sistemas de tratamiento propiamente dicho, pero es un instrumento indispensable puesto que se requiere conocer, con cierto grado de

precisión, la cantidad de agua que ingresa y circula por cada unidad de la planta a fin de poder hacer los ajustes necesarios a válvulas, compuertas, controles y equipos para operar eficientemente los procesos.

Los dos principales métodos de medición del gasto son: los métodos directos y los métodos de área-velocidad. En los métodos directos el gasto se relaciona a una o dos variables de fácil medición. En caso de existir la necesidad de determinar constantemente del gasto, se desarrollan curvas de calibración para simplificar su medición.

Algunos métodos directos para la medición del gasto son:

- Tubería horizontal
- Area pendiente
- Boquillas
- Medidores Magnéticos, Acústicos y Volumétricos
- Orificios
- Vertedores de cresta angosta
- Trazadores
- Medidores Venturi
- Canal Parshall

Por su parte, los métodos de área-velocidad determinan el gasto multiplicando la velocidad de escurrimiento (m/s) por el área de la sección transversal de la corriente (m²). Los principales métodos y aparatos usados para determinar la velocidad son:

- Medidores de propela
- Tubos de pitot

- Flotadores
- Trazadores.

4.1.2 Rejas, Tamices y Trituradores.

Las rejas constituyen un dispositivo con aperturas, generalmente de tamaño uniforme, utilizado para retener sólidos de cierto tamaño que arrastra el agua residual. Según el método de limpieza que se utilice, serán diseñados como mecánicos o de limpieza manual. Las rejas se fabrican con barras de acero soldadas a un marco que se coloca transversalmente al canal. Las barras así están colocadas verticalmente con una pendiente de 30 a 80° respecto a la horizontal.

La función de los tamices es similar a la de las rejas, sólo que se emplean para sólidos o material menos grueso, ya que están constituidas por placas perforadas o mallas metálicas. De manera similar a las rejas, también los hay de limpieza manual o de limpieza mecánica. Generalmente sus aperturas ranuradas son de 3 mm de anchura o menores.

Los trituradores o desmenuzadores consisten en unos dispositivos que Trituran el material retenido en una reja, sin eliminarlo del agua residual. Existen varios fabricantes de este equipo por lo que se aconseja consultar los manuales de fabricantes de estos esqupos en cuanto se refiere a las dimensiones del canal; capacidades, sumersión y requerimientos de energía. Los dispositivos trituradores pueden ir precedidos de desarenadores, cuyo objeto es alargar la vida del equipo y

reducir el desgaste de las superficies cortantes y de aquellas otras zonas de los mecanismos donde haya un pequeño espacio libre entre las partes fijas y móviles.

4.1.3 Desarenadores.

Como su nombre lo indica, el objeto de los desarenadores es separar arenas, término que engloba a cualquier sólido o materia pesada que tenga velocidad de sedimentación o peso específico superior a los sólidos orgánicos putrescibles en el agua residual. Los desarenadores deberán proteger a los equipos mecánicos móviles de la abrasión y del desgaste anormales, reducir la formación de depósitos pesados en las tuberías, canales y conductos, y la frecuencia de limpieza de los digestores; actividad que hay que realizar como resultado de excesivas acumulaciones de arena en tales unidades.

Existen dos tipos de tanques desarenadores, los de flujo horizontal y los de tipo aereado. El tanque desarenador de flujo horizontal consiste en que el caudal lo atravieza en dirección horizontal, controlándose la velocidad rectilínea del flujo mediante las dimensiones del tanque (o canal) o mediante el uso de vertederos especiales situados en el extremo de aguas abajo del tanque. El tipo aereado consiste en un tanque de aereación con flujo espiral, en que la velocidad es controlada por las dimensiones del tanque y la cantidad del aire suministrado al mismo.

4.1.4. Tanques separadores de grasas y aceites.

Un tanque separador de grasas y aceite consiste en un depósito dispuesto de tal manera que la materia flotante ascienda y permanezca en la superficie del agua residual hasta que se recoja y elimine mientras que el agua sale del tanque en forma continua a través de una abertura situada en el fondo, o por debajo de unos muros o deflectores de esponjas bastante profundos.

La finalidad de estos tanques es la de separar las sub sustancias más ligeras que el agua y que tienden a flotar. El material recogido en la superficie de los tanques separadores incluye: grasas, aceites, jabón, pedazos de madera y corchos, residuos vegetales, etc. Cabe agregar que este pretratamiento no es muy común que se tenga en una planta.

4.2 Tratamiento Primario.

El tratamiento primario tiene por objeto la remoción de la materia orgánica e inorgánica suspendida en las aguas residuales. Este nivel de tratamiento se efectúa mediante el uso de tanques de sedimentación, tanques imhoff, flotación y neutralización, a los cuales se les detallará más adelante.

4.2.1. Sedimentación.

Los tanques de sedimentación se emplean en el tratamiento de aguas claras y residuales para reducir la cantidad de sólidos suspendidos sedimentables lo cual se lleva a cabo normalmente en tanques que utilizan la fuerza ejercida por la gravedad.

Los procesos de sedimentación pueden ser discretos, floculentos o de zona.

La sedimentación discreta ocurre cuando las partículas mantienen su individualidad, tamaño, forma y densidad.

La sedimentación floculenta es aquella que ocurre cuando las partículas se aglomeran durante el período de sedimentación, con el resultado de un cambio en el tamaño de las partículas y en las velocidades de asentamiento.

En la sedimentación de zona, una suspensión floculenta forma una estructura reticular que se sedimenta como una masa completa. En este caso se observa una interfase en el proceso.

La eficiencia de la sedimentación depende de muchos fenómenos que, a su vez, dependen de muchas otras variables. Este universo de variables aún no han sido formuladas satisfactoriamente en forma matemática a fin que sean útiles para el diseño; todavía falta bastante por conocer en relación al complejo mecanismo de la floculación y de la hidráulica de los tanques de sedimentación. Actualmente los tanques de sedimentación operan casi exclusivamente en un sistema de flujo continuo aunque todavía se llega a emplear un sistema de operación intermitente (batch).

Un tanque de sedimentación idealizado estaría formado por las siguientes partes:

ZONA DE ENTRADA. Es la región en la que el gasto de entrada se distribuye uniformemente en toda la sección transversal del tanque de tal forma que el flujo a través de la zona de sedimentación sigue trayectorias horizontales.

ZONA DE SEDIMENTACION.- En esta zona el flujo es permanente y la concentración de cada tamaño de partícula es uniforme a través de la sección transversal de flujo.

ZONA DE SALIDA.- En ella, el efluente clarificado se colecta y descarga mediante un vertedor.

ZONA DE ALMACENAMIENTO DE LODO.- Es el área bajo la zona de sedimentación y que se encuentra disponible para almacenar el material sedimentado.

Finalmente, se sabe que la tasa de remoción es sólo función del área superficial y no interviene la profundidad del tanque.

4.2.2 Tanques Imhoff.

Estos dispositivos son usados para la eliminación de los sólidos sedimentables y la digestión anaerobia de los mismos.

El tanque imhoff consiste en un dispositivo de dos pisos en el que se consigue la sedimentación en el compartimiento superior y la digestión de los lodos sedimentados en el inferior. Los sólidos que se sedimentan atraviesan unas ranuras existentes en el fondo del compartimiento superior, pasando al compartimiento inferior para su digestión a la temperatura ambiente. La espuma se acumula en el compartimiento de sedimentación así como unos respiraderos de gas situados a los lados de aquéllos. El gas producido en el proceso de digestión en el compartimiento inferior se escapa a través de respiraderos.

En este tipo de equipos no existen partes mecánicas que mantener y su funcionamiento consiste, básicamente, en eliminar la espuma a diario y depositarla en algunas de las ventilas.

Asimismo, se debe invertir el flujo del agua periódicamente a fin de que la acumulación de lodos en la cámara de lodos sea uniforme.

Los lodos digeridos deben eliminarse en forma periódica, dependiendo del tiempo de retención que se prevea.

Los tanques imhoff convencionales sin calentamiento suelen ser rectangulares, aunque también se han empleado de forma circular pequeños. Cabe añadir como referencia, que este procedimiento ya no es empleado de manera generalizada en Europa actualmente.

4.2.3 Tanques de Flotación.

Como ya se explicó, las partículas o impurezas pueden ser separadas del agua por sedimentación si su peso es suficientemente mayor que su fuerza de flotación pero cuando la densidad de las partículas es muy cercana a la del agua en la que están suspendidas, la velocidad de sedimentación puede ser muy pequeña y el tiempo requerido sería entonces demasiado largo para su práctica. Bajo tales circunstancias, la separación puede ser acelerada uniendo pequeñas burbujas de gas a las partículas, de tal manera que la densidad de la nueva partícula compuesta (impureza más gas) sea apreciablemente menor que la del agua. Así la partícula flotará entonces hacia la superficie por lo tanto, los métodos de flotación por aire disuelto o disperso pueden ser usadas en el tratamiento de aguas residuales para separar las partículas que sean demasiado ligeras para sedimentar efectivamente pero muy pesadas para flotar sin ayuda.

Las burbujas para flotación pueden ser generadas por inyección de aire comprimido a través de difusores de agua, creando muchas pequeñas burbujas (flotación por aire disperso); o sobresaturando el agua con aire, de tal forma que las pequeñas burbujas de aire se forman como un exceso de aire que sale de la solución (flotación por aire disuelto).

Los componentes esenciales de un sistema de flotación son:

-Un tanque de presión, que constituye un aereador presurizado en el cual el aire a presión es disuelto en el agua

-Una válvula reguladora de presión, que mantiene la presión casi constante en el tanque de presión.

-Una compresora, que abastece aire para la solución a presión.

-Una bomba, que impulsa el agua dentro del tanque a presión.

-Una unidad de flotación, provista para la separación de impurezas del efluente clasificado.

Con frecuencia se incluye en estos sistemas una unidad para coagulación química donde las partículas coloidales son desestabilizadas para mejorar el crecimiento de las partículas y unión de las burbujas.

4.2.4 Neutralización.

Antes de su vertido al medio natural, es necesario llevar el pH de las aguas residuales a un valor dentro de la gama de 6.5 a 8.5 para asegurar una actividad biológica óptima especialmente para vertidos industriales excesivamente ácidos o alcalinos antes de sus tratamiento, aunque sólo sean vertidos al alcantarillado municipal.

Esto es debido a que resulta más económico neutralizar las corrientes industriales antes de la descarga más que intentar la neutralización de un volumen mayor de aguas residuales combinadas.

El proceso biológico en sí proporciona una neutralización y capacidad amortiguadora como resultado de la producción de bióxido de carbono (CO_2) que forma carbonatos y bicarbonatos en la solución.

Los métodos de neutralización para aguas residuales son:

a) Igualación por medio de la mezcla de corrientes ácidas y alcalinas disponibles y

b) Métodos directos de control de pH por medio de la adición de ácidos o bases para neutralizar corrientes alcalinas o ácidas respectivamente.

4.3 Tratamiento Secundario.

El tratamiento secundario aprovecha el principio biológico de la autopurificación de las aguas residuales, sin embargo, se puede proporcionar el tratamiento secundario al agua con procesos físico-químicos.

Es importante saber que en una planta de tratamiento a nivel secundario (biológico) es muy pequeña la fracción de sólidos disueltos que se puede remover.

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

El objetivo fundamental del tratamiento secundario es el de remover la mayor cantidad posible de materia orgánica. En los Estados Unidos de Norteamérica se define al tratamiento secundario como aquel proceso que logre la siguiente calidad en el efluente:

PARAMETRO	MEDIA MENSUAL	MEDIA SEMANAL.
Demanda biológica de oxígeno.	30mg/l	45mg/l
pH	6.0 - 9.0	6.0 - 9.0
Sólidos suspendidos	30 mg/l	45 mg/l

Los procesos de tratamiento biológico son esencialmente procesos bioquímicos en donde los microorganismos utilizan la materia orgánica y los nutrientes biológicos contenidos en los desechos para su reproducción. Desde el punto de vista práctico, se puede visualizar a los procesos biológicos de tratamiento como procesos de remoción de materia orgánica donde el producto resulta agua de calidad adecuada que puede ser reusada en varias actividades o bien como proceso de estabilización de la materia orgánica para obtener material sólido estabilizado además del agua que puede ser retornado al medio ambiente sin peligro.

La mayoría de los procesos físico y físico-químicos realmente se enfocan a la remoción de contaminantes, prevaleciendo el problema de sus disposición final mientras que los procesos biológicos estabilizan el material removido facilitando así su disposición final.

Los sistemas de tratamiento secundario o biológico pueden ser agrupados en tres grandes categorías:

a) Digestión Aerobia, que considera la presencia de oxígeno disuelto con el fin de que la estabilización de la materia orgánica se lleve a cabo bajo condiciones aerobias.

b) Digestión Anaerobia que estabiliza el material orgánico en ausencia total de oxígeno disuelto y cuya particularidad importante es la generación de subproductos con alto valor energético y

c) Lagunas de Estabilización, en donde la estabilización de la materia orgánica es el producto del proceso simbiótico entre algas y bacterias. Cabe señalar que, como en cualquier clasificación, existen variantes que no pueden ser identificadas estrictamente en una de las categorías mencionadas.

Otras variantes que se pueden considerar para una clasificación corresponden a los procesos en donde los microorganismos están en suspensión o bien están adheridos a un medio fijo o bien es una combinación de éstos. Estas variantes son un intento por incrementar la población microbiana activa, que puede entrar en contacto con la materia orgánica presente en las aguas residuales y efectuar su estabilización rápidamente. En los procesos aerobios con microorganismos en suspensión la agitación tiene como objetivo el transferir oxígeno y poner a los microorganismos en contacto con la materia a degradar. En muchos casos se utiliza la recirculación de microorganismos en altas concentraciones para aumentar la población biológica activa y acelerar el proceso. En los procesos con medio fijo, los

microorganismos se adhieren a las paredes del medio permaneciendo en el sistema en cantidades adecuadas para que el metabolismo de la materia orgánica se lleve a cabo en tiempos de retención cortos. La combinación de estos procesos se ha llevado a cabo más bien a nivel experimental aunque ya se han construido reactores con este fin.

En los sistemas anaerobios con microorganismos suspendidos la agitación se realiza principalmente para poner en contacto a los microbios en el sustrato; y en sistemas para estabilización de sólidos la agitación cumple una segunda función al incrementar la hidrolización de los sólidos para que puedan ser aprovechados por las bacterias.

Por otra parte, se puede decir que los sistemas de tratamiento biológico tratan de proporcionar a los organismos las condiciones óptimas para que desarrollen sus funciones metabólicas y de esa forma transformen y estabilicen la materia orgánica. A continuación se presenta una clasificación de los procesos biológicos de tratamiento.

4.3.1 Procesos Aerobios.

A). En medio suspendido:

a) Lodos Activados. En este proceso, el agua residual se estabiliza biológicamente en un reactor, que es un tanque donde se mantiene una base bacteriana mediante lodo activado. La estabilización de la materia orgánica tiene lugar bajo condiciones aerobias, las que se logran a base de inyección

mecánica de aire o por difusión de oxígeno. Normalmente no es necesario agregar otros nutrientes al agua, aunque en caso de presentarse deficiencias de alguno de ellos, se deberán agregar.

Al contenido de un reactor se le denomina licor mezclado. 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. Otra parte de los lodos son eliminados o purgados fuera del sistema puesto que, de no ser así, la masa de microorganismos seguirá aumentando hasta que en el sistema no pudiera haber cabida para más.

El nivel al cual se debe mantener la masa biológica depende de la eficiencia deseada del tratamiento y de otras consideraciones referentes a la cinética del tratamiento.

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

a.1) Convencional. El proceso convencional de los lodos activados consiste en un tanque de aireación, 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. El modelo de flujo es de tipo pistón, esto es, tanto el agua residual efluente sedimentada, como el lodo recirculado entran al tanque por un extremo y son aireados durante un espacio de 6 horas más o menos. Ambos son mezclados por la acción de la aireación mecánicas 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, floculación y oxidación de la materia orgánica. El licor mezclado se hace sedimentar en un tanque para clarificación de, aproximadamente, 25 al 50% del gasto influente.

a.2) Mezcla completa. El proceso de mezcla completa intenta imitar el régimen hidráulico existente en un reactor agitado mecánicamente. El agua residual afluyente es sometida a sedimentación y el lodo de retorno se introduce en diversos puntos del tanque de aireación a lo largo de un canal central. El licor mezclado es aereado conforme pasa desde el canal central a los canales de salida situados a ambos lados del tanque de aireación. El efluente del tanque de aireación es sometido a sedimentación deteniendo lodo activado. La carga orgánica en el tanque de aireación y la demanda de oxígeno son uniformes de uno a otro lado del tanque. El licor mezclado al ir atravesando el tanque de aereación, desde la entrada hasta el canal efluente está completamente mezclado por medio de la aereación mecánica o por difusores de aire.

a.3) Aereación Graduada. El objetivo que persigue la aereación graduada es acoplar la cantidad de aire suministrada a la demanda de los microorganismos conforme el agua atraviesa el tanque de aeración. La aireación graduada afecta únicamente a la disposición de los difusores en el tanque de aireación y a la cantidad de aire consumido, su uso está muy extendido y en un 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 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 espaciamento entre los difusores aumenta entonces hacia la salida del tanque a fin de reducir la tasa de oxigenación.

a.4) 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 activado 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

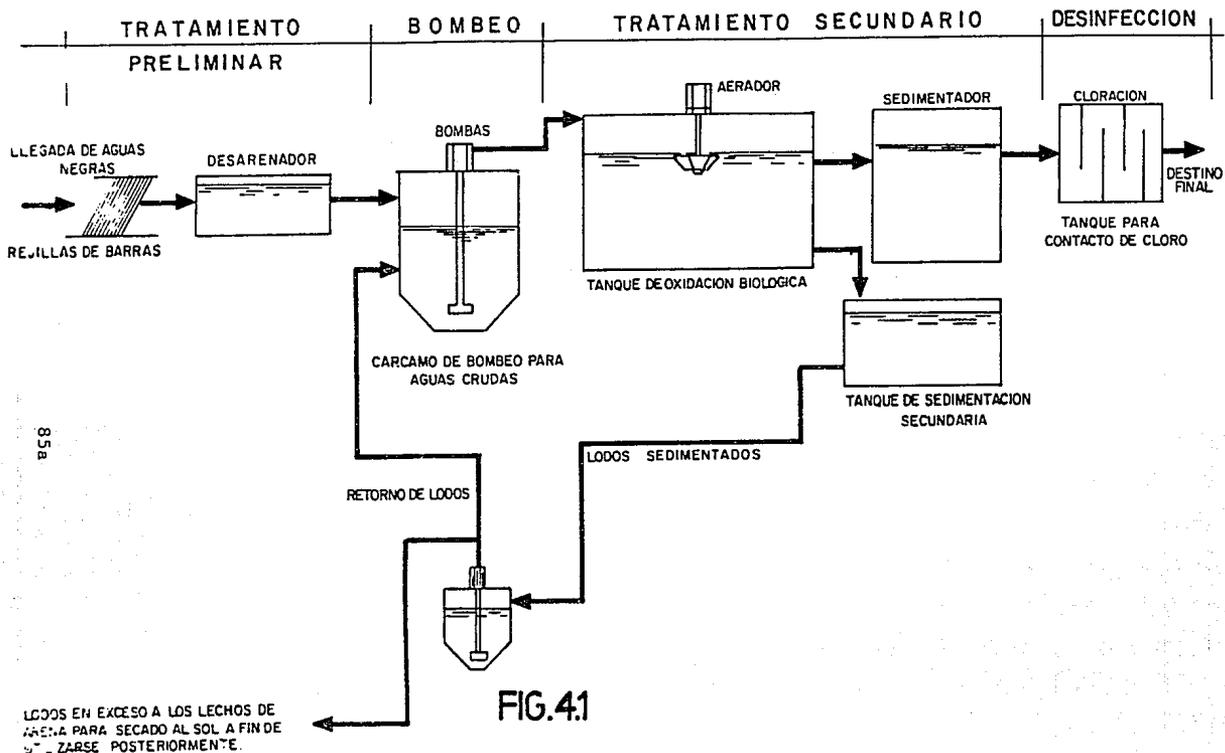
escalonada la demanda de oxígeno se distribuye más uniformemente a todo lo largo del tanque de aeración dando como resultado una mejor utilización del oxígeno suministrado.

b) Zanjas de oxidación. 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 le hace circular junto con lodos activados para formar así, el licor mezclado. Esta masa de agua se airea 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 innecesaria la instalación de digestores de lodos.

Las zanjas con admisión de agua cruda y extracción de agua tratada continua están formadas por una zanja o canal en forma de anillo alargado y tienen adosadas dos fosas secundarias que sirven de sedimentadores secundarios.

c) Lagunas aireadas por medios mecánicos. Una laguna aireada 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



ESQUEMA GENERAL DEL TRATAMIENTO SECUNDARIO

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.

B). En medio fijo:

a) Filtros percoladores. El filtro precolador consiste en un lecho formado por un medio sumamente permeable al que se le adhieren los microorganismos y a través del cual se filtra el agua residual. Algunos materiales comúnmente usados para medios filtrantes son: roca volcánica, antracita, escona o medios sintéticos.

La materia orgánica presente en el agua residual es degradada por una población de microorganismos adherida al medio. Dicha materia orgánica es absorbida sobre la película biológica o capa viscosa, en cuyas capas externas es degradada por los microorganismos aerobios. Cuando los microorganismos crecen, el espesor de la película aumenta y el oxígeno es consumido antes de que pueda penetrar todo el espesor de la película, por tanto se establece un ambiente anaerobio cerca de la superficie del medio.

Conforme la película aumenta de espesor, la materia orgánica absorbida es metabolizada antes de que pueda alcanzar a los microorganismos situados cerca de la superficie del medio filtrante. El resultado de no disponer de una fuente orgánica externa de carbono celular, es que los microorganismos situados

cerca de la superficie del medio filtrante se encuentran en la fase endógena de su crecimiento en la que pierden su capacidad de adherirse a la superficie del medio. En estas condiciones, el líquido pasa a través del medio, arrastra la película y comienza el crecimiento de otra nueva. Este fenómeno de la pérdida de la película biológica es fundamentalmente función de la carga hidráulica y orgánica del filtro.

La carga hidráulica, las velocidades de arrastre y la carga orgánica influyen en la velocidad del metabolismo en la película biológica. En base a estas cargas hidráulicas y orgánica los filtros suelen dividirse en los de baja y alta carga.

b) Discos Biológicos. Es uno de los sistemas más recientes de tratamiento biológico es el contacto biológico rotatorio comúnmente conocidos como biodiscos o discos biológicos. Se trata de un sistema biológico aeróbico 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 material plástico (el más utilizado) de alta densidad, polietireno o poliestireno, de 3 a 4 metros de diámetro, soportados en una flecha horizontal e instalados en un tanque de concreto. La flecha y el medio plástico se hacen girar por medio de un mecanismo motriz acoplado a la flecha, a una velocidad de entre 1 y 2 r.p.m. manteniendo aproximadamente el 40% del área superficial del tambor sumergida en el agua residual. Los

organismos 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 discos, 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.

Cabe señalar finalmente, que los dos métodos físicos para aerear el agua residual son:

- i) introducir aire u oxígeno puro por medio de difusores porosos sumergidos o boquillas y
- ii) Agitar mecánicamente el agua residual de modo que se promueva la disolución del oxígeno de la atmósfera.

4.3.2 Proceos Anaerobios.

La cinética del tratamiento anaerobio puede ser descrita en tres pasos:

- a) Hidrólisis de compuestos de alto peso molecular, esto es, una hidrólisis enzimática de las sustancias orgánicas complejas, dando por resultado compuestos orgánicos solubles más simples.

b) Formación de ácidos volátiles que consiste en la conversión bacteriana de estos compuestos a sustancias orgánicas de bajo peso molecular, principalmente a ácidos grasos volátiles.

c) Producción de metano, en donde los productos anteriores son fermentados por bacterias estrictamente anaerobias a metano y dióxido de carbono principalmente, los cuales constituyen los productos finales del proceso. Del conjunto de los principales sistemas de tratamiento anaerobio presentados brevemente a continuación, el más estudiado y generalizado hasta la fecha reciente es el que lleva a cabo la digestión de lodos de plantas de tratamiento. Los avances en la tecnología propia del proceso han generado alternativas de tratamiento para una gran cantidad de aguas residuales domésticas e industriales.

La selección del sistema más adecuado dependerá las características generales del residuo tales como cantidad, composición, contenido de sólidos, temperatura, etc. Los sistemas a su vez, diferirán en complejidad y eficiencia.

a). Digestión Anaerobia.

Cuando el porcentaje de sólidos en el agua residual a tratar es elevado, mayor al uno por ciento, y de éste una fracción importante es suspendida, la hidrólisis será una función fundamental en el proceso. Si esto sucede, se puede considerar que se trata de una digestión, es decir, de una destrucción de sólidos.

El anterior es el caso de los llamados lodos de desecho municipales y de los residuos agrícolas y ganaderos en general. Para su tratamiento existen diversos sistemas, con diferentes requerimientos de capital, equipo y energía y cuidado en la operación e igualmente las eficiencias son muy variadas.

En este caso, en un sólo reactor puede llevarse a cabo la estabilización y la separación de sólidos de manera que el contenido se estratifica en capas bien características y muy diferentes entre sí. El influente entra al digestor a la altura de una capa activa o sobrenadante, sobre la que se encuentra: una capa de nata y otra de gas por encima; y una capa activa y otra de lodos digeridos con su salida respectiva hacia abajo. Los sólidos estabilizados se sedimentan en el fondo del digestor para posteriormente evacuarse; el sobrenadante está constituido por la fase acuosa estabilizada y las natas las forman materiales poco densos y espuma.

Las principales desventajas de esta variante son el volumen importante del reactor debido a los largos tiempos de retención, las relativamente bajas cargas orgánicas (15,000 a 10,000 mg/l como DBO) que puede soportar y la formación de zonas muertas por lo que sólo aproximadamente un tercio del volumen total es utilizado en la digestión propiamente dicha.

Su eficiencia es aceptable sólo en tiempos de retención mayores a los 20 días, lo cual implica un reactor de tamaño considerable.

b) **Lagunas anaerobias de estabilización.** Estas lagunas son anaerobias en toda su profundidad, excepto en una capa extremadamente delgada en la superficie. Con objeto de conservar la energía térmica y mantener las condiciones anaerobias, estos estanques se construyen a profundidades de hasta 6 m. La estabilización se consigue mediante una combinación de precipitación y degradación anaerobia de los residuos orgánicos a CO₂ y CH₄ y otros productos finales gaseosos, ácidos orgánicos y tejidos capilares.

4.4 Tratamiento Terciario o Avanzado.

El tratamiento terciario o avanzado se realiza para eliminar contaminantes que no se renueven totalmente en los procesos de tratamiento secundario. Estos contaminantes incluyen: compuestos inorgánicos solubles tales como fósforo y nitrógeno que fortalecen el crecimiento de plantas acuáticas en los cuerpos de agua receptores, materiales orgánicos que contribuyen a la Demanda Biológica y Química de oxígeno (DBO y DQO); color, sabor y olor; bacterias y virus; sólidos coloridales que producen turbiedad; minerales solubles; metales pesados; sales orgánicas y organismos patógenos que pueden interferir con el reuso del agua.

El propósito del tratamiento terciario puede ser el de mitigar la contaminación de los cuerpos de agua receptores o el de proporcionar una calidad de agua adecuada para reuso o para

ambos. Los procesos de tratamiento terciario se pueden aplicar a continuación, en conjunto con, o reemplazando al tratamiento secundario.

El proceso que vino realmente a hacer posible el tratamiento avanzado fue el de filtración puesto que los avances logrados con la llamada filtración profunda a diferencia de la filtración superficial convencional en medios granulares permitió incrementar la carga superficial sobre el filtro al mismo tiempo que se incrementaba la carrera del filtro aún con agua residual tratada. Esto se logró primordialmente con la introducción de lechos mixtos de materiales de diferente peso específico que permiten la colocación de los materiales a manera de tener una porosidad que disminuye en el sentido del flujo. Una vez logrado este avance fue posible incorporar al tratamiento de aguas residuales los procesos ya existentes para el tratamiento de aguas residuales.

En seguida se presentan algunas generalidades de los procesos más usados en el tratamiento avanzado de aguas residuales.

4.4.1 Remoción de Fósforo.

A) Remoción Biológica. El tratamiento biológico convencional remueve parte del fósforo presente en el agua al incorporarlo en el tejido de los microorganismos. este proceso se puede incrementar promoviendo el aprovechamiento de fósforo en exceso por parte de los microorganismos y en algunos casos se han obtenido remociones del orden del 95%, sin embargo, el proceso tiene una variabilidad tan grande que lo hace poco confiable.

B) Remoción Biológica-Química. En este proceso, la remoción de fósforo se logra en el mismo tratamiento secundario adicionando sales de hierro o aluminio en el tanque de aereación. Este proceso da buenos resultados cuando la concentración de fósforo que se requiere no es menor de 1 mg/l. Este proceso produce además un efluente con menor turbiedad, color y sólidos suspendidos que el tratamiento secundario o convencional.

C) Remoción Físico-química. En este proceso la remoción de fósforo se realiza mediante la adición de cal, sulfato de aluminio o sales de hierro. La remoción que se logra es del 95 al 98% de fósforo. Este proceso tiene la ventaja de remover además del fósforo, sólidos suspendidos, materia orgánica, mejora el aspecto del agua, reduce el contenido de organismos coliformes y de virus y el de metales pesados.

4.4.2 Remoción de Nitrógeno.

a) Remoción Biológica. El proceso de remoción biológica de nitrógeno consiste en la oxidación de los compuestos nitrogenados presentes en el agua residual a nitratos de condiciones aeróbicas. Una vez lograda esta oxidación, los nitratos pueden reducirse a nitrógeno gas en condiciones anaeróbicas. El proceso de oxidación se conoce como nitrificación, que ha probado ser efectivo para su operación ha resultado complicada por tratarse de los sistemas biológicos en serie. Sin embargo, puede resultar adecuado en México ya que funciona mejor en altas temperaturas que en las bajas.

b) Cloración al punto de quiebre. Este proceso consiste en aplicar una dosis de cloro tal, que las compuertas nitrogenadas reducidas se oxiden hasta formar nitrógeno gas. El proceso es confiable con una eficiencia del 99% y tiene la ventaja de oxidar materia orgánica y desinfectar el agua. La principal desventaja es el alto costo, ya que requiere una dosis de 9 mg/l de cloro por cada 1 mg/l de nitrógeno amoniacal. Además se producen compuestos orgánicos cerrados tóxicos que pueden disminuir la utilidad del agua.

c). Desorción de amoníaco. Este proceso consiste en elevar el pH del agua a un nivel tal que todo el nitrógeno amoniacal presente en el agua se convierta en amoníaco para posteriormente disiparlo en la atmósfera. Este proceso resulta muy efectivo en climas cálidos, cuando se utiliza después de un proceso de coagulación con cal, su costo es muy bajo.

d) Intercambio Iónico. Este proceso consiste en remover el nitrógeno con resina de intercambio selectiva natural conocida como clinoptilolita. La regeneración se realiza con sal muera. El amoníaco puede extraerse de la sal muera con ácido sulfúrico para producir sulfatos de amoníaco que sirve como fertilizante. El proceso es simple y a la vez efectivo. El principal problema en la operación corresponde a la extracción del amoníaco de la salmuera.

4.4.3 Remoción de Sólidos Suspendidos.

a). Coagulación química. La cual es adecuada para la remoción de sólidos, sin embargo, los resultados son similares a los obtenidos con filtración a un costo mayor principalmente por el manejo del lodo producido. Este tratamiento es efectivo cuando también se requiere remover fósforo.

b). Filtración. Es el proceso más efectivo para la remoción de sólidos. Los filtros de medio mezclado han resultado mejores. La filtración puede mejorar con la adición de polímeros. Es el proceso más económico cuando se requiere remover sólidos.

c). Microtamices. La utilización de estos medios mecánicos de filtración ha dado como resultado que no son comparables a los obtenidos con los otros dos procesos debido a su baja eficiencia.

4.4.4 Remoción de Materia Orgánica Soluble.

a). Carbón activado granular. El proceso consiste en la absorción de los compuestos orgánicos presentes en el agua por medio del carbón activado. El proceso es eficiente, confiable y, comparado con los resultados que se obtienen, económico. Este proceso reduce el contenido de materia orgánica, lo cual resulta en una mejoría notable en las características organolépticas del agua tratada. Se emplean columnas de flujo ascendente y descendente: las de flujo ascendente tienen la ventaja de permitir el paso de sólidos y por lo tanto no se pierde carga hidráulica ni se taponan, no obstante, el roce de las partículas

de carbón produce partículas finas de carbón que aparecen en el efluente; por su parte, las columnas de flujo descendente no tienen este último problema pero pueden taponarse antes de que se termine su capacidad de intercambio.

El carbón debe regenerarse una vez usado. Esto se logra en hornos construidos para tal efecto en la cual la regeneración se realiza en tres pasos: secado a 100°C; cocido (de la materia absorbida) a 600°C; y activado a 1000°C. La instalación de hornos de regeneración solo se justifica en plantas con capacidad del orden de 800kg/día de carbón o sea, aproximadamente 300 lps.

b). Carbón activado en polvo. Este proceso resulta muy eficiente debido a que el carbón en polvo tiene una mayor área activa que el granular. El carbón se mezcla con el agua y se remueve por sedimentación. Por otra parte, el proceso puede considerarse como complicado debido al manejo del polvo y por las pérdidas en la regeneración.

c). Ozonación. El ozono es un oxidante poderoso que aparentemente no produce el tipo de compuestos tóxicos que se obtienen con el cloro. En las pruebas respectivas se ha encontrado que su eficiencia en la oxidación de materia orgánica como DQO es aproximadamente 50% sin embargo, la reacción es lenta.

d). Osmosis Inversa. El fenómeno de la ósmosis inversa aparece cuando dos soluciones de diferentes concentraciones de soluto están separadas por una membrana semipermeable como el celofán. El agua tiende a pasar a través de la membrana del lodo más diluido al más concentrado, produciendo concentraciones y

sales de soluto en ambos lados de la membrana. Por lo tanto, aplicando presión del lado concentrado, puede lograrse una solución diluida en el otro lado. Los equipos para este proceso son en su totalidad patentados y se diferencian básicamente en la forma de colocar las membranas, ya sea en forma espiral, tubular o de fibra hueca. Los requerimientos de energía son del orden de 2.7 kmh/m³ de agua producida y se recupera del 75 al 85% del agua. Aún cuando el objetivo principal de este proceso es la remoción de sales, las membranas utilizadas producen una remoción considerable de materia orgánica, turbiedad y organismos patógenos. La principal desventaja de este proceso son la poca duración de las membranas y a la susceptibilidad al daño del proceso por mala operación. Este proceso tiene gran futuro sobre todo para la remoción de compuestos orgánicos tóxicos pero con el inconveniente de sus altos costos.

4.4.5 Remoción de Sólidos Disueltos.

a). Intercambio Iónico. Este proceso es muy usado en la Industria para el tratamiento de agua de calderas y de agua de proceso industrial. Generalmente se utilizan dos lechos de resinas: una para la remoción de aniones y otra para la remoción de cationes, aún cuando existen procesos que utilizan medios mezclados. Las eficiencias de remociones son superiores al 90% del contenido de iones. Su uso no es muy extendido en tratamiento avanzado debido a que es muy selectivo a diferencia del proceso de ósmosis inversa.

b). **Electrodiólisis.** Este proceso se ha empleado para la producción de agua potable a partir de aguas salobres y consiste en promover la migración de los iones presentes en el agua a través de membranas bajo la influencia de una corriente eléctrica. El proceso es selectivo a los contaminantes orgánicos y no tiene las ventajas de la ósmosis inversa. Otro factor importante a considerar, es que a medida que se reduce la concentración de iones el costo de la energía se incrementa.

c). **Destilación.** Este procedimiento se utiliza principalmente para la desalación de agua de mar, sin embargo, en el campo del tratamiento de agua residual tiene la desventaja de que los compuestos orgánicos son arrastrados en el destilado y aparecen en el efluente de la planta.

d). **Ósmosis inversa.** Este proceso útil para la remoción de materia orgánica soluble es útil también para la remoción de sólidos disueltos y su aplicación ya fue dada en ese punto anterior.

4.4.6 Remoción de Organismos Patógenos.

a). **Cloración.** La desinfección con cloro se ha venido usando con éxito desde hace mucho tiempo puesto que la destrucción de organismos patógenos que se realiza es bastante buena. Su desventaja es debido a la formación de productos químicos peligrosos debido a su aplicación.

b). Ozonación. El ozono se utiliza para la desinfección con mucho éxito en Europa puesto que es un bactericida efectivo en la remoción de virus. Su total eficiencia en la remoción de otro tipo de organismos no ha sido probada.

c). Dióxido de cloro. Este producto se ha usado con éxito en aplicaciones industriales que requieren oxidantes potentes. Aún cuando se ha estudiado extensamente y ha dado buenos resultados su uso no se ha extendido debido a los peligros de su preparación a partir de cloro gaseoso y clorito de sodio.

d). Luz ultravioleta. Este proceso consiste en pasar luz ultravioleta a través del agua a tratar. Para lograrlo, se requiere de agua muy clara y en capas muy delgadas, lo cual complica el diseño operacional del proceso.

Remoción esperada de Contaminantes por proceso Unitario de Tratamiento.

Parámetro	Proceso Unitario de Tratamiento																	
	TP	LA	NI	DN	FP	DB	CF	FA	AC	RA	II	CP	OI	ES	RI	IP	CL	OZ
D.B.O.	*	+	+	X	+	+	+	*	+		*		+	+	+	+		X
D.Q.O.	*	+	+	X	+		+	*	*	X	*		+	+	+	+		+
C.O.T.	*	+	+	X	*		+	*	+	X	*		+	+	+	+		+
Sólidos susp. tot.	+	+	+	X	+		+	+	+		+			+	+	+		+
Sólidos dis. tot.														+				
Turbiedad	*	+	+	X	*		+	+	+					+	+	+		+
Color	X	*	*		X		+	*	+					+	+	+		+
Nitrógeno Amoniacal	X	+	+	*			+	X	*	*	+	+	+	+	+	+		+
Nitrógeno Nitratos				+				*	*	X				*				+
Fósforo	X	*	+	+			+	+	+				+	+	+			+
Alcalinidad		*					*	+										*
Grasas y Aceites	+	+	+				*		*						+	+		+
S.A.A.M.	*	+	+		+		*		+				+	+	+	+		X
Coliformes totales		+	+		X		+	+	+			+		+	+	+	+	+
Arsénico	*	*	*				*	+	*									
Bario		*	X				*	X										
Cadmio	*	+	+		X	*	+	*	X									X
Cromo	*	+	+		X	+	+	*	*									
Cobre	*	+	+		+	+	+	X	*									*
Fluor							*		X									*
Fierro	*	+	+		*	+	+	+	+									
Plomo	+	+	+		*	+	+	*	*									*
Manganeso	X	*	*		X		*	+	*				+					
Mercurio	X	X	X		X	+	X	*	X									
Selenio	X	X	X		X		X	+	X									
Plata	+	+	+		*		+		*									
Zinc	*	*	+		+	+	+		+									+

Simbología + > 50% 25 < * < 50% x < 25%

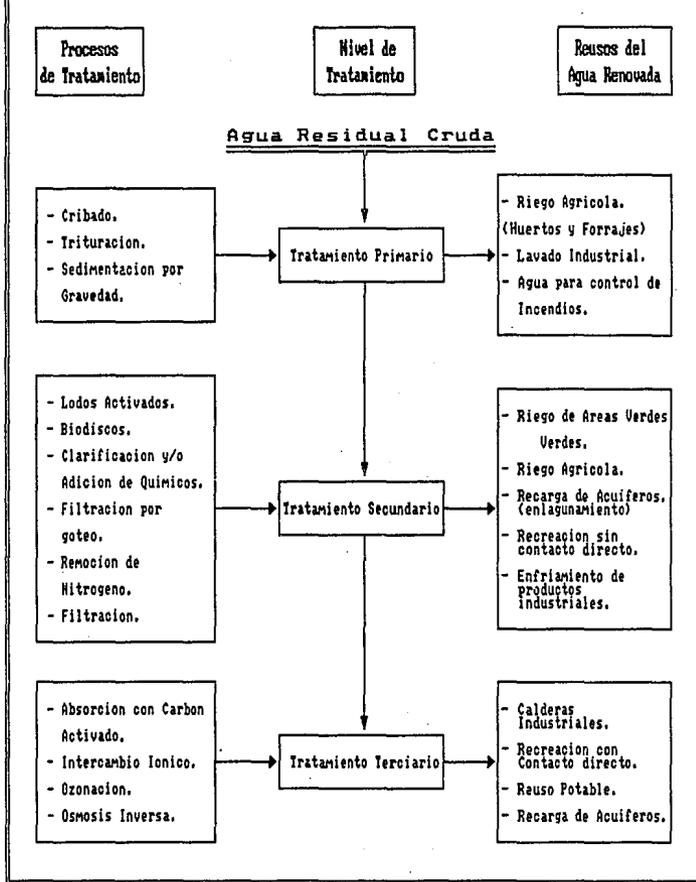
Si no hay indicación, no existen resultados concluyentes.

Donde:

TP: Tratamiento Primario, LA: Lodos Activados, NI: Nitrificación, DN: Denitrificación, FP: Filtros Percoladores, DB: Discos Biológicos, CF: Coagulación-Floculación-Sedimentación, FA: Filtración después de LA, AC: Adsorción con Carbón, RA: Remoción de Amoniac, II: Intercambio Iónico, CP: Cloración a punto de ruptura, OI: Osmosis Inversa, ES: Esgurrimiento Sup., RI: Riego, IP: Infiltración-Percolación, CL: Cloración, OZ: Ozonación.

Cuadro 4.1

Niveles de Tratamiento Requeridos para la Reutilizacion del Agua Renovada segun su Uso.



Cuadro 4.2

5. Criterios Generales y Constructivos para Optimizar el Costo del Agua Renovada.

5.1 Esquema General de Implantación de una Planta de Tratamiento de Agua Residual.

El proyecto de un sistema de tratamiento sigue una serie de pasos, desde su concepción original, motivada por la necesidad de proteger la calidad del medio ambiente o por el deseo de aprovechar las aguas residuales, hasta la etapa en que la instalación 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.

5.1.1 Planeación.

Es la actividad encaminada a la concepción física de la obra que satisfaga los requerimientos de operación y destino final del proyecto. En esta etapa deben resolverse diversos aspectos, frecuentemente conflictivos, entre 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 los estudios de factibilidad técnica, económica, social y financiera.

5.1.2 Diseño.

Es la actividad que incluye el dimensionamiento y selección de los materiales que conforman toda la obra, tanto de estructuras permanentes como provisionales. El producto final esta foramdo por planos y especificaciones catálogo 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.

5.1.3 Construcción.

En sí es la ejecución física de la obra, es la etapa que incluye la erección de todo tipo de estructuras, permanentes y provisionales, y sus instalaciones integrales. En esta etapa se llevan a efecto (hasta su fin) los diseños realizados, manteniendo los controles de calidad, de tiempo de ejecución y de costo de la obra.

5.1.4 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 fue 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, por ejemplo) y correctivo (emergencias, rehabilitación y reposición).

5.1.5 Abandono.

Al término de su vida útil, las obras deben retirarse del servicio por obsolescencia funcional, economía, fatiga 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.

5.2 Localización de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

Es conveniente determinar el lugar en que se ha de instalar una planta de tratamiento en dos etapas: en la primera se seleccionará el área general en se se estima conviene localizar la planta y, en la segunda, se elegirá la ubicación precisa para efectuar su construcción.

I. Factores determinantes de la localización de la Planta.

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

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 implican consideraciones sobre la distribución y movilidad económica del agua tratada.

La distancia que deba recorrer el agua tratada desde la planta hasta el consumidor así como el costo que esto implica son directamente proporcionales. Al acercarse la planta al consumidor se reduce el costo de transportarla, pero puede incrementarse de manera significativa el costo de transportar las aguas residuales hasta la planta. Es por ello que la localización consistirá esencialmente en efectuar una comparación de los costos de transporte y de las pérdidas económicas originadas por la disminución en los volúmenes de las aguas.

Para realizar el análisis económico mencionado, es necesario establecer correlaciones matemáticas entre los costos de transporte y los desperdicios por pérdidas hidráulicas, a diferentes tipos de tratamiento y diferentes distancias a recorrer según las diversas localizaciones. Dichas correlaciones señalarán las ubicaciones en que la suma de los costos totales del transporte será mínima, de esta manera será posible ordenar todos los puntos geográficos de localización factibles en niveles del mismo orden de magnitud de costos de transporte.

Además de los factores mencionados, también influyen en la localización de una planta de tratamiento los siguientes factores:

3. Mano de obra (disponibilidad y características).
4. Facilidad de Transporte.

5. Costos de Energía.
6. disponibilidad de predios.
7. Facilidad de eliminación de desechos.
8. Disposiciones legales, fiscales o de política económica.
9. Actitud de la comunidad.

II. Factores determinantes de la ubicación de la Planta.

La determinación del sitio específico para la ubicación definitiva de la Planta de Tratamiento 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.

5.3 Recomendaciones para la obra civil de Plantas de Tratamiento.

Para construir y operar una planta de tratamiento se requiere de un proceso que consume tiempo e inversión. Durante la realización del proyecto se modificará parte o todo el diseño original dadas las condiciones de cada tipo de obra. Para el tratamiento del agua no existe un proyecto prototipo, ya que las características hidráulicas y químico-biológicas del influente, la calidad requerida del agua tratada, las etapas de tratamiento seleccionadas, el tipo de subsuelo el costo que los beneficiarios están dispuestos a pagar y los procedimientos constructivos proporcionan un resultado único y diferente.

En el país se han construido aproximadamente 400 plantas de tratamiento de aguas residuales (Ref. 5.2). Se estima que tienen problemas un 90% y que están fuera de servicio el 50% por limitaciones económicas para operarlas y rehabilitarlas, por baja eficiencia en el tratamiento o por deficiencia en su obra física. Las inversiones por construcción y equipamiento son muy importantes, entre 4,000 y 200,000 millones de pesos por metro cúbico por segundo de capacidad instalada, según el sistema biológico utilizado. La operación presenta costos entre \$26/m³ y \$921/m³ de agua tratada, lo cual se estudiará con más detalle más adelante en este capítulo.

5.3.1 Factores que influyen en el costo de la Obra Civil de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

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 ruptura de tuberías.

A. Condiciones Topográficas.

Para una operación que reduzca los consumos de energía al mínimo necesario, el flujo de la planta debe ser por gravedad. Esta situación se logra aprovechando la topografía, ubicando a las estructuras a diferentes niveles, considerando las tolerancias que deben existir entre cada fase del proceso. En caso de no contar con una topografía horizontal, se puede instalar un cárcamo de rebombeo ubicado según las condiciones de la planta.

B. Condiciones Geotécnicas.

Los sitios disponibles para construir plantas de tratamiento son en muchos casos terrenos de inundación donde el subsuelo puede estar formado por materiales blandos, con niveles freáticos superficiales, por lo que se requiere elegir una cimentación

adecuada y en ocasiones, realizar un tratamiento del terreno. Cuando la localización de una planta es en un cauce, la estratigrafía será heterogénea y se puede presentar una amplia variedad de materiales, desde fragmentos de roca y boleos, hasta suelos finos como limos, arcillas y materia orgánica distribuidos erráticamente. Otros sitios disponibles son zonas de relleno reciente, que en forma frecuente se encuentran en estado suelto y requieren también de un mejoramiento. En todos los casos, es indispensable conocer los materiales bajo cada estructura importante; cuando menos hasta una profundidad igual al ancho de la estructura o hasta encontrar material firme.

C. Cimentación.

En general, la capacidad de carga del terreno será suficiente para desplantar las estructuras típicas de una planta de tratamiento de aguas residuales, sin embargo, no ocurre lo mismo con las características de deformabilidad, sobre todo en suelos blandos, por lo que debe analizarse la interacción entre estructuras, el asentamiento total y los hundimientos diferenciales. Para reducir el efecto de interacción entre estructuras rígidas y cimentadas a poca profundidad, es conveniente una separación de 1.5 veces el ancho de la estructura mayor. se podría pensar que una cimentación sobre pilotes es capaz de resolver cualquier situación desfavorable del terreno, sin embargo, esta alternativa, además de costosa, tiene el inconveniente de que las estructuras menores y las conducciones, al no poseer este tipo de cimentación, tendrían desplazamientos verticales diferentes a las estructuras mayores, con las

consecuentes modificaciones de las cargas hidráulicas y la posible ruptura de las conducciones. En suelos blandos no es frecuente utilizar una cimentación superficial a menos que se utilicen rellenos para lograr los niveles hidráulicos necesarios. La cimentación más empleada en tanques de concreto es la compensada total o parcialmente. No es conveniente tener estructuras sobrecompensadas, ya que el suelo puede sufrir expansiones que reducen la diferencia de niveles hidráulicos, sobre todo en las últimas fases del tratamiento. En suelos deformables, debe evitarse la ocurrencia de excentricidades permanentes que desnivelen las estructuras, por lo que es recomendable que éstas se proyecten con distribuciones simétricas y que transmitan esfuerzos uniformes. Las cimentaciones con celdas para compensación y renivelación, además del costo que implica, no son fáciles de operar, por lo que se deberá adoptar esa alternativa cuando no haya otra viable.

En Lagunas es frecuente el empleo de excavaciones y/o formación de bordos. En suelos blandos, las excavaciones pueden producir expansiones, a veces agrietamientos del fondo y en casos extremos, falla del fondo, condiciones que deben preverse. En bordos se deben considerar los asentamientos a largo plazo y en zonas de concentración de cargas o en que se instalarán estructuras rígidas, deberán construirse las terracerías antes que los elementos de concreto. Si el terreno es firme, como roca o suelos compactos, los movimientos diferenciales serán

pequeños. La presencia de niveles freáticos superficiales o la existencia de estratos impermeables bajo las estructuras deben ser considerados siempre en el análisis de flotación.

D. Filtraciones y Fugas.

Permeabilidad. Los suelos finos serán casi siempre impermeables si no están agrietados; las arenas y gravas limpias, por el contrario, serán muy permeables, por lo que requieren de un recubrimiento impermeable. En lagunas con fondo permeable se han utilizado los materiales térreos compactados, concreto asfáltico y geomembranas. Bajo estos materiales, se instala un sistema de drenaje que evita la subpresión del agua y de los gases, reduciendo las posibilidades de levantamiento del recubrimiento. La mayoría de las geomembranas requieren ser cubiertas con concreto simple o suelo que las proteja de los rayos solares y de la abrasión. Algunos recubrimientos a base de láminas de asfalto (Rhino Hide), han manifestado un mal comportamiento por mal sellado de juntas y deficiente calidad, por lo que su uso no es recomendable.

Fugas. En el concreto hidráulico, las principales causas de fugas son las discontinuidades, producto de una ejecución deficiente de la obra. En tanques de concreto, en ocasiones es contraproducente el empleo de los selladores de juntas comunes de PVC que dificultan los colados y favorecen las fugas, por lo que es mejor utilizar adhesivos epóxicos. No es recomendable tampoco el uso de selladores de polisulfuro, el cual es atacable por las aguas residuales. En el caso de discontinuidades

grandes, como juntas frías mal tratadas, grietas y concreto poroso, deben repararse conforme se indica en la literatura especializada (IMCYC, 1988; S.A.R.H., 1970).

Cuando se utiliza concreto asfáltico para impermeabilizar lagunas, se requiere el empleo de al menos dos capas: la inferior, porosa, con espesor mínimo de 7.6 cm, bajos contenidos de cemento asfáltico (2 a 6%) y la superior, impermeable, de 2.5 cm de espesor mínimo, con cemento asfáltico en proporción del 6.5 a 9.5%. Puede aplicarse sobre la superficie un tratamiento a base de emulsión asfáltica catiónica de rompimiento rápido como sello.

Bajo ninguna circunstancia deben existir fugas del agua de proceso hacia la superficie o interior del terreno de cimentación, ya que esta condición, además de producir movimientos diferenciales, favorece el peligro de flotación.

Por ser los procesos de tratamiento de aguas residuales de tipo continuo, se considera que la operación nunca será suspendida. Esta suposición representa un alto riesgo, pues el vaciado puede provocar la flotación de estructuras rígidas o el levantamiento del recubrimiento impermeable por la presencia de subpresiones. El diseño debe considerar las peores situaciones ante la posibilidad de flotación, en virtud de que un gran número de plantas se encuentra fuera de servicio por esta causa.

E. Durabilidad de los Materiales de Construcción.

Los materiales que se encuentran en plantas se encuentran sometidos al ataque mecánico, químico y biológico. La caracterización de las aguas que serán tratadas permite, además del diseño del proceso de tratamiento, determinar la presencia de agentes agresivos al concreto y al acero.

E.1 Concreto. El principal deterioro de los concretos es producto de reacciones químicas, por lo que para disminuirla, se deben evitar agregados deletéreos, verificar que no reaccionen con los álcalis del cemento y reducir al mínimo la penetración del agua al interior del concreto, lo que se logra al fabricarlo denso y compacto, con poco agrietamiento por contracción y lo más impermeable posible. Una exposición sanitaria normal, se define como aquella en la que el concreto es impermeable, expuestos a líquidos con pH mayor a 5 o solución sulfatada con menos de 1,500 mg/l. La exposición sanitaria severa es aquella que sobrepasa esos límites. Para obtener un concreto hidráulico durable y de baja permeabilidad (exposición sanitaria normal), es recomendable utilizar relaciones agua/cemento inferiores a 0.45, resistencia a la compresión mayor de 260 kg/cm², revenimiento entre 2.5 y 7.5 cm y cementos con bajo contenido de aluminato tricálcico (C3A), -menor a 8.0%- que permitan a los elementos estructurales resistir el ataque de los sulfatos, principal causa de la desintegración de los concretos. Los contenidos mínimos de cemento por m³ de concreto, recomendados para tamaños máximos de agregados de 38.1 y 25.4 mm son 307 y 335 kg, respectivamente. En caso de exposición sanitaria severa además de las

recomendaciones para expodición normal, el contenido de aluminato tricálcico (C3A) será menor de 5% y la relación agua/cemento menor de 0.40. Los cementos Portland puzolánicos o C2, no siempre son adecuados para resistir el ataque de sulfatos, por lo que se deben realizar ensayos físicos que determinen su aptitud.

El uso de un aditivo que incluya aire en una proporción de 5.5 a 6% más menos el 1% del volumen del concreto, es eficiente en la producción de concretos durables. Puede emplearse además un aditivo impermeabilizante integral; los aditivos que se apliquen deben ser compatibles entre sí. El agua que se utilice debe ser de calidad potable.

Algunos productos químicos utilizados en los procesos de tratamiento son muy agresivos al concreto, por lo que en los sitios de almacenaje, manejo y aplicación, además de las recomendaciones para condiciones sanitarias severas se requerirá de una protección superficial. Las protecciones que se utilizan comprenden los revestimientos termofraguantes (polímeros), cerámicas, morteros resistentes al ataque químico y recubrimientos compuestos. Si el agua por tratar contiene ácidos, las protecciones aplicables son los morteros resistentes al ataque químicos, mosaicos resistentes a los ácidos, epóxicos y revestimientos gruesos de polímeros, caucho o asfalto.

Para reducir los efectos agresivos del ambiente, se ha usado satisfactoriamente un tratamiento superficial al concreto a base de sílico-fluorides (fluatización), que cierra las fisuras de

contracción y endurece la superficie, más la aplicación de pintura epóxica con alquitrán de hulla, con espesores de 1.3 a 6.4 mm dependiendo de la severidad del ataque.

E.2 Corrosión del hierro y acero. Las aguas servidas concentran las sales, sobre todo el cloruro de sodio (NaCl), principal enemigo de los elementos de hierro y acero, por lo que además de procurar tener un concreto impermeable, se debe incrementar cuando menos en 1.3 cm el recubrimiento del acero de refuerzo y es conveniente que el recubrimiento mínimo sea de 7.6 cm. Cuando la ubicación de una planta sea en antiguas lagunas de oxidación o sobre suelos salinos, también debe incrementarse el recubrimiento exterior del acero, para evitar su corrosión por ácidos orgánicos o sal común. La tuberías, válvulas, escaleras marinas, rejillas, etc., son objetos de un intenso ataque por corrosión, por lo que una buena alternativa es limpiar el acero y hierro con chorro de arena y aplicar un recubrimiento epóxico de alquitrán de hulla.

F. Procedimiento Constructivo.

Los métodos seleccionados para la construcción afectan el comportamiento de las estructuras del sistema de tratamiento, por lo que los procedimientos y secuencias de ejecución deben ser especificados claramente. Una adecuada comunicación entre diseñadores y ejecutores, favorecerá el resultado final.

En suelos deformables, se debe establecer que la carga y descarga del suelo sea uniforme, para reducir los movimientos diferenciales. Debe darse especial atención a la estabilidad de las excavaciones, ya que cortes en apariencia estables a corto

plazo, se pueden colapsar, lo que modifica las propiedades del subsuelo y repercute en el comportamiento final de las estructuras. En suelos permeables con niveles freáticos superiores al fondo de la excavación, podrán presentarse caudales por infiltración de cierta importancia. Cuando las estructuras rígidas se alojan en excavaciones, se requiere efectuar rellenos perimetrales. Aunque los materiales granulares como la grava son fáciles de colocar, presentan el inconveniente de su alta permeabilidad que representa un riesgo potencial de flotación, por lo que es preferible el empleo de materiales de baja permeabilidad compactados (tepetates, material limo-arcilloso de origen tobáceo o piroclástico).

Por ninguna razón se deben permitir encharcamientos superficiales durante la construcción; los caudales extraídos de las zonas excavadas y los aportados por precipitaciones, se deben conducir fuera de la obra.

La mayor parte de los asentamientos sobre suelos compresibles se producen durante la construcción, aunque podrán continuar durante un mayor lapso, en ocasiones con magnitud intolerable, por lo que aquellas estructuras en que se presente esta situación, deben ser construidas primero.

Algunas normas sencillas deben observarse en la ejecución de estructuras de concreto, como son un tiempo adecuado del concreto fresco, una colocación y vibrado convenientes, uso de cimbras en buenas condiciones y sobre todo, un curado efectivo.

G. Interconexiones.

Aún en terrenos firmes, por el sólo efecto de contracción y expansión térmica del concreto, se producen movimientos de las estructuras, por lo que deberán considerarse en los análisis estructurales y diseñar las conexiones de forma que permitan ajustar su posición al final de la construcción. De igual forma, los elementos vertedores deben ser diseñados para su ajuste final o correctivo.

Es conveniente la instalación de válvulas seccionadoras entre los diversos módulos y fases del tratamiento y juntas flexibles en las cercanías de las estructuras, que permitan deformaciones pequeñas de las tuberías, reduciendo el riesgo de colapso. Las tuberías de acero y de concreto se deberán proteger interiormente y si el suelo en contacto y si el suelo es agresivo, requerirán protección exterior. La disponibilidad reciente en México de tuberías de polietileno de alta densidad en diámetros de hasta 1.14 m, representa una alternativa atractiva, por ser flexibles y no requerir juntas ni protección contra ataque químico.

H. Operación y conservación.

Una planta de tratamiento puede quedar fuera de operación o trabajar con baja eficiencia por operar y conservar en forma incorrecta a sus estructuras, lo que obligará a reparaciones mayores y en situaciones extremas, a su cierre.

Se debe incluir en el manual de operación los aspectos relativos a la obra física y conservar en las instalaciones un juego de los planos y normas de construcción y equipamiento. Es conveniente puntualizar en tres aspectos:

a) Las fugas deberán ser reparadas de inmediato, para evitar consecuencias graves o incluso catastróficas, además del rápido deterioro de las instalaciones;

b) No se deberá retrasar o cancelar el mantenimiento preventivo puesto que se puede llegar a una condición irreversible y por tanto irreparable;

c) En lagunas, se debe realizar con cuidado el desazolve, para no afectar el suelo impermeable. Si existe un sistema de impermeabilización, es preferible dejar un espesor de azolve del orden de 50 cm.

I. Observaciones adicionales.

Es de suma importancia el sistema de tratamiento seleccionado; sin embargo, si no se dispone de una infraestructura diseñada y construida en forma apropiada, que considere las características del terreno de cimentación, de agresividad de las aguas residuales y los procedimientos de construcción, la operación de una planta puede representar un fracaso total.

Algunas de las recomendaciones mencionadas incrementan la inversión inicial o en apariencia dificultan los procedimientos y costos de construcción; pero a fin de cuentas es en beneficio de sistema y, ante las 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 que representen inversiones inútiles, grandes costos de operación, fracasos técnicos y el desaliento y reclamo general de las sociedad a la que se pretende beneficiar.

Los proyectos estructural, hidráulico, de instalaciones eléctricas, la construcción y operación de plantas de tratamieto de aguas residuales, deben realizarse por técnicos que conozcan este campo, por tratarse de instalaciones con un alto grado de especialización, como las presas y los puentes.

5.4 Costos de Construcción, Operación y Mantenimiento de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en México.

Para la elaboración de esta sección sobre costos, fueron consultadas las siguientes fuentes: El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), La Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal (DGCOH), El Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M. (I. de I.), así como la empresa Sistemas de Ingeniería Sanitaria S.A. del Grupo ICA. Resulta importante agregar que los costos están presentados a junio de 1991, fecha en la que se realizó la recopilación y el trabajo con estos datos.

El tratamiento correspondiente a cada una de las fuentes comprenden los siguientes trenes se encuentra dado por el cuadro 5.1.

Nivel de Tratamiento	Fuente	Tren de Tratamiento
Primario	IMTA	PT+SP+EL+CL
	SISSA-1	PT+SP+EP+CL
	SISSA-2	PT+LF+CL
Secundario	DGCOH	PT+SP+LA+CL
	I de I	PT+SP+LA+CL
	IMTA	PT+LA+DN+EP+CL
	SISSA-3	PT+TP+LA+CL
	SISSA-4	PT+TP+LA+FA+CL
	SISSA-5	PT+TP+LA+CF+FA+CL
Terciario	DGCOH	PT+TP+LA+FA+FA+CA+CL
	IMTA	PT+DN+CF+FA+CA+II+EP+CL
	SISSA-6	PT+TP+LA+CF+FA+AC+OZ
	SISSA-7	PT+TP+LA+FA+OI+CL

CUADRO 5.1

Estos costos incluyen: Inversión Inicial; costos de construcción, equipos electromecánicos, aditamentos; Tratamiento de Lodos, el cual, por experiencia, se determinó como un porcentaje del costo de inversión por m3 (35%). Las claves de estos tratamientos son las mismas que las referidas para el cuadro 4.1 del Capítulo Cuarto.

Es importante señalar que los datos obtenidos del Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M. y del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua fue mediante gráficos proporcionados por estos institutos (Ref. 5.5 y 5.6); los costos de la DGCOH se encontraron mediante las expresiones (Ref. 5.7):

$$CTS = 22 (Q)^{2/3} \text{ y } CTT = 26 (Q)^{2/3}$$

donde:

CTS= Costo de Tratamiento Secundario

CTT= Costo de Tratamiento Terciario

Q= Gasto en litros/segundo

Unidades en miles de millones de pesos.

Los costos de la empresa SISSA se encuentran en el cuadro 5.2.

La gráfica de costos de tratamiento primario se presenta en la figura 5.1 y en ella se incluyen los costos proporcionados por el IMTA, uno, y dos de los costos proporcionados por la empresa SISSA, encontrándose una similitud entre las curvas proporcionadas por el IMTA y el costo más bajo de SISSA, el primero; cabe señalar que los dos muestran similitud son los correspondientes a los tratamientos también más elementales y a la vez con el mismo tren de tratamiento de entre los analizados, por lo que dicha similitud puede resultar hasta cierto grado lógica. Un tratamiento más costoso pero menos elemental resulta ser el denominado como SISSA-2. Los costos correspondientes a la gráfica de la figura 5.1 varían desde 1,477.85 (IMTA) y

1,650.00 (SISSA-2) miles de millones de pesos para 50 l/s, hasta 10,116.90 y 13,879.00 miles de millones de pesos para los 1,000 l/s para el IMTA y SISSA-2 respectivamente.

La figura 5.2 muestra la gráfica 1 de costos de construcción de tratamiento secundario, la que incluye los costos proporcionados por la DGCOH y por el I. de I. los que resultaron ser los más bajos debido a que los trenes de tratamiento que comprenden son los más sencillos. En la figura 5.3 se pueden observar los costos de construcción de plantas de tratamiento secundario correspondientes al IMTA (1) y a la empresa SISSA (3) resultando que el costo propuesto por el IMTA es muy parecido a los dos primeros propuestos por SISSA ya que los trenes de tratamiento son también parecidos. El menor de los costo para tratamiento secundario resulta ser el del tratamiento más sencillo, el proporcionado por la DGCOH, con 4,031.10 miles de millones de pesos y el más costoso, el correspondiente al tercero de SISSA en este nivel de tratamiento con 6,857.45 miles de millones de pesos. Sin embargo, por lo que concierne al caudal de 1,000 l/s puede ser observada una variación muy grande puesto que va de los 29,700 miles de millones de pesos para la DGCOH hasta los 103,149 mil millones de pesos para SISSA-3, el cual resulta ser también el tratamiento más completo.

Los costos de tratamiento terciario se encuentran en la figura 5.4 y comprenden los datos proporcionados por la DGCOH, uno, a SISSA, dos, y al IMTA, uno y en éstos se encuentra que existe una

gran variación del costo correspondiente al caudal de 50 l/s para la DGCOH con 4,764.15 miles de millones de pesos con respecto del conjunto formado por los restantes, cuya variación se encuentra entre los 12,663 del IMTA, 13,104.40 y 13,525.35 miles de millones de pesos de SISSA 3 y 4, los cuales no difieren demasiado. Por lo que respecta al caudal de 1,000 l/s, para este se encuentra que la variación del conjunto de costos sí es muy grande, desde 35,100 (de la DGCOH) hasta los 190,507 mil millones de pesos para el más costoso de SISSA y se observa nuevamente similitudes de costo para trenes similares: los que corresponden al IMTA y a la empresa SISSA.

Por lo que respecta a los costos de operación y mantenimiento, pudieron encontrarse costos del IMTA y de la Empresa SISSA, sin embargo, los costos que por experiencia se acercan más a la realidad correspondieron a los proporcionados por ésta última y varían entre los \$26/m³ para el tratamiento primario más elemental hasta los \$972.66/m³ para el tratamiento terciario más avanzado. Estos costos pueden observarse también en el cuadro 5.2.

n	Nivel de Tratamiento	Inversión Obra \$ miles de mill.	Costos por m3		Costo Total. \$/m3
			Inversión \$/m3	Op. y Mant. \$/m3	
1	Primario 1	10.79	38.45	26.08	64.50
2	Primario 2	13.88	49.47	156.49	205.96
3	Secundario 1	55.64	198.32	236.46	434.78
4	Secundario 2	72.21	257.39	556.76	824.15
5	Secundario 3	103.15	367.67	665.77	1,033.44
6	Terciario 1	182.08	649.05	972.66	1,621.71
7	Terciario 2	190.51	679.06	885.46	1,564.52

Cuadro 5.2

COSTO DE TRATAMIENTO PRIMARIO

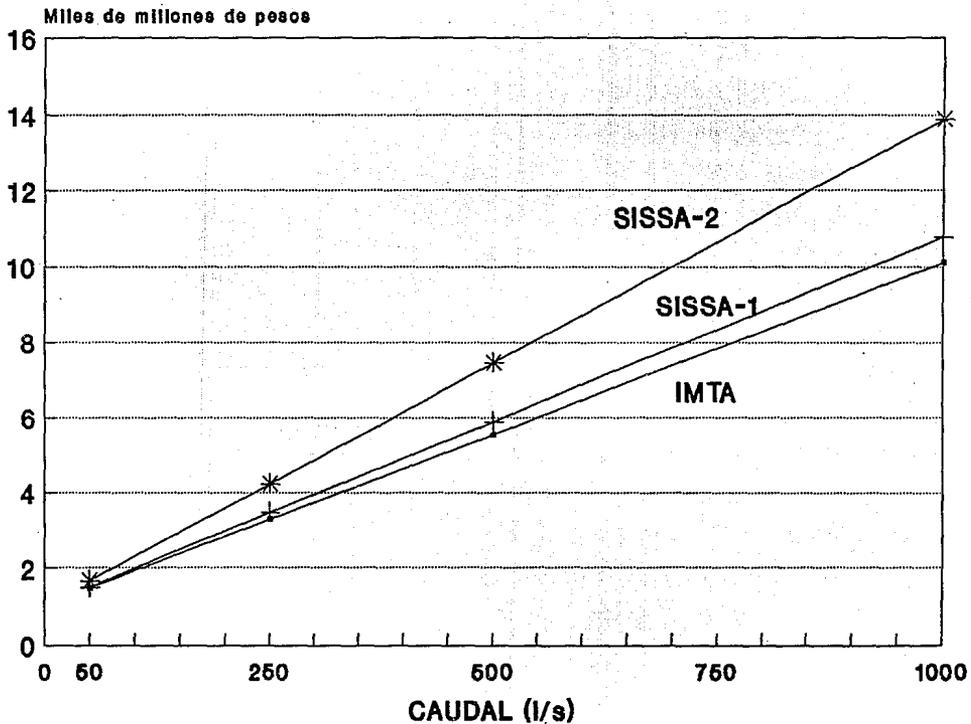


Fig 6.1

COSTO DE TRATAMIENTO SECUNDARIO

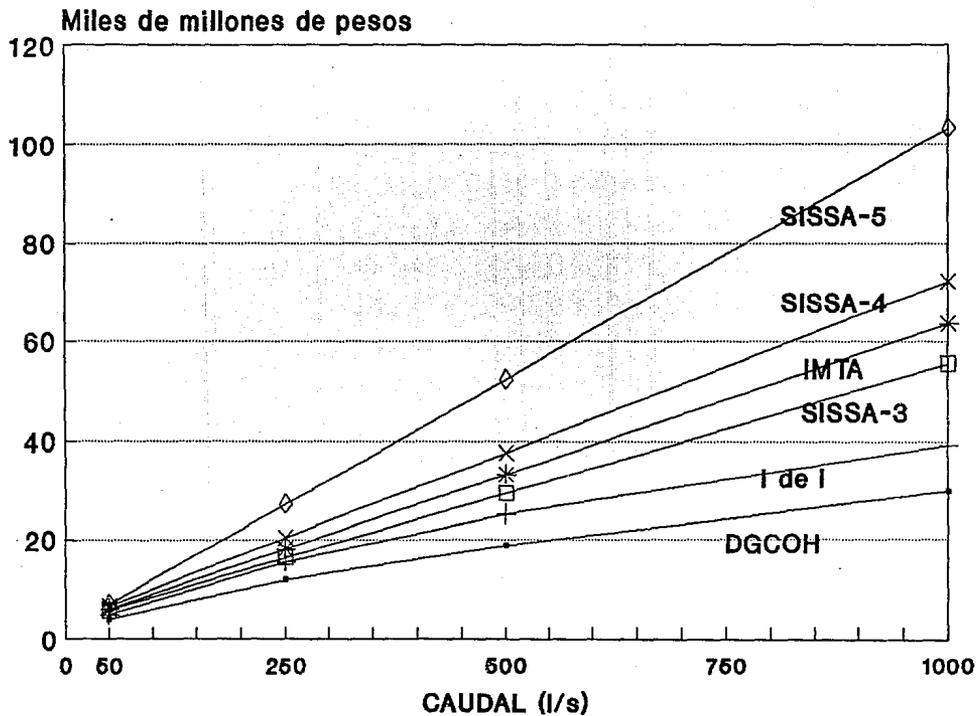


Fig. 5.2

COSTO DE TRATAMIENTO SECUNDARIO-1

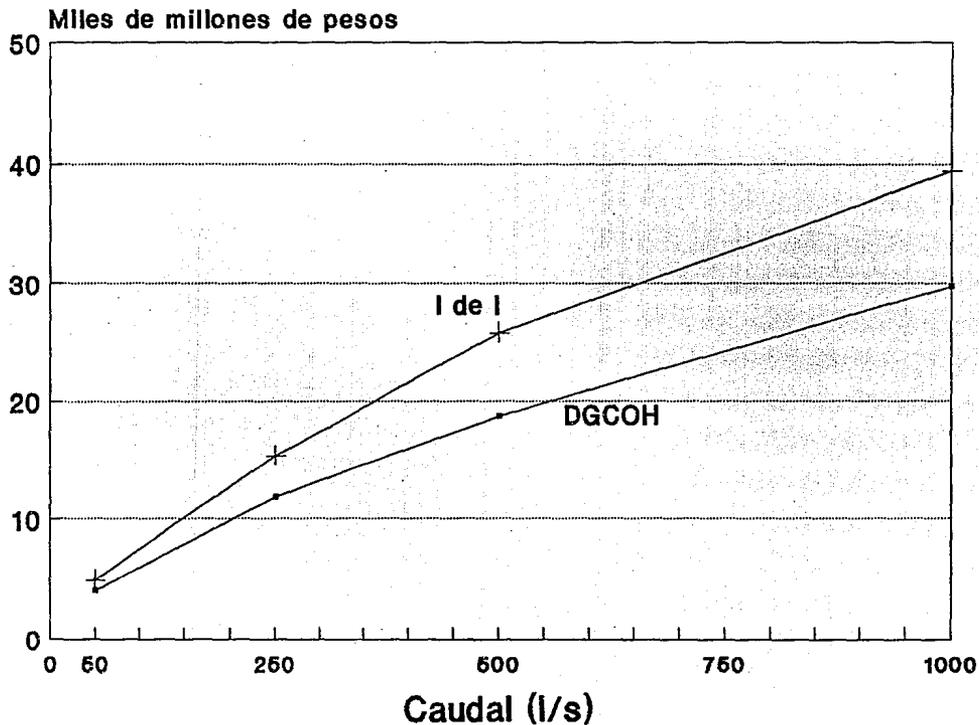


Fig. 5.3

COSTO DE TRATAMIENTO SECUNDARIO 2

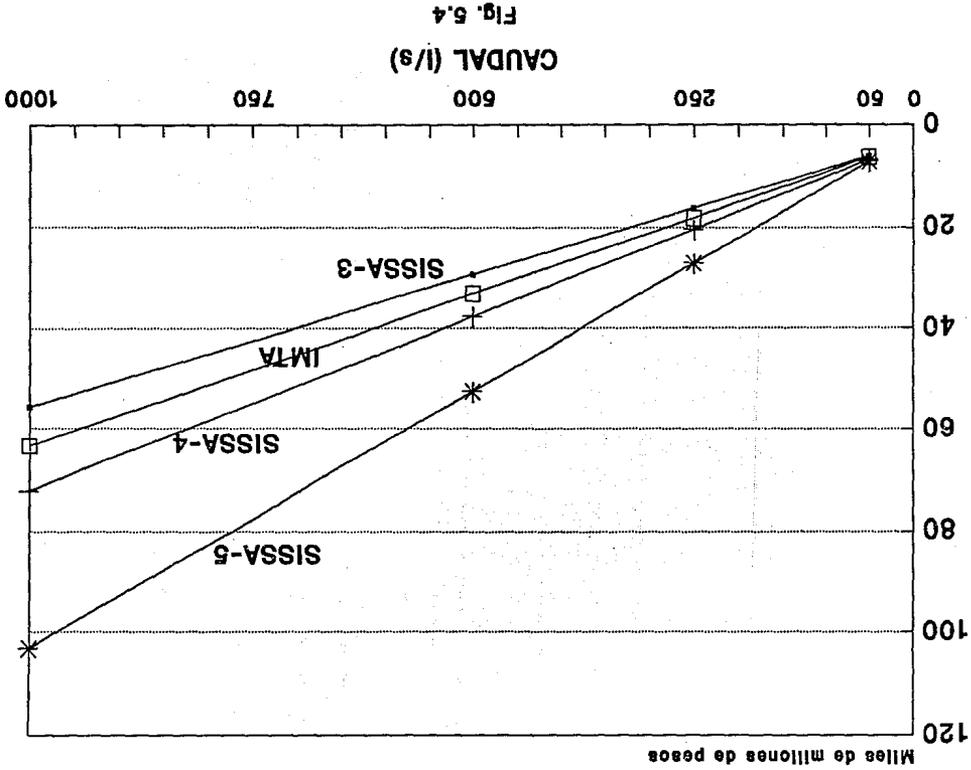


Fig. 5.4
CAUDAL (l/s)

COSTO DE TRATAMIENTO TERCARIO

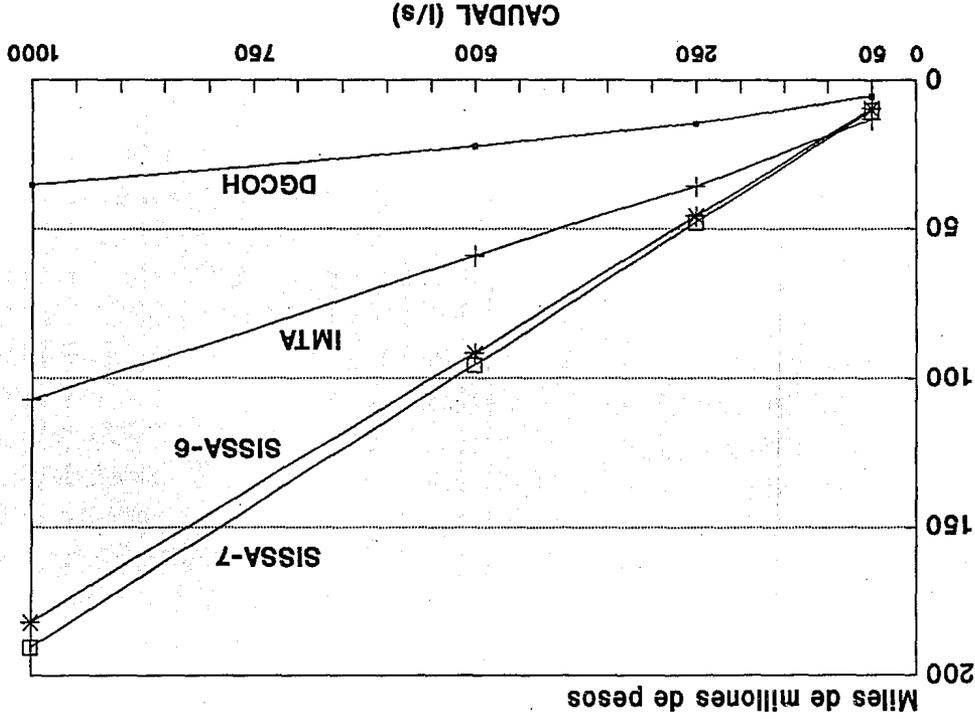


Fig. 6.6

6. Aspectos Legislativos con relación al Agua Tratada.

La contaminación de las aguas ocasiona que los usos benéficos que se le pueden dar al recurso se vean limitados, por esto mismo, y para proteger el interés público, los gobiernos de cada país han establecido la legislación correspondiente y necesaria para proteger a los cuerpos receptores del vertimiento de desechos.

El tratamiento de las aguas residuales responde a la necesidad que tiene el hombre de obtener un agua de calidad adecuada para los usos a los que se vaya a destinar ésta. Cuando el responsable del vertimiento de desechos líquidos no ha previsto un segundo uso para sus aguas, su descarga al medio ambiente debe responder a los requerimientos que la Nación dicte para proteger sus recursos.

Asimismo, los recursos hidráulicos del país requieren de una legislación que regule racionalmente el aprovechamiento del agua, para un desarrollo económico y social más justo, en tal virtud, la planeación integral del aprovechamiento de estos recursos es de carácter prioritario y solamente se puede llevar a cabo si se efectúa en un marco técnico y jurídicamente adecuado.

A continuación se mencionan brevemente las Leyes y Reglamentos que en México regulan el uso y reúso de la agua.

6.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

El agua, como recurso vital, ha sido claramente tratado en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en su artículo 27 que señala: "La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del Territorio Nacional corresponde originalmente a la Nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir al dominio de ella a los particulares, constituyendo la propiedad privada".

Además señala que: "La Nación tendrá en todo tiempo el derecho de imponer a la propiedad privada las modalidades que dicte el interés público, así como el de regular, en beneficio social, el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de apropiación, con objeto de hacer una distribución equitativa de la riqueza pública, cuidar de su conservación, lograr el desarrollo equilibrado del país el mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural y urbana". Asimismo se establece que se dictarán las medidas necesarias "para evitar la destrucción de los elementos naturales y los daños que la propiedad pueda sufrir en perjuicio de la sociedad".

Con fundamento en este artículo, el gobierno federal ha establecido las medidas legales para evitar la contaminación del agua, de acuerdo a las facultades que el artículo 73 confiere al Congreso de la Unión para expedir Leyes sobre el uso y aprovechamiento de las aguas de jurisdicción federal y que el artículo 89 confiere al Poder Ejecutivo para "promulgar y ejecutar las leyes que expida el Congreso de la Unión, proveyendo en la esfera administrativa a su exacta observancia".

Por otro lado, el artículo cuarto Constitucional establece que: "Toda persona tiene derecho a la protección de la salud". Con este señalamiento se sientan las bases para legislar en materia de protección a la salud por efectos del medio ambiente.

El marco constitucional anterior han dado las pautas para establecer la Ley Federal de Protección al ambiente, la Ley Federal de Aguas y la Ley General de Salud, adicionalmente, otro cuerpo legal de interés en la materia que ocupa a este trabajo es la Ley de Obras Públicas.

Adicionalmente, el artículo 115 constitucional señala las bases del establecimiento del Municipio Libre. La fracción III indica los servicios públicos que están a cargo de los municipios y, en primer lugar, se mencionan los sistemas de agua potable y alcantarillado. A partir de esta norma, los municipios son los responsables de la operación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales como parte de su infraestructura de alcantarillado.

6.2 Ley Federal de Protección al Ambiente.

En el año de 1971 se expidió la Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental, que fue el primer intento, a nivel nacional de establecer un marco legal para proteger al ambiente. El 30 de diciembre de 1981 se expidió la Ley Federal de Protección al Medio Ambiente, la cual abrogó a la ley anterior. Cabe mencionar que en 1983 se reformaron, adicionaron y derogaron diversas disposiciones de esta Ley.

Esta Ley tiene por objeto "establecer las normas para la conservación, protección, preservación, mejoramiento y restauración del medio ambiente, de los recursos que lo integran y para la prevención y control sobre los contaminantes y las causas reales que los originan".

Asimismo, en su capítulo tercero, artículo 21, esta Ley indica, que para la protección de las aguas: "Se prohíbe descargar, sin un previo tratamiento, en las redes colectoras, ríos, cuencas, cauces, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua o infiltrar en terrenos, aguas residuales que contengan contaminantes, desechos, materias radioactivas y cualquier otra sustancia dañina a la salud de las personas, a la flora, a la fauna o a los bienes. La Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, en coordinación con las de Agricultura y Recursos Hidráulicos y la de Salud dictará las normas para el uso o aprovechamiento de las aguas residuales...".

En su artículo 22, esta Ley establece: "Las aguas residuales provenientes de usos públicos, domésticos, industriales o agropecuarios que se descarguen en los sistemas de alcantarillado de las poblaciones o en las cuencas, ríos, cauces, vasos y demás depósitos o corrientes, así como los que por cualquier medio se infiltren en el subsuelo y en general las que se derramen en los suelos, deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir:

A. Contaminación de los cuerpos receptores;

B. Interferencias en los procesos de depuración de las aguas,

y

C. Transtornos, impedimentos o alteracioness en los correctos aprovechamientos, o en el funcionamiento adecuado de los sistemas y en la capacidad hidráulica en las cuencas, cauces, vasos, mantos acuíferos y demás depósitos de propiedad nacional, así como de los sistemas de alcantarillado.

Para proveer, en la esfera administrativa, a la observancia de la Ley, en 1973 se expidió el Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación de Aguas. Este Reglamento sigue vigente en tanto no se expidan los reglamentos correspondientes a la Ley Federal de Protección al ambiente.

6.3 Ley Federal de Aguas.

La Ley Federal de Aguas se expidió en 1971 con el fin de reglamentar los párrafos quinto y sexto del artículo 27 constitucional. En su artículo 16 se establece que compete al Ejecutivo Federal "suspender todos aquellos aprovechamientos, obras y actividades que dañen los recursos hidráulicos nacionales o afecten el equilibrio ecológico de una región..." y en su artículo 17 postula que compete a la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos la facultad de regular la explotación, uso o aprovechamiento de aguas residuales y las condiciones en en que se hayan de arrojar en las redes colectoras, cuencas, cauces, vasos y demás depósitos y corrientes de agua, así como su infiltración, procurando evitar, en todo caso, la contaminación que ponga en peligro los sistemas ecológicos.

A partir de este ordenamiento, el Gobierno Federal puede fijar medidas y límites de calidad para el reúso de las aguas residuales. Aunque, en todo caso, los aspectos sanitarios y de protección al ambiente están mejor sustentados en la Ley Federal de Protección al Ambiente y en la Ley General de Salud.

6.4 Ley General de Salud.

La Ley General de Salud fue expedida en 1983 y deroga al Código Sanitario de los Estados Unidos Mexicanos. En su artículo tercero se establece que es materia de salubridad general: "la prevención y el control de los efectos nocivos de los factores ambientales en la salud del hombre", por ello se cuenta con un capítulo destinado a los efectos del ambiente en la salud.

El artículo 118 menciona que corresponde a la Secretaría de Salud:

I. Determinar los valores de concentración máximas permisibles para el ser humano de contaminantes en el ambiente'

II. Emitir las normas técnicas a que deberá sujetarse el tratamiento del agua para uso y consumo humano;

III. Establecer criterios sanitarios para el uso, tratamiento y disposición de aguas residuales para evitar riesgos y daños a la salud pública.

Hasta septiembre de 1987, la Secretaría de Salud no ha publicado los valores de concentración de contaminantes ni los criterios sanitarios para el uso y disposición de aguas residuales.

6.5 Ley de Obras Públicas.

La Ley de Obras Públicas, aunque tiene por objeto regular el gasto y las acciones relativas a la obra pública, menciona en su artículo 13 que "en la planeación de cada obra las dependencias y entidades deberán prever y considerar, según el caso, los efectos y consecuencias sobre las condiciones ambientales. Cuando éstas pudieran deteriorarse, los proyectos deberán incluir, si ello fuere posible, lo necesario para que se preservan o restauren las condiciones ambientales y los procesos ecológicos".

De acuerdo con esta Ley, debe esperarse que cualquier obra pública que pueda causar contaminación del agua, necesariamente deberá tener prevista la construcción de una planta de tratamiento.

6.6 Reglamento del Servicio de Agua y Drenaje para el Distrito Federal.

Las disposiciones de este Reglamento son de orden público e interés general y social, y tienen por objeto regular los servicios de agua potable, tratamiento de aguas, drenaje y alcantarillado del Distrito Federal.

El gobierno Federal inició en el año de 1969 los primeros estudios para llevar a cabo el saneamiento del recurso hidráulico del país, siendo la Secretaría de Recursos Hidráulicos la encargada de realizar esta labor a través del Departamento de Prevención de la Contaminación.

El desarrollo de las actividades de saneamiento se intensificaron con la creación de la Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación en la propia Secretaría de Recursos Hidráulicos en el año de 1970, mismas que se ven complementadas por las actividades desarrolladas por la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente creada en el mismo año en el seno de la Secretaría de Salubridad y Asistencia.

En el año de 1983 con la creación de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, se transfieren las funciones de saneamiento a la misma, desapareciendo la Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación.

Con la creación de la Comisión Nacional del Agua como órgano desconcentrado de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, tanto dicha Comisión como la SEDUE y la SS, se establecen como las entidades normativas en lo correspondiente a la calidad de las aguas.

6.7 Ley Federal de Derechos en Materia de Agua.

El cobro de derechos por aguas residuales, previsto por la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua y que entró en vigor el 10. de octubre de 1991 y tiene como objetivo fundamental el preservar la calidad de las aguas nacionales así como el de impulsar la construcción de la infraestructura hidráulica, principalmente la referente a plantas de tratamiento de aguas residuales puesto que los ingresos que se obtengan por el cobro de estos derechos se destinarán básicamente a cubrir sus gastos de operación, conservación inversión y financiamiento.

Esta disposición establece que se debe pagar el derecho por uso o aprovechamiento de bienes del dominio público de la Nación, tales como cuerpos receptores de las descargas de aguas residuales y que quienes descarguen en forma permanente, intermitente o fortuita aguas residuales con concentraciones de contaminantes por arriba de las permisibles conforme, a la normatividad vigente, en depósitos o corrientes de agua. De acuerdo con esto, en México se cobrará cuando los contaminantes en el efluente excedan la Norma fijada por la Ley: 300 miligramos de DQO (Demanda Química de Oxígeno) por litro y 30 miligramos de SST (Sólidos suspendidos Totales) por litro -aunque en realidad estos índices son menores que los que se aplican en otros países-.

En el cobro de estos derechos se considera que los cuerpos de agua son propiedad de la Nación y, por tanto, se debe compensar el deterioro que se provoca al contaminarlos, ya que éstos requieren de distintos tipos de acciones para su tratamiento y saneamiento, algunas muy costosas. En consecuencia, se considera justo que quienes hayan ocasionado el daño, contribuyan a financiar su reparación. De esta manera, la aportación económica de cada usuario será proporcional al volumen de las descargas de aguas residuales que realice, al contenido de contaminantes que éstos incluyan y a la zona geográfica donde se realice la descarga pues generan mayores costos y problemas las descargas efectuadas en zonas con acuíferos sobreexplotados que en zonas con abundancia de agua. Así, las empresas que demuestren que someten a sus aguas residuales a tratamiento y que por lo

tanto el grado de contaminación de sus descargas es menor a los límites establecidos por la Ley, no pagarán este derecho. Además, un artículo transitorio de la misma, exime del pago de derechos por 12 meses a las empresas que demuestren encontrarse en vías de instalar equipos para el tratamiento de sus descargas.

Por otro lado, se puede agregar que para la formulación de este nuevo derecho se analizaron las experiencias de otros países como los Estados Unidos de Norteamérica, Alemania, Francia, Holanda, España y Japón y también se tomaron en cuenta los índices elaborados a este respecto por la Organización Mundial de la Salud. Así fue como se concluyó que los parámetros de evaluación de la contaminación más generalizados son los ya mencionados anteriormente. Al seleccionar los parámetros aplicables a México se buscó que su cálculo fuera simple pero a la vez lo suficientemente representativos con el fin de que los usuarios puedan utilizarlos en forma fácil y rápida ya que los derechos serán autodeclarables.

6.8 Normas Técnicas Ecológicas Correspondientes.

Las Normas Técnicas Ecológicas correspondientes a las descargas en cuerpos de agua fijadas por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), dependiendo del tipo de industria y de los parámetros clásicos se resumen en el siguiente cuadro. Es conveniente mencionar que dichas normas se

encuentran publicadas en la Gaceta Ecológica de Agosto de 1989, Volumen I, Número 2, en las cuales pueden consultarse el resto de los parámetros sancionados.

NORMA NTE-CCA	TIPO DE INDUSTRIA	pH	SST mg/l	GRASAS Y ACEITES	DBO mg/l	DQO mg/l
1.	Central Termoeléctrica	6-9	100	15		
2.	Azúcar de Caña	6-9		20	60	100
3.	Petroquímica Básica	6-9	70	40	60	
4.	Fábrica de Fertilizantes	6-9	30			
5.	Industria de Plásticos	6-9	70	20	100	300
6.	Fábrica de Harinas	6-9	200		200	400
7.	Industria de Cerveza	6-9	200	30	200	
8.	Fábrica de Asbestos	6-9	60	10	60	100
9.	Industria de la Leche	6-9	100		100	
10.	Industria Vidrio Plano	6-9	40	70	10	
11.	Ind. Vidrio Soplado	6-9	30	10		
12.	Fábrica Caucho Sintético	6-9	60	10	50	250
13.	Ind. del Hierro y Acero	6-9	30	50		
14.	Industria Textil	6-9	50		100	
15.	Ind. de Celulosa y Papel	6-9	200	50	200	
16.	Ind. Bebidas Gaseosas	6-9	50	30	50	
17.	Ind. Acabados Metálicos	6-9	50	10		
18.	Laminación de cobre	6-9	30	10		
19.	Impregnación de Prods de Aserradero	6-9	150	100	200	
20.	Asbestos	6-9	30		30	
21.	Curtido y acabado de Piel	6-9	250	50	250	
22.	Matanza de animales	6-9	125	10	75	
23.	Conservas alimenticias	6-9	150	10	150	
24.	Papel de Celulosa Virgen	6-9	125	30	125	
25.	Papel de Cel. Reciclada	6-9	200	50	200	

7. Perspectivas de la Construcción de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).

En el presente capítulo, a partir de un análisis de las demandas medias de agua proyectadas para los próximos 20 años, cuadro 7.1 (Ref. 7.1), así como de de las tecnologías modernas de tratamiento para convertir el agua residual de la ZMCM en agua renovada que podría satisfacer, virtualmente, las normas de calidad más exigentes, incluso para el uso potable, se plantean 6 escenarios de suministro para dicha zona.

El primero de éstos escenarios, el A, prevee que los incrementos de las demandas se cubran en su totalidad con agua potable proveniente de cuencas lejanas.

El segundo, el escenario B, incluye el aprovechamiento del agua renovada en en parte de los usos convencionales con un aumento del 287% a lo largo de 19 años (4.65 m³ por año en promedio)

El escenario C incluye que: además de las consideraciones hechas en el escenario B, el agua clara sea substituida en su totalidad por aguas renovadas lo que significa un aumento del 585% (15.27 m³/año en promedio).

En el escenario D, el agua para servicios es cubierta por agua potable y la totalidad del agua clara es substituida por agua renovada.

El escenario E contempla que el agua residual substituya por completo al consumo de agua clara, al agua potable para servicios e inclusive al agua negra para riego agrícola.

Y, conteniendo al anterior, el escenario F, donde se intensifica al máximo el reúso, llegando a suministrar poco más del 20% del caudal doméstico requerido en el año 2010, lo cual lo hace ser el escenario más optimista pero a la vez menos conservador en cuanto al uso del agua renovada.

Con base en los planteamientos anteriores, para los seis escenarios propuestos, se comparan los costos que resultan de importar el agua de cuencas externas contra el de darle tratamiento a las aguas residuales generadas en la propia cuenca para su reúso, con el propósito de encontrar si es alentador y atractiva la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales en la ZMCM.

Como ya fue mencionado en el segundo capítulo de este trabajo, es ya generalmente aceptado que el tratamiento y reúso de las aguas residuales, en forma directa o a través de esquemas de intercambio constituye un elemento importante en la solución de la problemática del abastecimiento de agua a un número creciente de ciudades en nuestro país.

La toma de decisiones relacionadas con programas concretos de tratamiento y reúso o referentes a la inversión en proyectos específicos requiere considerar numerosas variables tales como la demanda y la disponibilidad del agua en el tiempo para diferentes usos, la localización específica para la captación de aguas residuales y la calidad de las mismas, los aspectos legales y los compromisos aguas abajo ya establecidos para el empleo de las aguas residuales. Por otra parte, es primordial considerar la localización de la demanda de aguas renovadas, los criterios de

salud y, por supuesto, los costos, tanto de los diversos niveles de tratamiento para lograr la calidad del agua adecuada para diferentes usos, como del agua de primer uso que se requeriría opcionalmente, incluyendo en ambos casos, el costo de hacer llegar el agua al usuario.

A continuación se analizan algunas de las variables mencionadas para el caso de la ZMCM y se proponen posibilidades reales de utilización de aguas residuales tratadas (renovadas) para diferentes usos. Es importante señalar que los costos de construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales que se analizan son los proporcionados por la empresa SISSA puesto que resultan ser los más reales, por experiencia, para fines de comparación contra costos de importación de agua de cuencas externas.

La tabla 7.2 presenta la manera en que se conformaron los costos totales por cada nivel de tratamiento por cada m3 de agua tratada: en la primera columna, la inversión inicial de la obra; después, en la siguiente columna, con una proporción del 80% para el tiempo correspondiente a la depreciación de la obra civil (30 años) y de un 20% para el del equipo electromecánico (15 años) de lo cual resulta un tiempo de amortización de 27 años y empleando una tasa de interés del 12% anual según la fórmula:

$$A = \frac{P}{i + \frac{i}{(1+i)^n}}$$

donde:

A= Amortización (Anualidad)

P= Principal (Inversión Inicial)

i= Tasa de interés

n= Periodos de Amortización;

en tercer lugar, se incluyeron los costos de operación y mantenimiento inherentes a cada tipo de tratamiento para; finalmente integrar el costo total por metro cúbico tratado.

Por su parte, el cuadro 7.2 muestra la forma en que se determinaron los costos unitarios potenciales , en m³, de agua potable importada a la ZMCM de cuencas externas (Ref. 7.3). Para integrar en este caso el costo total por metro cúbico de agua se consideraron: la inversión inicial de la obra, su amortización en iguales condiciones que para la del agua renovada, los costos por operación y mantenimiento, por energía de bombeo así como el costo de la conducción hasta el usuario. El costo ponderado del total de los costos de tratamiento es de 1,935 pesos.

En el cuadro 7.3 se comparan los costos totales de agua potable entre los del agua renovada, encontrándose que solamente en algunos de ellos, específicamente en Libres/Oriental y en Tlautla en comparación con el tratamiento terciario, el cociente es favorable para la importación del agua.

7.1 Consideraciones Básicas.

En el trabajo se han utilizado hipótesis que, al mismo tiempo que facilitaron su desarrollo, no alteran las conclusiones fundamentales. Dichas hipótesis son:

-Para el cálculo de las demandas de agua se tomaron en cuenta, por una parte, los resultados de los Censos Poblacionales de 1990 (REF. 7.4) y por otra, las tasas de crecimiento propuestas por el Colegio de México para los próximos 20 años.

-Se considera nulo el crecimiento de los volúmenes demandados para fines agrícolas e industriales en el área de estudio.

-Debido a que en el presente trabajo sólo se analizan las posibilidades de substituir al agua de abastecimiento proveniente de fuentes lejanas, no se cuantificaron las demandas de agua relativas a la recarga de acuíferos, el cual podría ser considerado en lo futuro otro elemento de substitución de abastecimiento de fuentes lejanas (práctica que en otros países no es tan inusual).

-El concepto de "uso en servicios" se refiere a los volúmenes empleados en el riego de áreas verdes, así como a los destinados al llenado de lagos recreativos. Se incluyen en el renglón de uso agrícola a los caudales utilizados directamente en riego y a aquéllos para mantener los niveles de los canales en Xochimilco y Tláhuac.

-Los trenes de tratamiento propuestos para el cálculo de los costos unitarios por m³ de agua renovada son los mismos proporcionados por la empresa SISSA los que son mencionados en el capítulo quinto de este trabajo y son:

a) Primario 1: Pretratamiento, Tratamiento Primario y Cloración.

b) Primario 2: Pretratamiento, Lagunas Facultativas y Cloración.

c) Secundario 1: Pretratamiento, Tratamiento Primario, Lodos Activados y Cloración.

d) Secundario 2: Pretratamiento, Tratamiento Primario, Lodos Activados, Filtración después de Lodos Activados y Cloración.

e) Secundario 3: Pretratamiento, Tratamiento Primario, Lodos Activados, Coagulación y Floculación, Filtración después de Lodos Activados y Cloración.

f) Terciario 1: Pretratamiento, Tratamiento Primario, Lodos Activados, Coagulación y Floculación, Filtración después de Lodos Activados, Adsorción con Carbón y Ozonación.

g) Terciario 2: Pretratamiento, Tratamiento Primario, Lodos Activados, Filtración después de Lodos Activados, Osmosis Inversa y Cloración.

-El escenario c) supone que toda el agua negra que actualmente se utiliza en riego agrícola es substituida por agua con tratamiento a nivel primario. A su vez, los escenarios b) y c) consideran que el agua potable que actualmente se emplea en servicios es reemplazada por agua residual tratada a nivel secundario.

-Se considera que la distribución espacial de la oferta de agua renovada es tal que permite satisfacer la demanda en términos económicos.

-Cuando los requerimientos de agua residual para tratamiento afecten los compromisos de usos de aguas negras establecidos, se dará prioridad a los proyectos de tratamiento y reúso dentro del Valle.

-Se supusieron calidades medias de agua residual en los cálculos de los costos de tratamiento.

-Los costos del agua residual tratada se han calculado para trenes de 1 m³/s de capacidad mediante el uso del paquete denominado CAPDET.

-Para la comparación de costos entre agua residual tratada y agua de fuentes lejanas, se tomó en cuenta el costo ponderado del agua proveniente de éstas últimas.

CUADRO 7.1 Consumos de agua por tipo de uso.

Tipo de agua	Tipo de Uso				Total
	Doméstico	Servicios	Industrial	Agrícola	
POTABLE	46,200	2,200	5,100		53,500
CLARA				9,200	9,200
RENOVADA		900	1,500	1,900	4,300
NEGRA				5,500	5,500
TOTAL	46,200	3,100	6,600	16,600	73,600

Consumos medios en l/s

DETERMINACION DEL COSTO POR m³ DE AGUA POTABLE TRAIIDO A LA ZONA METROPOLITANA
DE LA CIUDAD DE MEXICO DE CUENCAS EXTERNAS A FUTURO

Fuente	Caudal Aportad m ³ /s	Inversion Obra \$ miles de mill por m ³ /s instalado	Costo por m ³ agua pot able				Costo Total \$
			Inversion	Operacion	Energia Bombeo	Conduccion	
Cutzamala	8.0	222.06	791.5	171.4	811.5	226.1	2,040.2
Libres/Oriental	7.0	228.81	815.6	155.8	152.8	167.8	1,292.0
Alto Amacuzac	13.0	238.82	828.0	99.7	838.4	262.5	2,012.9
Medio Amacuzac	48.0	209.79	747.8	144.5	1,002.3	283.4	2,178.0
Tecolutla	15.5	227.73	811.7	287.9	798.7	282.7	2,173.0
Taxhimay/Tlautila	5.0	203.92	726.9	113.7	98.5	138.9	1,078.0
Taxhimay	5.0	389.18	389.2	93.7	93.7	82.3	638.7
COSTO TOTAL PONDERADO= 1,953.9							

CUADRO 7.2 Agua Renovada.

Costos de Agua Potable/Costos de Agua Renovada

Nivel de Tratamiento	Cutzamala	Libres/Oriental	Alto Amacuzac	Medio Amacuzac	Tecolutla	Taxhimay/Tlautila	Tlautila
Primario 1	31.62	20.03	31.19	33.76	33.68	16.59	9.77
Primario 2	9.90	6.28	9.77	10.50	10.55	5.19	3.86
Secundario 1	4.69	2.97	4.63	5.01	5.00	2.46	1.45
Secundario 2	2.50	1.59	2.47	2.68	2.67	1.32	0.77
Secundario 3	1.97	1.25	1.95	2.11	2.10	1.03	0.61
Terciario 1	1.30	0.83	1.29	1.39	1.39	0.68	0.40
Terciario 2	1.25	0.80	1.24	1.34	1.34	0.66	0.39

Cuadro 7.3

Costos de Tratamiento de Agua Residual.

n	Nivel de Tratamiento	Inversión Obra \$ miles de mill.	Costos por m ³		Costo Total. \$/m ³
			Inversión \$/m ³	Op. y Mant. \$/m ³	
1	Primario 1	10.79	38.45	26.08	64.50
2	Primario 2	13.88	49.47	156.49	205.96
3	Secundario 1	55.64	198.32	236.46	434.78
4	Secundario 2	72.21	257.39	556.76	824.15
5	Secundario 3	103.15	367.67	665.77	1,033.44
6	Terciario 1	182.08	649.05	972.66	1,621.71
7	Terciario 2	190.51	679.06	885.46	1,564.52

Cuadro 7.4

ESCENARIOS PROPUESTOS PARA LA SUSTITUCION DE AGUA POTABLE POR AGUA REQUAMADA.

(VOLUMENES EN MILLONES DE METROS CUBICOS POR AÑO)

ESCENARIO A

USO/ TIPO DE AGUA	1990				1994				2000				2010			
	POT	CLA	REN	NEG												
DOMESTICA	1456.9				1627.1				1821.6				2832.3			
SERVICIOS	69.4		28.4		77.5		28.4		86.8		28.4		96.8		28.4	
AGRICOLA		290.1	59.9	173.5		290.1	59.9	173.5		290.1	59.9	173.5		290.1	59.9	173.5
INDUSTRIAL	168.8		47.3		168.8		47.3		168.8		47.3		168.8		47.3	
TOTAL	1687.1	290.1	135.6	173.5	1865.5	290.1	135.3	173.5	2069.2	290.1	135.6	173.5	2289.9	290.1	135.6	173.5

ESCENARIO B

USO/ TIPO DE AGUA	1990				1994				2000				2010			
	POT	CLA	REN	NEG	POT	CLA	REN	NEG	POT	CLA	REN	NEG	POT	CLA	REN	NEG
DOMESTICA	1456.9				1627.1				1821.6				2832.3			
SERVICIOS	69.4		28.4		62.8		47.2		48.6		73.6				136.3	
AGRICOLA		290.1	59.9	173.5		172.2	177.8	173.5		85.2	264.8	173.5			358.8	173.5
INDUSTRIAL	168.8		47.3		141.9		66.2		116.7		91.5		72.5		135.6	
TOTAL	1687.1	290.1	135.6	173.5	1831.8	172.2	291.2	173.5	1966.9	85.2	429.9	173.5	2184.8		621.1	173.5

ESCENARIO C

USO/ TIPO DE AGUA	1990				1994				2000				2010			
	POT	CLA	REN	NEG	POT	CLA	REN	NEG	POT	CLA	REN	NEG	POT	CLA	REN	NEG
DOMESTICA	1456.9				1627.1				1821.6				2832.3			
SERVICIOS	69.4		28.4		77.5		28.4		86.8		28.4		96.8		28.4	
AGRICOLA		290.1	59.9	173.5		172.2	177.8	173.5		85.2	264.8	173.5			358.8	173.5
INDUSTRIAL	168.8		47.3		141.9		66.2		116.7		91.5		72.5		135.6	
TOTAL	1687.1	290.1	135.6	173.5	1846.5	172.2	272.4	173.5	2025.1	85.2	384.7	173.5	2281.6		514.8	173.5

ESCENARIO D

USO/ TIPO DE AGUA	1990				1994				2000				2010			
	POT	CLA	REN	MDG	POT	CLA	REN	MDG	POT	CLA	REN	MDG	POT	CLA	REN	MDG
DOMESTICA	1456.9				1627.1				1821.6				2832.3			
SERVICIOS	69.4		28.4		77.5		28.4		86.8		28.4		96.8		28.4	
AGRICOLA		298.1	59.9	173.5		172.2	177.8	173.5		85.2	264.8	173.5			358.8	173.5
INDUSTRIAL	168.8		47.3		141.9		66.2		116.7		91.5		72.5		135.6	
TOTAL	1687.1	298.1	135.6	173.5	1846.5	172.2	272.4	173.5	2825.1	85.2	384.7	173.5	2281.6		514.8	173.5

ESCENARIO E

USO/ TIPO DE AGUA	1990				1994				2000				2010			
	POT	CLA	REN	MDG	POT	CLA	REN	MDG	POT	CLA	REN	MDG	POT	CLA	REN	MDG
DOMESTICA	1456.9				1627.1				1821.6				2832.3			
SERVICIOS	69.4		28.4		62.8		47.2		48.6		73.6				136.3	
AGRICOLA		298.1	59.9	173.5		172.2	212.5	138.8		85.2	316.9	121.4			523.5	
INDUSTRIAL	168.8		47.3		141.9		66.2		116.7		91.5		72.5		135.6	
TOTAL	1687.1	298.1	135.6	173.5	1831.8	172.2	326.2	138.8	1986.9	85.2	482.8	121.4	2184.8		795.4	

ESCENARIO F

USO/ TIPO DE AGUA	1990				1994				2000				2010			
	POT	CLA	REN	MDG	POT	CLA	REN	MDG	POT	CLA	REN	MDG	POT	CLA	REN	MDG
DOMESTICA	1456.9				1611.4		15.7		1611.4		218.2		1611.4		421.4	
SERVICIOS	69.4		28.4		62.8		47.2		48.6		73.6				136.3	
AGRICOLA		298.1	59.9	173.5		172.2	212.5	138.8		85.2	316.9	121.4			523.5	
INDUSTRIAL	168.8		47.3		141.9		66.2		116.7		91.5		72.5		135.6	
TOTAL	1687.1	298.1	135.6	173.5	1815.3	172.2	341.6	138.8	1776.7	85.2	692.2	121.4	1683.9		1217	

ESCENARIO A

Volúmenes en millones de m3 por año

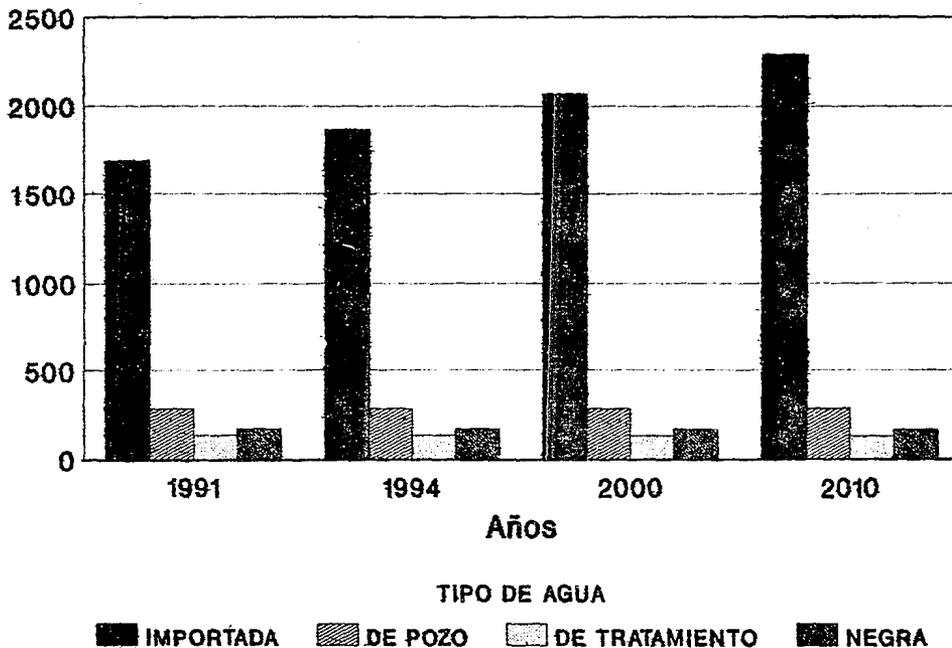


Fig. 7.1.1

ESCENARIO A

(Caudales en millones de m³ por año)

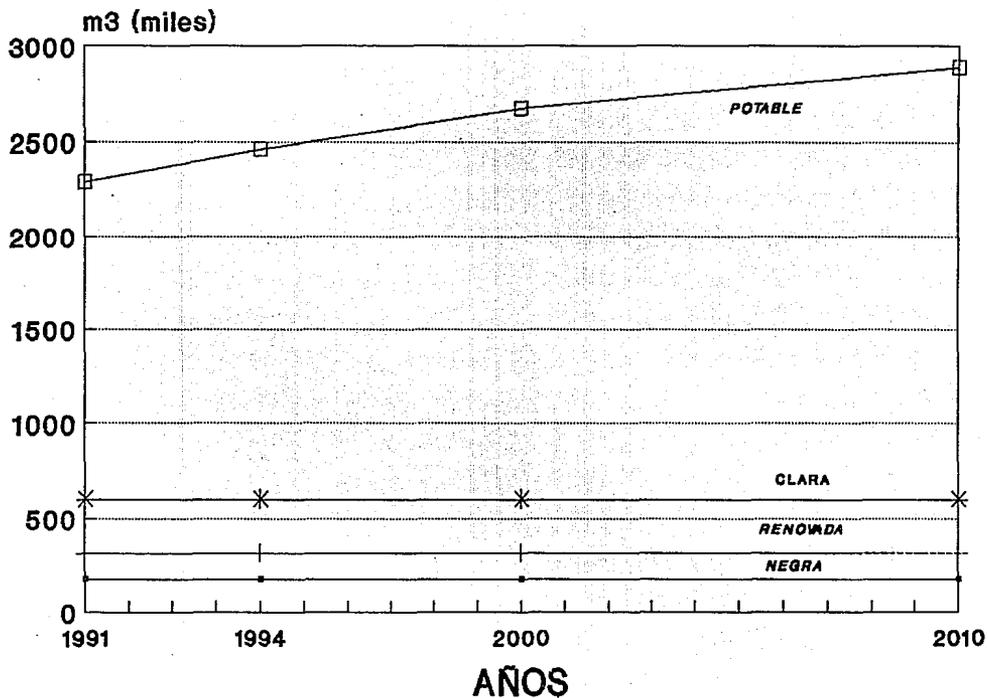


Fig. 7.1

ESCENARIO B

Volúmenes en millones de m³ por año

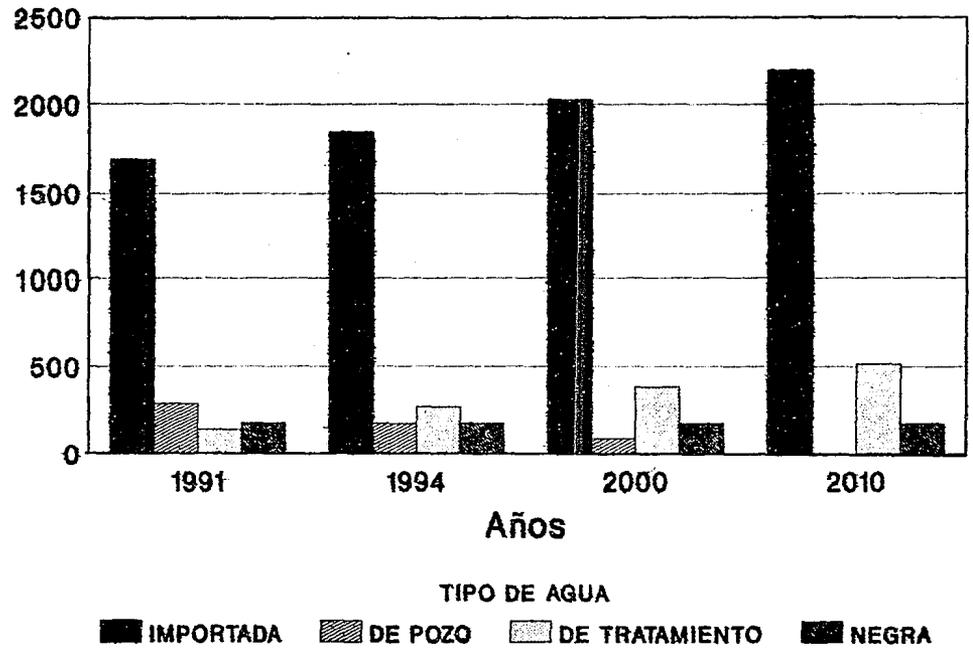


Fig. 7.1.2

ESCENARIO B

(Caudales en millones de m3 por año)

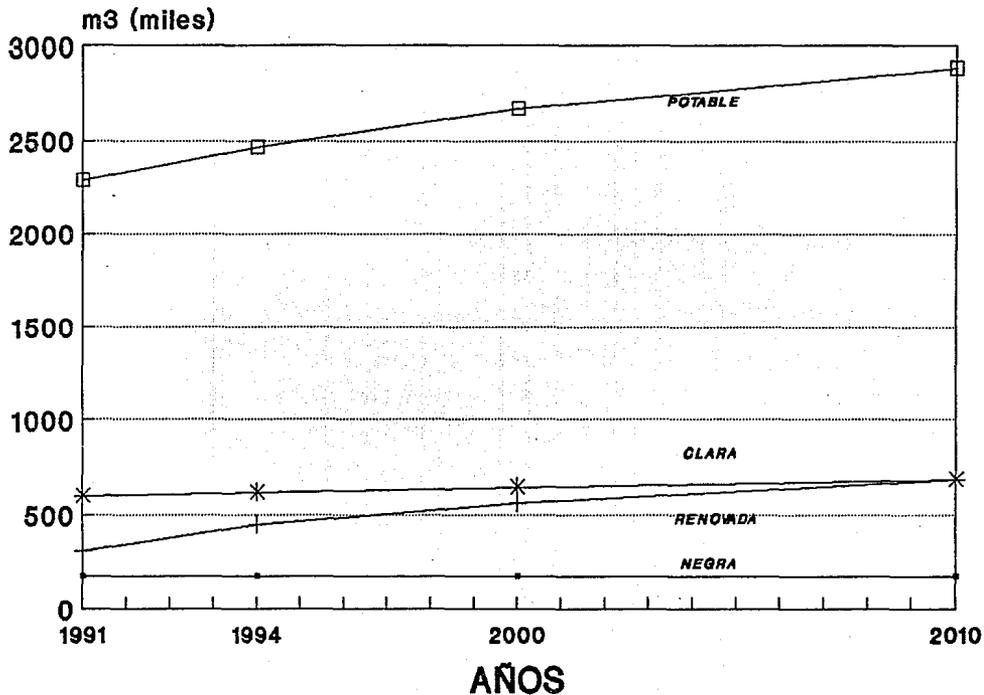


Fig. 7.2

ESCENARIO C

Volúmenes en millones de m³ por año

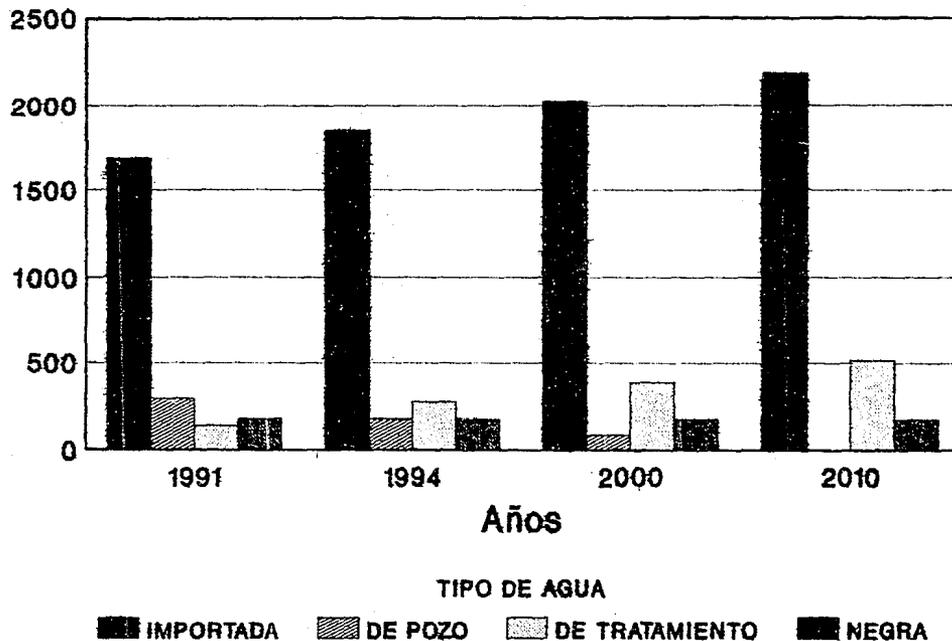


Fig. 7.13

ESCENARIO C

(Caudales en millones de m³ por año)

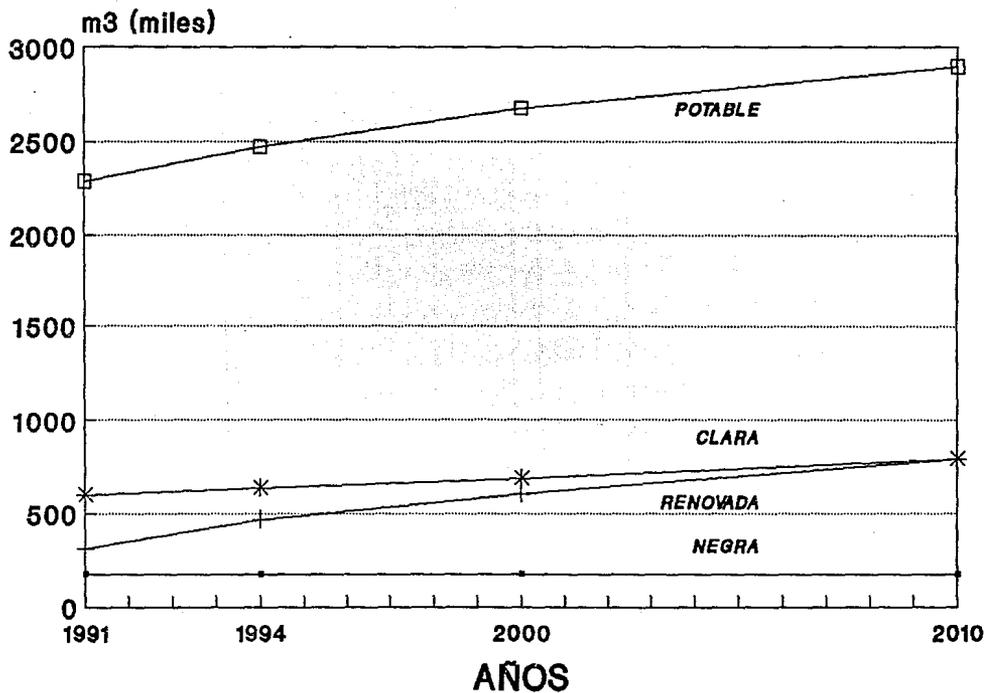


Fig. 7.3

ESCENARIO D

Volúmenes en millones de m3 por año

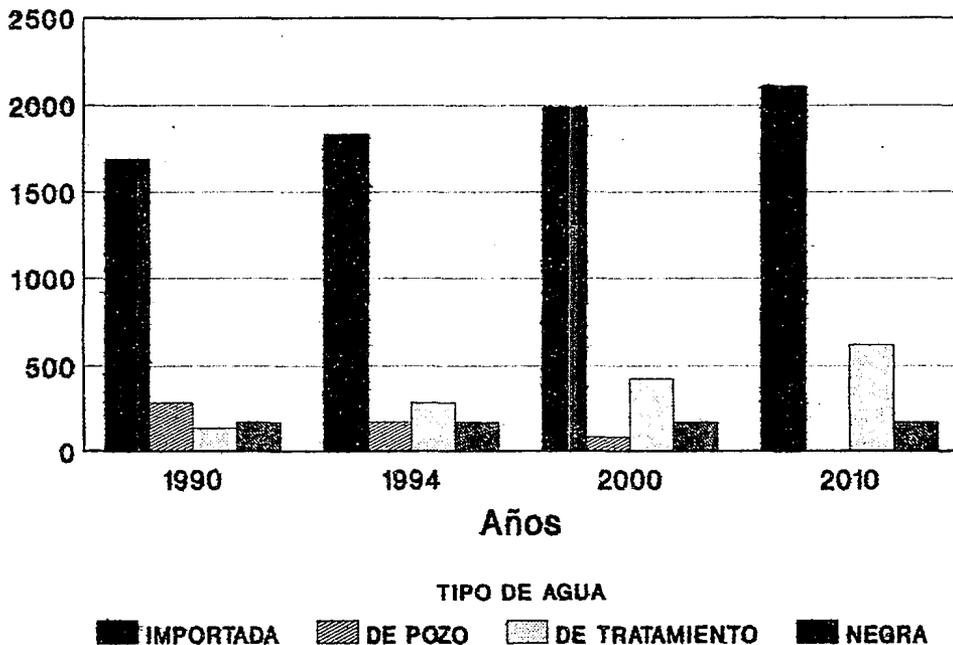


Fig. 7.1.4

ESCENARIO D

(Caudales en millones de m3 por año)

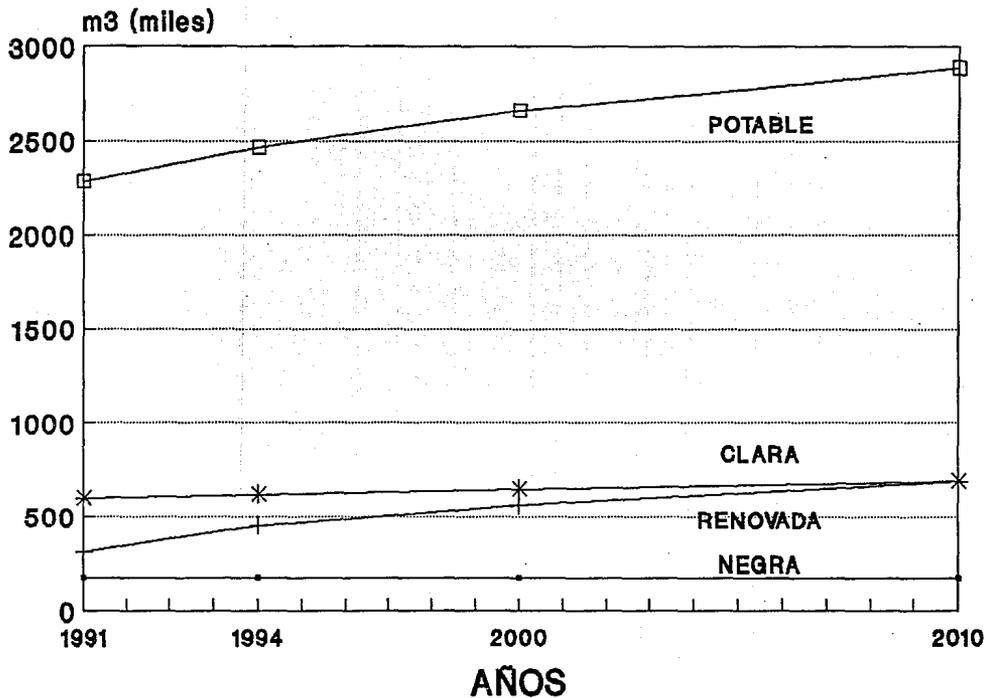


Fig. 7.4

ESCENARIO E

Volúmenes en millones de m³ por año

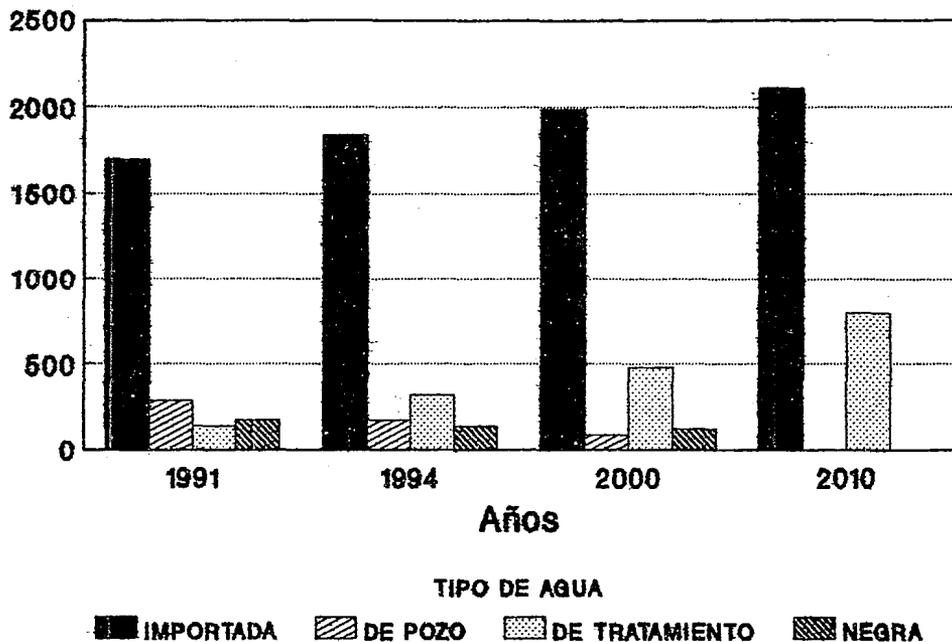


Fig. 7.15

ESCENARIO E

(Caudales en millones de m³ por año)

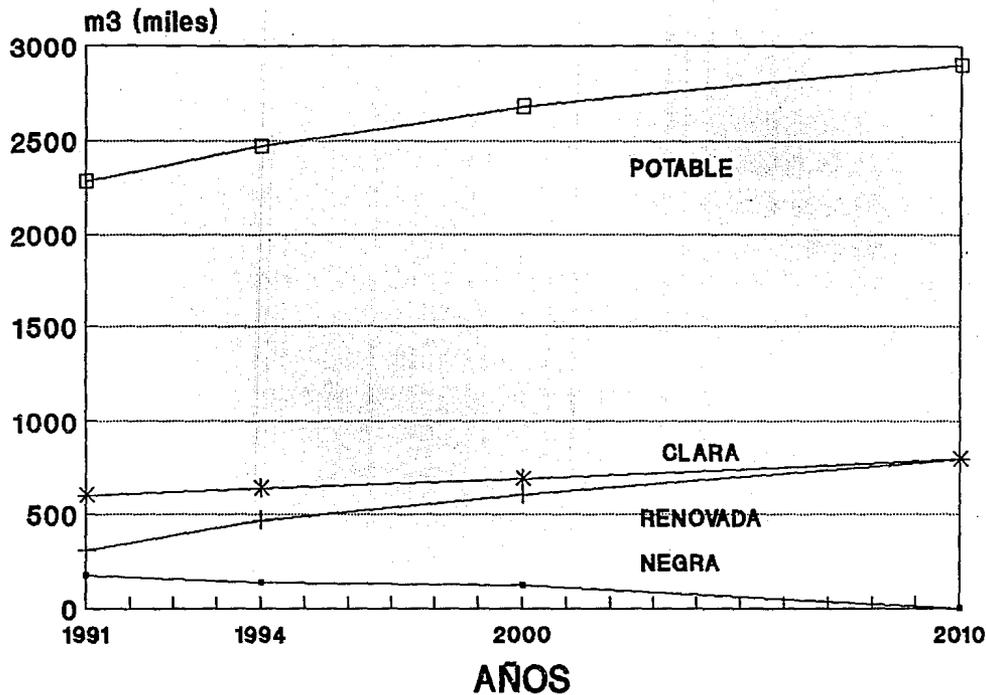
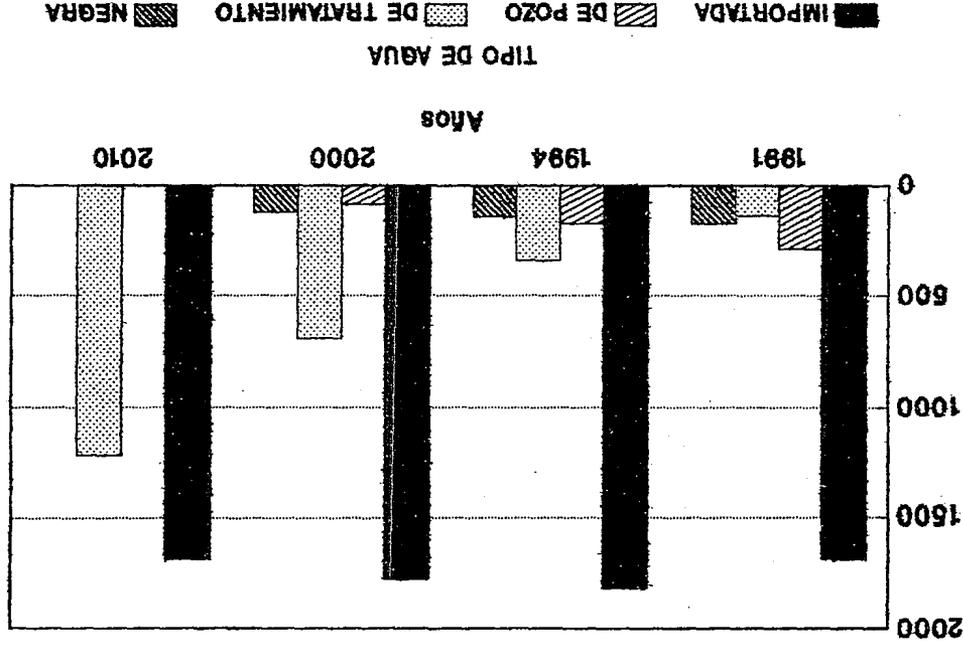


Fig. 7.5

ESCENARIO F

Volumenes en millones de m³ por año



TIPO DE AGUA

Años

IMPORTADA DE POZO DE TRATAMIENTO NEGRA

Fig. 7.1.6

ESCENARIO F

(Caudales en millones de m³ por año)

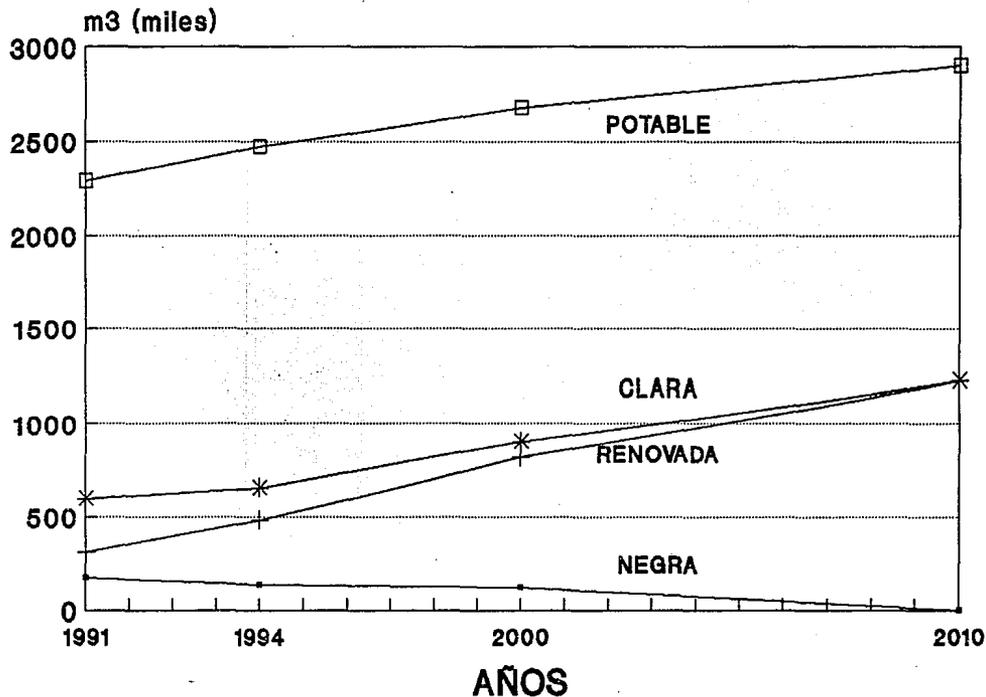


Fig. 7.6

Costos Totales por Escenario

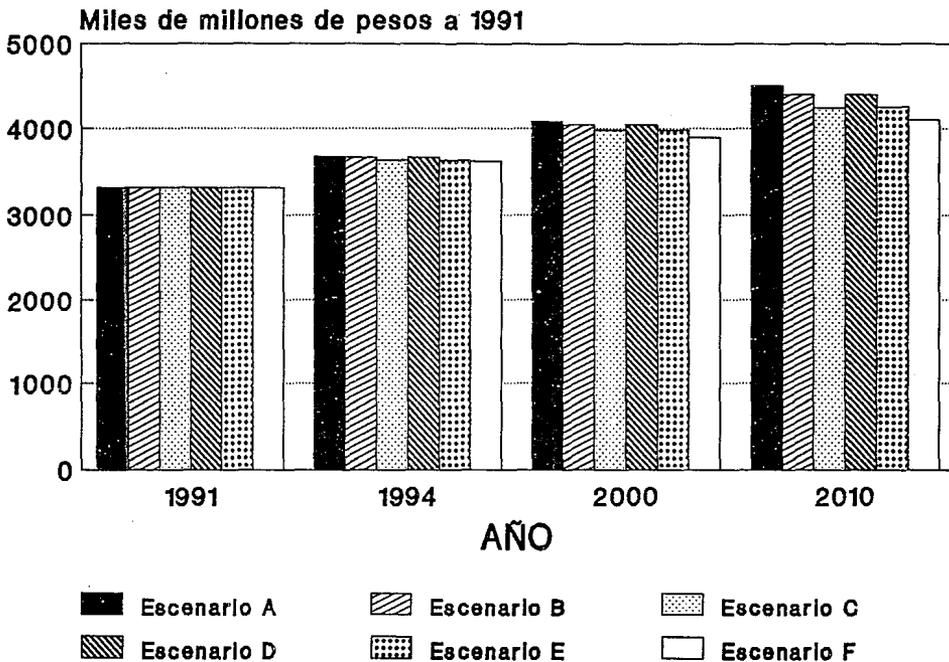


Fig. 7.7

COSTOS TOTALES

Por Escenario

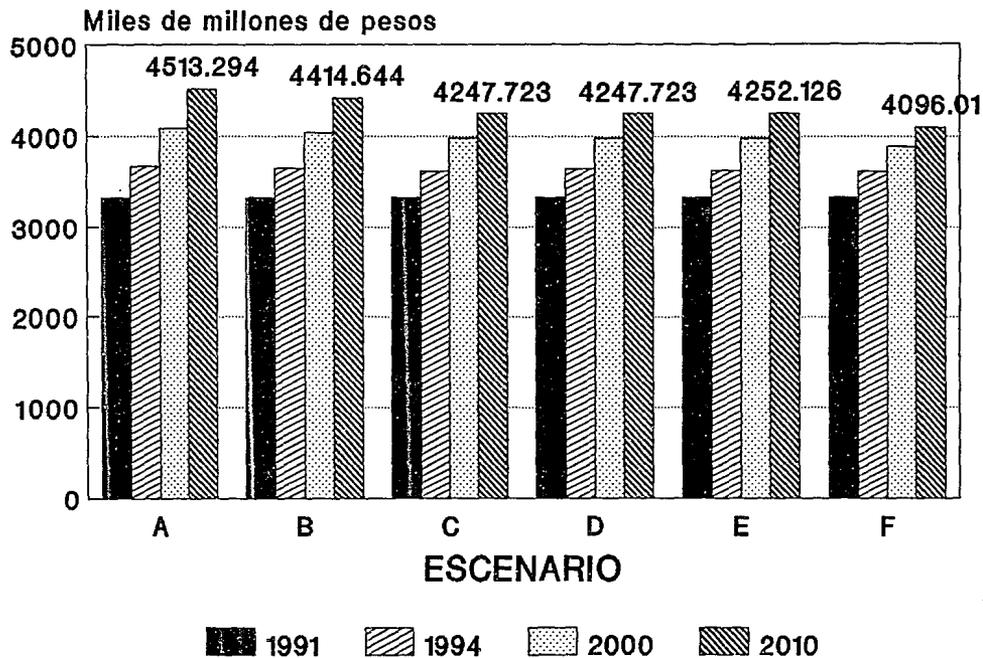


Figura 7.8

8. Discusión, Conclusiones y Recomendaciones.

La organización para proporcionar los servicios de agua potable, drenaje, tratamiento y reúso en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México ha tenido que enfrentar la dinámica asociada al crecimiento demográfico y a la complejidad técnica y administrativa que significa servir a millones de usuarios.

Las expectativas de crecimiento de la ZMCM son poco alentadoras. Estimaciones del Colegio de México, según datos del INEGI, indican que para el año 2,010 el gasto de aguas residuales que se generará será del orden de 67 m³/s (o más), un volumen con que quisieran contar otras ciudades en el mundo para poder aprovecharlas para su reúso y que en esta ciudad no lo hacemos.

Si los niveles de servicio se mantienen proporcionales a los actuales, en lo futuro se agravarán los efectos derivados de la descargas a cauces o los originados por la infiltración de aguas residuales a los acuíferos. Los requerimientos de infraestructura serán mayores y los volúmenes que saldrán de la Cuenca también lo serán, con ello se externalizará un problema que afecta zonas amplias y que podría acarrear problemas a la población.

En el presente trabajo se ha analizado la posibilidad de proporcionar tratamiento a las aguas residuales con una propuesta de sus costos inherentes, sin embargo, cabe agregar también que el tratamiento de estas aguas puede tener metas no solo para su

reúso sino para el saneamiento de cuencas en el país, lo cual representa todo una nueva alternativa que tendría sus propios esquemas de financiamiento.

La solución al problema implica inversiones cuantiosas pero también la búsqueda de alternativas que reduzcan los efectos negativos de las aguas residuales. En ese sentido, las posibilidades que tiene la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales para su reúso constituyen una posibilidad muy atractiva.

La autosuficiencia financiera de los servicios de agua potable, drenaje, tratamiento y reúso es una meta factible de lograr si se incrementa la eficiencia en la captación de ingresos y se abaten los costos asociados al suministro de los servicios. Esto es, el usuario de los sistemas de agua debería pagar también el costo del tratamiento que se le da al agua que éste usa como un servicio municipal y con esto lograr esquemas de financiamiento para el tratamiento del agua. Lo anterior repercutiría en un uso más eficiente y racional del agua puesto que costaría más. Sin embargo, es difícil alcanzar la autosuficiencia sino se encuentran debidamente integrados los aspectos técnicos, financieros, comerciales y administrativos.

Conclusiones.

La construcción de infraestructura hidráulica requiere de inversiones multimillonarias que en el caso de las redes recolectoras tiene un efecto claro aunque no sucede así con la

disposición final. El tratamiento de aguas residuales es atractivo cuando su costo compite con el de las aguas claras (de pozo) y negras; por eso, deben buscarse esquemas de reúso que garanticen la recuperación de la inversión. En este sentido, en el Valle de México, las expectativas de crecimiento de la población y los altos costos de abastecimiento generarán sin duda, una gran demanda en los próximos años.

En los próximos 20 años se espera que el incremento en la demanda de agua potable sea de aproximadamente 20.8 m³/s, lo que representa un incremento promedio anual de 1.04 m³/, aún sin tomar en cuenta la necesidad de limitar la sobreexplotación de los acuíferos que se estima en 29.5 m³/s. Estas cifras implican que aún suponiendo una implementación exitosa del los Programas para el Uso Eficiente del Agua, será necesario recurrir a nuevas fuentes de abastecimiento para satisfacer la demanda.

Para tener una idea de lo que cuesta, en términos de energía, proporcionar agua potable a la ZMCM mediante la importación de agua desde otras cuencas se puede agregar que para cuando se rebase el año 2010, en esta zona se estarán desperdiciando 12,137 millones de kwh/año por este concepto, lo que representa la mayor parte del costo en exceso de 1'125,828 millones de pesos anuales. La energía desperdiciada es equivalente a la producción de dos plantas como Laguna Verde en Veracruz (Ref. 1.8).

En la actualidad se emplean alrededor de 62.5 m³/s de agua potable, de los cuales es factible substituir por agua renovada al menos 15.7 m³/s. En los seis escenarios se hacen propuestas de reestructuración para dicha substitución que, progresivamente,

implican un incremento anual en los sistemas de tratamiento. Estos incrementos son razonables puesto que están al alcance de la capacidad técnica y de inversión de nuestro país.

En la figura 7.8 se puede observar que a medida en que se avanza en el tiempo, el escenario F es el que reporta un costo menor (a pesos de junio de 1991) dado el enfoque de reúso intensivo del agua que éste plantea. En la misma figura también es observable que aunque existe una modificación entre los escenarios C y D, los costos resultan los mismos y más aún, el escenario E se presenta un incremento en el costo del uso del agua por lo que los escenarios que a la larga pudieran significar una disminución en el costo del agua total consumida en la ZMCM resultan ser los planteados en los escenarios B y C, y como ya se mencionó, el F significaría un ahorro de aproximadamente 417.19 mil millones de pesos de junio de 1991 con respecto al escenario A, lo cual; representa una cantidad importante que podría ser empleada en algunas otras obras de interés público o bien, en la misma implantación de programas de investigación en el área del tratamiento de aguas residuales, que puedan redituar beneficios económicos adicionales. De cualquier manera se considera que las perspectivas para la construcción de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México son muy alentadoras cualitativa y cuantitativamente.

Recomendaciones.

-Intensificar la investigación en los tratamientos avanzados para disminuir su costo y para despejar dudas relativas al empleo del agua renovada para consumo humano. Se debe tomar en cuenta también que un nuevo avance tecnológico en materia de tratamiento de aguas residuales podría significar un ahorro mayor en los costos de construcción, operación y mantenimiento de este tipo de plantas.

-Incrementar los estímulos fiscales, tarifarios, jurídicos y reglamentarios para el reúso del agua.

-Contar con programas eficientes de seguimiento y control para la vigilancia de las aguas tratadas.

-Regular, en la medida de lo posible, los caudales producidos en las plantas de tratamiento, con el fin de que sean aprovechados al máximo.

-Estudiar los costos sociales que implica el hecho de emplear agua negra en el riego agrícola, que aunque está restringido a ciertos cultivos específicos para tratar de evitar daños a la salud de la población que los consume, en realidad, a pesar de todo; los generan, lo cual conlleva altos costos de asistencia médica que deben tomarse en cuenta para evaluar económicamente la ventaja de emplear aguas negras pero con un tratamiento adecuado.

-Elaborar un Manual de Construcción especializado en las Plantas de tratamiento de aguas residuales con toda la información necesaria para los especialistas en construcción, dada la importancia que en el presente y futuro, tendrán este tipo de obras en la infraestructura del país.

10. BIBLIOGRAFIA.

- 1.1 Comisión del Plan Nacional Hidráulico.
"Plan Nacional Hidráulico".
1981, SARH. México.
- 1.2 Comisión Nacional del Agua.
Subdirección General de Administración del Agua.
"Programa Nacional de Saneamiento de Cuenecas de la República Mexicana".
Gerencia de Calidad del Agua, 1991, México.
- 1.3 Comisión Sectorial de Infraestructura y Uso del Agua del Coplade-DDF.
"Tratamiento y Reuso del Agua en el Valle de México".
D.D.F. Subcomisión de Tratamiento y Reuso del Agua, Agosto de 1990.
- 1.4 Departamento del Distrito Federal.
Plan Maestro de Tratamiento y Reuso".
D.D.F. 1990, México.
- 1.5 Quadri de la Torre, G.
"Aguas Residuales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Impactos y Perspectivas)". Fundación Friedrich Ebert. 1988, D.D.F. México.
- 1.6 Murillo, F. Rodrigo.
"Sobreexplotación del Acuífero de la Cuenca del Valle de México: Efectos y Alternativas".
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua", 1991. México.
- 1.7 Flores H. Francisco y Lesser, I. Manuel.
"Mecanismos de Infiltración y Contaminación del Acuífero de la Ciudad de México".
Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, 1990, México.
- 1.8 Kumate, Jesús y Mazari, Marcos (coordinadores).
"Problemas de la Cuenca de México".
Editado por el Colegio Nacional", 1990.
- 2.1 Jornadas Técnicas Franco-Mexicanas.
"El Agua".
1991, México.
- 2.2 Beraud, J. y Fougeirol D. (BURGEAP).
"Recarga de Acuíferos en México".
Informe de la Misión de Asesoría ante la D.G.C.O.H. Agosto de 1987, México.
- 2.3 Cortés, M. Juana E.
"Remoción de microorganismos en la infraestructurahidráulica del DDR-063".

Memorias del VI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Qro., QRO. agosto de 1988, México.

- 3.1 Escalante T. Claudio A. et Al.
"Aguas Residuales y Plantas de Tratamiento"
Servicios Interdisciplinarios de Consultoría y Tecnología,
1987, México.
- 3.2 DEGREMONT.
"Manual Técnico del Agua".
1930, Bilbao, España.
- 3.3 Valiron, F.
"La réutilisation des Eaux Usées".
1986, Editions du BRGM, París, Francia.
- 3.4 Ford, Davis, L.
"Biological Proces to Remove Residual Materials from
Wastewater".
1991, University of Texas, E.U.A.
- 3.5 Brand, S. y Hawick K.
"Environmental as Infraestructure".
1990, E.U.A.
- 4.1 Ing. Rubén Barocio R. Entrevistas personales.
- 4.2 Moreno Mejía Sergio
Evaluación Técnica Económica de diferentes fuentes
subterráneas y superficiales de suministro a la ZMCM.
- 4.3 Grigg, N.
"Urban Water Infraestructure Planning, Management and
Operation".
J. Wilwey and Sons, 1986, E.U.A.
- 4.4 Murillo F., R.
"Recomendaciones para la obra civil de plantas de
tratamiento". Memoria del VII Congreso Nacional
"La ingeniería ambiental y la salud" Soc. Mex. de Ingeniería
Sanitaria y Ambiental". Septiembre de 1990.
- 4.5 Gráficas del Dr. Jorge Aguirre IMTA 1988
- 4.6 Gráficas de la Ing. Teresa Kano Gutiérrez I. de I. UNAM.
- 4.7 Entrevista personal con el Ing. Jorge Guasch de la DGCOH.
- 4.8 Entrevista personal con el Ing. Rubén Barocio, SISSA.rre
- 6.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.
- 6.2 Ley Federal de Protección al Ambiente.
- 6.3 Ley Federal de Aguas.

- 6.4 Ley General de Salud.
- 6.5 Ley de Obras Públicas.
- 6.6 Reglamento del Servicio de Agua y Drenaje para el Distrito Federal.
- 7.1 SORCHINI, P. Hugo y FLORES, H. Francisco, Coordinadores.
"Plan Maestro de Tratamiento y Reuso del Distrito Federal"
DGCOH, D.D.F. 1990.
- 7.2 Autores Varios
Estudios específicos para el Tratamiento y el Reuso de las
Aguas Residuales en la ZMCM.
DIPLASA, SGTE, SAPEGE. 1990-1991.
- 7.3 MORENO, M. Sergio.
"Evaluación Técnico-Económica de Diferentes Fuentes
Subterráneas y Superficiales de Suministro de Agua Potable
a la Ciudad de México".
DGCOH, D.D.F. 1987.
- 7.4 Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
IX Censo General de Población y Vivienda, 1990.
- 7.5 COSS, B. Raúl.
"Análisis y Evaluación de Proyectos de Inversión"
Ed. LIMUSA, 1989.
- 7.6 THUESEN H. G. et al.
"Economic Engineering"
Ed. Prentice Hall, 1987.