



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

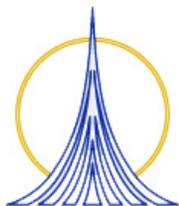
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ZARAGOZA

EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES MUNICIPALES PARA USO INDUSTRIAL EN  
TORRES DE ENFRIAMIENTO EN EL CONTEXTO DEL  
DESARROLLO SUSTENTABLE

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO QUÍMICO**  
P R E S E N T A N:  
AGUIRRE RODRÍGUEZ MARÍA DALIA  
TORRES SOLORIO OTHONIEL ABEL

ASESOR: I. Q. CRESENCIANO ECHAVARRIETA ALBITER



MÉXICO. D.F.

2005



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## *AGRADECIMIENTOS*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México porque, no cabe duda, que es nuestra máxima casa de estudios, y en especial a nuestra Facultad de Estudios Superiores Zaragoza que nos ha formado profesionalmente para extender los beneficios de la educación a la sociedad.*

*Por igual, al Ing. Cresenciano Echavarieta Albiter por su tiempo brindado en apoyo y orientación para la realización de este trabajo de tesis, pero sobre todo por la amistad que nos ha brindado.*

*A los miembros del jurado, que contribuyeron con su gran experiencia para el mejoramiento de la versión final de este trabajo.*

*Al ing. Arturo Méndez que nos brindó asesoría, contribuyendo a la mejora de la tesis.*

*A todos los profesores que nos manifestaron su orientación a lo largo de la carrera, y que gracias a ello somos capaces de enfrentarnos a cualquier problema relacionado con el área de nuestra formación.*

*Sobre todo a la generación 2001-2005, y en especial aquellas personas que nos brindaron compañerismo y amistad, en este periodo, esperando que sigamos en contacto y compartiendo momentos agradables.*

*Además a las personas que de alguna manera contribuyeron a nuestra formación y/o la realización de este trabajo.*

*¡Gracias a TODOS!*

## DEDICATORIAS

*Abel*

*A mis padres José Abel Torres Santiago y Martha Alicia Solorio Alemán, como un testimonio de gratitud y eterno reconocimiento por el apoyo que siempre se me ha brindado y con el cual he logrado terminar mi carrera profesional.*

*Padre: gracias por tu esfuerzo que siempre has mostrado para darnos lo mejor y en especial por brindarme el apoyo, comprensión y cariño que emana de ti, sin pedir nada a cambio, más que la responsabilidad y la madurez que me has inculcado, tomándolo provechosamente para llegar hasta este punto y seguirá ayudándome en el transcurso de esta vida.*

*Madre: estoy tan agradecido por tu gran corazón, y por demostrarme que luchando, aun en las peores condiciones, se puede salir adelante por los seres queridos, los anhelos y metas de la vida diaria.*

*Asimismo a mis Herman@s, Dante, Gerardo y Vianey por ser cómplices y parte de muchos momentos importantes de mi vida, además de brindarme el apoyo y comprensión necesaria. Por igual, quiero pedirles una disculpa si en algún momento se han sentido ofendid@s.*

*A mis Abuelos Paternos: Lucila (Q.E.P.D) y Trinidad (Q.E.P.D), y Abuelos Maternos: Josefina y Roberto (Q.E.P.D); por ser las personas que dieron los valores necesario y vida a esta familia tan especial.*

*A todos mis ti@s, prim@s; que en algún momento me brindaron de su tiempo, y/o han sido cómplices y parte de mi formación como ser humano. En especial a mi primo Ricardo que me dio la fuerza para seguir estudiando; y a mis “hermanos” putativos Mario y Eder que me han escuchado, acompañado y orientado en una gran parte de mi vida.*

*A mis amig@s y compañer@s, que han sido parte de mi formación profesional y personal, en especial al **Ejercito Zapatista de Liberación Nacional** que han causado la admiración y respeto, y que además me ha ayudado para ser una mejor persona, gracias a su caminar y lucha constante “Hasta la victoria siempre”; específicamente al colectivo **Sin nombre** que me han ampliado la visión que tenía de la vida; y aun más a Bettys que me ha orientado y ayudado, para reconocer y poner mayor atención a lo que nos rodea.*

*¡GRACIAS!*

*DALIA*

*A Mamá y Papá por haber estado en todo momento conmigo y no dejarme sola en los más difíciles. A ti MA por haberme guiado por el buen camino y decirme esas palabras duras para que fuera fuerte... ahora lo entiendo, si no fuera por ti, sabes que esto nunca se habría hecho realidad. A ti PA por tu apoyo económico y cuando más lo necesité moral.*

*A tod@s mis herman@s Pili, biachus, colo, ale, charo, mago, bony, oqui, miro, wipi, karo y riguito por existir... l@s quiero mucho. Te agradezco bony por apoyarme tanto en los primeros semestres de mi carrera... lo peor, a ti Ale por patrocinarme EN 2004, te lo agradezco infinitamente, a charo, por tu ayuda matemática, y no podía faltar biachuis, siempre presente en todo momento con su gran apoyo .....l@s quiero!!!*

*Agradezco a la profesora Guillermina, quien fue parte fundamental de mi formación académica, además de saber escucharme y ser mi amiga...*

*A los ingenieros Dominga Cresenciano, René de la mora, Coello, Ángel Gómez, y a los profesores J.M y Mary Jose por ser excelentes catedráticos y dejar en mí una gran instrucción profesional.*

*Gracias a Alejandro Vieyra Soto por la gran ayuda y apoyo incondicional que me ofreció durante los cuatro años de mi carrera. No tengo palabras para expresar la cantidad estratosférica de agradecimiento a la enésima potencia.*

*A mis amigos Alejandro, Abel, Jorge Y luís porque fueron una parte especial para mí en los cuatro años de la carrera, además de haber compartido tantas buenas experiencias a nivel profesional....Gracias!!*

<b>INDICE</b>	<b>Pág.</b>
<b>Resumen</b>	<b>5</b>
<b>Objetivo General</b>	<b>6</b>
<b>Objetivos Específicos</b>	<b>6</b>
<b>Justificación</b>	<b>7</b>
<b>Introducción</b>	<b>8</b>
<b>Capítulo 1. Desarrollo Sustentable</b>	<b>10</b>
1.1 Concepto y Origen De Desarrollo Sustentable	11
1.2 Condiciones para el Desarrollo Sustentable	13
1.3 Los Elementos del Desarrollo Sustentable	14
1.4 Indicadores de Sustentabilidad Comparables entre Países	16
1.5 Cultura del Reciclaje y Reuso Hacia un Desarrollo Sustentable.	19
<b>Capítulo 2. Agua y Desarrollo Sustentable</b>	<b>21</b>
2.1 Distribución y Disponibilidad del Recurso Hídrico	22
2.2 Recursos Hídricos de la República Mexicana	26
2.2.1 Situación Actual de los Recursos Hídricos en República Mexicana	27
2.2.1.1 Balance Hidrológico para la Sub Región Valle de México y Tula	29
2.2.2. Situación Actual de los Recursos Hídricos en la Región XIII (Valle De México Y Tula)	30
2.2.3 Disponibilidad y Consumo de Agua en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México	31
2.3 Cuestiones Geográficas y Socioeconómicas Nacionales y su Influencia en la Situación del Agua.	33
2.3.1 Población y Tendencias de Crecimiento	34
2.3.2 Cuestiones Geográficas y Socioeconómicas por Región Administrativa y Entidad Federativa.	36
2.3.3 Producto Interno Bruto por Entidad Federativa	37
2.3.4 Agua y Salud	40
2.4 Agua Residual Urbana Generada, Volumen Tratado, Usos y Características	42
2.4.1 Características Biológicas y Microorganismos Patógenos	43
2.4.2 Características Químicas del Agua Residual	43
2.4.2.1 Demanda Bioquímica de Oxígeno	43
2.4.2.2 Demanda Química de Oxígeno	44
2.4.3 Sabor y Olor	45
2.4.4 Generación de Agua Residual Urbana en el Valle de México	45
2.4.5 Uso de las Aguas Municipales Tratadas	46
2.4.5.1 Uso de Agua Residual Tratada por Entidad Federativa	47
2.4.5.2 Número de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales por Entidad Federativa	48
2.4. 5.3 Caudal de Agua Residual Municipal Generada por Entidad Federativa para el Caso de Estudio	49
2.4.6 Áreas Regadas con Aguas Residuales en México	49
2.5 Consumo de Agua en la Industria	49
2.5.1 Tipos de Impurezas en el Agua Utilizada por la Industria	52
2.5.2 Principales Usos de Agua en la Industria	52
2.5.2.1 Agua de Proceso	53
2.5.2.2 Agua de Alimentación para Calderas	53
2.5.2.3 Agua Contra Incendio	54
2.5.2.4 Agua para Servicios Generales	54

2.5.2.5 Agua de Enfriamiento	54
2.5.2.5.1 Usuarios del Agua de Enfriamiento	56
<b>Capítulo 3. Legislación Ambiental en Materia de Agua</b>	<b>57</b>
3.1 Ley de Aguas Nacionales	59
3.2 Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Agua	59
3.3 Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997	60
3.4 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente	60
3.5 Ley de Aguas del Distrito Federal	61
<b>Capítulo 4. Tecnologías para Tratamiento de Aguas Residuales</b>	<b>62</b>
4.1 Esquema General de Tratamiento de Aguas Negras	63
4.2 Tratamiento Primario	66
4.2.1 Cribado	67
4.2.2 Desmenuzadores	68
4.2.3 Desarenadores	68
4.2.4 Separadores de Grasas	68
4.2.5 Sedimentación	69
4.2.6 Flotación	69
4.2.7 Floculación	69
4.2.8 Filtración	70
4.3 Tratamiento Secundario	71
4.3.1 Lodos Activados	71
4.3.2 Lagunas de Aireación	72
4.4 Tratamiento Terciario	73
4.4.1 Precipitación Química	74
4.4.2 Adsorción	74
4.4.3 Desinfección	75
4.4.4 Osmosis Inversa	76
4.4.5 Intercambio Iónico	77
4.4.5.1 Intercambiadores Iónicos Inorgánicos	77
4.4.5.2 Intercambiadores Iónicos Orgánicos	78
4.4.5.3 La Materia Orgánica y su Influencia en las Resinas	84
4.5 Clasificación General de los Procesos de Desmineralización por Intercambio Iónico	85
4.5.1 Procesos del Lecho Fijo y Estado no Estacionario	86
4.5.1.1 Lechos Simples	87
4.5.1.2 Lechos Múltiples Estratificados	88
4.5.1.3 Lechos Mixtos	88
4.6 El Estado del Arte en Tratamiento de Aguas Residuales	89
<b>Capítulo 5. Costos del Agua</b>	<b>90</b>
5.1 Problemática de los precios y subsidios	91
5.2 Tarifas del Agua en México	91
5.3 Derechos por Descarga de Aguas Residuales	93
5.4 Precios del Agua Municipal Tratada	94
<b>Capítulo 6. Torres de Enfriamiento</b>	<b>96</b>
6.1 Clasificación de las Torres de Enfriamiento	97
6.1.1 Torres de Circulación Natural	97
6.1.2 Torres de Tiro Mecánico	98
6.2 Funcionamiento de Las Torres de Enfriamiento	101
6.3 Principales Problemas en Torres de Enfriamiento	101

6.3.1 Problemas de Incrustación	102
6.3.2 Problemas de Corrosión	102
6.3.3 Problemas Biológicos	102
<b>Capítulo 7. Estudio Técnico de las Tecnologías Seleccionadas</b>	<b>104</b>
7.1 Bases de Diseño	105
7.1.2 Especificación de Alimentación	106
7.1.3 Especificación de los Productos	106
7.2 Análisis Cualitativo de los Dos Procesos Elegidos para el Caso de Estudio	107
7.2.1 Proceso de Suavización por Intercambio Iónico para el Acondicionamiento del Agua para Uso en Sistemas de Enfriamiento	107
7.2.1.1. Descripción del Proceso de Suavización por Intercambio Iónico	108
7.2.1.2 Diagrama de Flujo del Proceso de Suavización por Intercambio Iónico	109
7.2.1.3 Balance de Masa del Proceso de Suavización por Intercambio Iónico	110
7.2.2 Proceso de Tratamiento Químico para el Acondicionamiento del Agua para Uso en Sistemas de Enfriamiento	110
7.2.2.1 Descripción del Proceso de Tratamiento Químico	111
7.2.2.2 Diagrama de Flujo para Acondicionamiento del Agua para Enfriamiento Usando el Tratamiento Químico	112
7.2.2.3 Balance de Masa del Proceso de Tratamiento Químico	113
7.2.3 Comparación de los Procesos Utilizados	113
<b>Capítulo 8. Evaluación Económica</b>	<b>114</b>
8.1 Premisas de Cálculo	115
8.2 Inversión Total	115
8.2.1 Alternativa 1. Tratamiento Químico	115
8.2.2 Alternativa 2. Suavización con Ciclo Sodio	116
8.3 Estimado de Ingresos	117
8.4 Estimado de Egresos	117
8.4.1 Alternativa 1	117
8.4.2 Alternativa 2	119
8.5 Análisis Financiero	120
8.5.1 Alternativa 1	120
8.5.2 Alternativa 2	121
8.6 Comparación de las Alternativas	121
8.7 Análisis de Sensibilidad	122
<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>123</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>126</b>
Anexo 1 Historia del Desagüe en la Ciudad de México	130
Anexo 2 Plantas de Tratamiento de Agua Residual Municipal a Nivel Nacional y para el Distrito Federal	139
Anexo 3 Factores de Conversión de Diversas Sustancias a CaCO <sub>3</sub> y viceversa	143
Anexo 4 Especificaciones de los Equipos	145
Anexo 5 Insumos Químicos y Dosificación	147
Memoria de Cálculo	151

## Resumen

La presente tesis esta orientada a dar una solución al gran problema de escasez de agua que existe en nuestro país mediante el aprovechamiento del agua residual municipal tratada y con esta alternativa, liberar agua de primer uso para consumo humano. El objetivo principal de este trabajo es proponer la estrategia del reuso del agua municipal tratada en la industria química, realizando una evaluación de dos alternativas de acondicionamiento del agua tratada para poder ser utilizada por la industria en sistemas de enfriamiento y considerar su factibilidad en el contexto del desarrollo sustentable del Distrito Federal.

Se plantea el concepto y origen de desarrollo sustentable, así como las condiciones requeridas para dicho desarrollo, también se abordan los índices de sustentabilidad comparados entre países, los cuatro elementos del desarrollo sustentable, la relación mercado ambiental/PIB y acciones sustentables y no sustentables. Se Aborda la situación de los recursos hídricos tanto a nivel mundial como nacional, se proporcionan datos geográficos, socioeconómicos y del sector salud nacionales y su influencia en la situación del agua, así como la cantidad de agua residual generada, volumen tratado y numero de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales a nivel nacional, las tarifas del agua fresca y residual municipal tratada, y las características del agua utilizada en la industria para distintos fines, observando un mal manejo de cobros, teniendo que el pago por este servicio no cubre el costo de la tasa marginal de recuperación del bien, tampoco el costo de su suministro y mucho menos la previsión en proyectos de desarrollo

Por otro lado se presenta la normatividad vigente en materia de agua, así como los tipos de tratamiento, y las tecnologías existentes en materia de tratamiento de aguas residuales municipales. Se hace mención de las tarifas del agua fresca y municipal tratada.

Bajo un esbozo, se presenta información básica acerca de las torres de enfriamiento y sus problemas principales por el agua utilizada. De los que destaca el mencionar que la incrustación, corrosión y formación de bacterias son los principales problemas presentados en sistemas de enfriamiento.

Para finalizar se establecen las bases de diseño, en donde se realiza una comparación cualitativa de los dos procesos seleccionados para el caso de estudio, y se realiza un estudio económico, destacando que de las dos alternativas tecnológicas, que se plantean en el presente trabajo, tratamiento químico y proceso de suavización, la primera opción es la que resulta mas rentable con una Tasa Interna de Retorno del 82%, y un VPN de \$16,673 USD.

Concluyendo que el reuso del agua municipal tratada para alimentación a torres de enfriamiento es rentable y que al implementarse en zonas donde la escasez es más marcada como en el caso del Distrito Federal beneficiará a la industria y a la población.

## **Objetivo General:**

Proponer la estrategia del reuso del agua municipal tratada en la industria, considerando dos alternativas de acondicionamiento del agua tratada para ser alimentada a torres de enfriamiento en la industria química, considerando su factibilidad en el contexto del desarrollo sustentable del D.F.

## **Objetivos Específicos:**

- Analizar la situación actual de los recursos hídricos en México en el contexto de desarrollo sustentable e Investigar las tecnologías existentes para el tratamiento de aguas residuales municipales
- Aprovechar el agua residual tratada por el gobierno del Distrito Federal, y liberar agua fresca para consumo humano.
- Establecer las características requeridas del agua de enfriamiento y los procesos existentes para su tratamiento.
- Hacer una Evaluación Técnica de los procesos más factibles de acondicionamiento de Aguas residuales Urbanas para ser utilizadas en torres de enfriamiento.
- Realizar una evaluación económica de los procesos más factibles de acondicionamiento de aguas residuales urbanas para enfriamiento.
- Seleccionar la Tecnología Adecuada para el caso de estudio.

## Justificación

Debido al creciente problema de sobreexplotación de los pozos subterráneos y el uso desmedido de agua de fuentes naturales no solo en la industria, sino también en los diferentes sectores del país se plantea la necesidad del acondicionamiento de agua municipal tratada para alimentación a torres de enfriamiento debido a que un alto porcentaje (45%) del líquido es utilizado en las industrias para enfriar diferentes etapas del proceso.

El agua residual tratada es actualmente un recurso valioso y su demanda aumentará en la medida en que decrezca la disponibilidad y se incremente la necesidad de agua de primer uso. Los problemas de escasez del agua son motivo suficiente para el estudio de alternativas para manejar el recurso y promover su uso equitativo, ya que es necesario para cualquier actividad humana.

La rentabilidad en el aprovechamiento de agua residual tratada puede valorarse desde la perspectiva de una planta de tratamiento que produzca y comercialice el agua tratada a diversos usuarios, o bien desde el punto de vista de plantas de tratamiento que aprovechen el gasto producido para el consumo interno dentro de una industria o empresa. En ambos casos, y a partir de los gastos de agua que se aprovechen, el costo por metro cúbico de tratamiento de agua residual tratada, tiende a ser favorable en comparación con los costos actuales de agua potable.

En México, principalmente en las grandes ciudades y en las zonas con mayor requerimiento de agua se ha presentado el problema de escasez del líquido por lo que en todo el país en un futuro cercano se incrementarán los programas de uso eficiente y racional del recurso hídrico, los de conservación y los del reuso.

Las experiencias a nivel industrial sobre el reuso del agua residual municipal tratada son aun muy escasas en México, sin embargo, en algunos estados de la República como es el caso de Monterrey y Coahuila se ha implementado el tratamiento de agua residual municipal domestica para el uso de un grupo de industrias, lo cual contribuye con el desarrollo sustentable.

Si el acondicionamiento de agua municipal tratada para alimentación a torres de enfriamiento contribuye a la disminución del uso industrial de agua de fuentes naturales y favorece el decremento de la sobreexplotación de los pozos en la Ciudad de México y el manejo sustentable del agua; entonces, se espera que con la implementación de esta estrategia, se disponga de más agua fresca para uso humano y se favorezca al desarrollo sustentable de la industria prolongando las reservas del vital líquido.

Por lo tanto, es preciso que todos los sectores, y en particular las instituciones gubernamentales y educativas, realicen esfuerzos y se asignen recursos que contribuyan a la definición de acciones concretas a corto plazo, que atiendan este problema nacional, y de esta manera, se evite llegar a una crisis por la falta de agua.

## Introducción

La escasez creciente del agua, su irracional uso y explotación es ya sin duda el problema prioritario que la generación presente deberá resolver a la brevedad. La relación conflictiva y poco virtuosa entre el uso del agua, su evaluación económica y su apreciación ecológica y medio ambiental nos está conduciendo en el mediano plazo a situaciones inmanejables y sin salida.

Históricamente, al agua se le ha considerado como un don o un bien público casi gratuito. Ello nos lleva a la necesidad urgente de evaluar económicamente, al medio ambiente. Al fallar el mercado en hacer explícitos los valores y servicios que proveen los recursos naturales, éstos se ofrecen en forma "gratuita", con lo que se genera una diferencia entre la valoración privada y la valoración social de los mismos.

El problema no se ha analizado desde una perspectiva integradora: sociedad /economía espacial / recursos naturales escasos / desarrollo sustentable, entre otros. Ello configura un escenario de crisis de la gestión ambiental y coloca a la Ciudad de México en un estado de alta vulnerabilidad. Más aún, la cuestión del agua no debe estudiarse desligadamente de los demás asuntos y problemas concernientes al medio ambiente y a la disponibilidad de los recursos naturales.

Las actividades económicas y el consumo se han beneficiado indiscriminadamente de los subsidios que otorgan el medio ambiente y el uso de los recursos naturales. La mejor expresión de ello es la utilización del agua sin asignarle prácticamente ningún valor económico.

Para atender las necesidades de ocho millones de habitantes, la Ciudad de México recibe 35 metros cúbicos de agua por segundo; de ellos, 20 son abastecidos por 650 pozos y el resto por los sistemas Lerma y Cutzamala. Se estima que el porcentaje de habitantes urbanos con agua corriente o que viven cerca de una toma de agua pública alcanza el 90 por ciento y el déficit es del orden de 2.14 m<sup>3</sup>/s. El consumo promedio diario por habitante es de más de 350 litros, incluyendo todos los usos, así como las pérdidas por fugas <sup>(1)</sup>

El suministro de agua potable está altamente subsidiado, las tarifas no cubren más del 30 por ciento de su precio convencional. Si agregamos a este valor los costos ecológicos, servicios y funciones que prestan los bienes ambientales y la naturaleza, su imputación nos colocaría en el umbral de una verdadera catástrofe económica y financiera. Otros problemas a los que nos enfrentamos al analizar este fenómeno son: <sup>(2)</sup>:

- Sobreexplotación y contaminación de mantos freáticos.
- Riesgo de inundación de aguas negras en la ciudad.
- Cerca de un millón de habitantes de la capital carecen de agua potable.
- Alto grado de inequidad en su distribución y consumo.
- Insatisfacción y conflictos con las poblaciones del sistema y cuencas proveedoras del líquido (ello habla de la necesidad de pensar en formas de compensación-indemnización interregionales).

- Las necesidades de agua dependen de recursos cada vez más lejanos y escasos.
- El tratamiento de aguas de la Ciudad de México es insuficiente.

El agua que se extrae implica una presión para los mantos acuíferos. Una condición necesaria para el uso sustentable de recursos de agua es que la tasa de extracción no exceda los almacenamientos renovados sobre un determinado periodo.

Al volverse más escasos los recursos hídricos en relación con la demanda y al intensificarse la competencia entre diversos usos, el agua deja de ser un bien de libre disposición para convertirse en algunos casos en una mercancía. En consecuencia se modifica la función de los gobiernos, que antes eran proveedores de agua a muy bajo costo.

El problema central de la Ciudad de México para los próximos años, será incrementar de manera sustantiva el tratamiento de las aguas residuales para poder ser reutilizadas en los diferentes sectores, así como reducir la diferencia entre extracción / recarga del manto freático. Para poder definir un proyecto de reuso, es necesario establecer cuales son los grupos de usuarios y que nivel de tratamiento se requiere. Cabe mencionar que para hacer un uso eficiente del agua se debe aplicar una política tarifaria bajo criterios de eficiencia, eficacia y equidad. <sup>(3)</sup>

# **Capítulo 1**

## **Desarrollo Sustentable**

## 1.1 Concepto y Origen de Desarrollo Sustentable

Tras la aparición de Informe sobre Nuestro futuro común (1987-1988) coordinado por Gro Harlem Brundtland en el marco de las Naciones Unidas, se fue poniendo en uso el objetivo del "desarrollo sustentable" entendiéndose por tal aquel que permite "satisfacer nuestras necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas". A la vez que se extendía la preocupación por la "sustentabilidad" se subrayaba implícitamente, con ello, la insustentabilidad del modelo económico hacia el que nos ha conducido la civilización industrial. Sin embargo, tal preocupación no se ha traducido en la reconsideración y reconversión operativa de este modelo hacia el nuevo propósito. <sup>(4)</sup>

La aceptación generalizada del propósito de hacer más "sustentable" el desarrollo económico es, sin duda, ambivalente. Por una parte evidencia una mayor preocupación por la salud de los ecosistemas que mantienen la vida en la Tierra, desplazando esta preocupación hacia el campo de la gestión económica. Otra preocupación es la grave indefinición con la que se maneja este término, empuja a hacer que las buenas intenciones que lo informan se queden en meros gestos en el vacío, sin que a penas contribuyan a reconvertir la sociedad industrial sobre bases más sustentables.

El extendido uso del epíteto "sustentable" en la literatura económico-ambiental se inscribe en la inflación que acusan las ciencias sociales de términos de moda cuya ambigüedad induce a utilizarlos más como conjuros que como conceptos útiles para comprender y solucionar los problemas del mundo real. Como ya había advertido tempranamente Malthus en sus "Definiciones en Economía Política" (1827), el éxito en el empleo de nuevos términos viene especialmente marcado, en las ciencias sociales, por su conexión con el propio status mental, institucional y terminológico ya establecidos en la sociedad en la que han de tomar cuerpo. El éxito del término "sustentable" no es ajeno a esta regla, sobre todo teniendo en cuenta que nació acompañando a aquel otro de "desarrollo" para hablar así de "desarrollo sustentable". <sup>(4)</sup>

Cuando a principios de la década de los setenta el Primer Informe del Club de Roma sobre los límites del crecimiento, junto con otras publicaciones y acontecimientos, pusieron en tela de juicio la viabilidad del crecimiento como objetivo económico planetario, Ignacy Sachs (consultor de Naciones Unidas para temas de medioambiente y desarrollo) propuso la palabra "ecodesarrollo" como término de compromiso que buscaba conciliar el aumento de la producción, que tan perentoriamente reclamaban los países del Tercer Mundo, con el respeto a los ecosistemas necesario para mantener las condiciones de habitabilidad de la tierra. Este término empezó a utilizarse en los círculos internacionales relacionados con el "medioambiente" y el "desarrollo", dando lugar a un episodio que vaticinó su suerte. Se trata de la declaración en su día llamada de Cocoyoc, por haberse elaborado en un seminario promovido por las Naciones Unidas al más alto nivel, con la participación de Sachs, que tuvo lugar en 1974 en el lujoso hotel de ese nombre, cerca de Cuernavaca, en México. El propio presidente de México, Echeverría, suscribió y presentó a la prensa las resoluciones de Cocoyoc, que hacían suyo el término

"ecodesarrollo". Unos días más tarde, según recuerda Sachs en una reciente entrevista, Henry Kissinger manifestó, como jefe de la diplomacia norteamericana, su desaprobación del texto en un telegrama enviado al presidente del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente: había que retocar el vocabulario y más concretamente, el término "ecodesarrollo" que quedó así vetado en estos foros. Lo substituyó más tarde aquel otro del "desarrollo sustentable", que los economistas más convencionales podían aceptar sin recelo, al confundirse con el "desarrollo auto sostenido" (self sustained growth) introducido tiempo atrás por Rostow y manejado profusamente por los economistas que se ocupaban del desarrollo.

Sostenido (sustained) o sustentable (sustainable), se trataba de seguir promoviendo el desarrollo tal y como lo venía entendiendo la comunidad de los economistas. Poco importa que algún autor como Daly matizara que para él "desarrollo sustentable" es "desarrollo sin crecimiento", contradiciendo la acepción común de desarrollo que figura en los diccionarios estrechamente vinculada al crecimiento.

Predominó así la función retórica del término "desarrollo sustentable" subrayada por algunos autores, que explica su aceptación generalizada: la sustentabilidad parece ser aceptada como un término mediador diseñado para tender un puente sobre el golfo que separa a los "desarrollistas" de los "ambientalistas". La engañosa simplicidad del término y su significado aparentemente manifiesto ayudaron a extender una cortina de humo sobre su inherente ambigüedad. En fin que parece que lo que más contribuyó a sostener la nueva idea de la "sustentabilidad" fueron las viejas ideas del "crecimiento" y el "desarrollo" económico, que tras la avalancha crítica de los setentas necesitaban ser apuntaladas.

De esta manera, veinte años después de que el Informe del Club de Roma preparado por Meadows sobre los límites del crecimiento (1971) pusiera en entredicho las nociones de crecimiento y desarrollo utilizadas en economía, estamos asistiendo ahora a un renovado afán de hacerlas "sustentables" asumiendo críticamente esas nociones que se habían afianzado abandonando las preocupaciones que originariamente las vinculaban al medio físico en el que se encuadraban. La forma en la que se ha redactado y presentado en 1992 un nuevo Informe Meadows, titulado "Más allá de los límites" constituye un buen exponente de la fuerza con la que soplan los vientos del conformismo conceptual en el discurso económico. El deterioro planetario y las perspectivas de enderezarlo son bastante peores que las de hace veinte años, pero los autores, para evitar que se les tilde de catastrofistas, se sienten obligados a estas alturas a escudarse en la confusa distinción entre crecimiento y desarrollo económico, para advertir que, "pese a existir límites al crecimiento, no tiene por qué haberlos al desarrollo" y a incluir el prólogo de un economista tan consagrado como es Tinbergen, y galardonado además con el premio Nobel, en el que se indica que el libro es útil porque "clarifica las condiciones bajo las cuales el crecimiento sostenido, un medio ambiente limpio e ingresos equitativos pueden ser organizados".<sup>(4)</sup>

Sin embargo, a la vez que se extendió la utilización banalmente retórica del término "desarrollo sustentable", se consiguió también hacer que la idea misma de "sustentabilidad" cobrara vida propia y que la reflexión sobre la viabilidad a largo plazo de los sistemas agrarios, industriales o urbanos tuviera cabida en las reuniones y proyectos de administraciones y universidades, dando lugar a proyectos como el **Protocolo de Kyoto**, el cual tiene como objetivo conseguir la reducción de un 5.2% las emisiones de gases de efecto invernadero globales sobre los niveles de 1990 para el periodo 2008-2012. Este es el único mecanismo internacional para empezar a hacer frente al cambio climático y minimizar sus impactos hacia un desarrollo sustentable.

## **1.2. Condiciones para el Desarrollo Sustentable**

Para concretar la alternativa de la sustentabilidad hacen falta cambios en diversos ámbitos de la economía y de la sociedad, especialmente en lo que se refiere a la relación del hombre con el ambiente.

El modelo o estilo de desarrollo actual concede a un valor primordial a todo incremento en el beneficio económico sin considerar la necesidad de mejorar directamente el bienestar de la humanidad en general, y sin considerar sus repercusiones negativas en el ambiente.

En consecuencia, el crecimiento ininterrumpido que se ha alcanzado con la industrialización del planeta ha traído consigo la contaminación de agua (Ríos, mantos freáticos, océanos), suelos (Erosión, desertización, etc.) y aire (Contaminación atmosférica, adelgazamiento de la capa de ozono, etc.) por mencionar sólo algunos ejemplos.

Así, la producción industrial, acompañada de patrones de consumo inmoderado que han encontrado en los medios de comunicación el vehículo ideal para socializar hábitos de consumo insustentable, ha posibilitado el agotamiento sistemático de los recursos necesarios para la vida en el planeta.

El estilo de vida basado en la producción industrial y el consumo masivo se ha extendido a lo largo y ancho del mundo, involucrando en sus efectos, pero también en su responsabilidad a gran parte de los habitantes del planeta. De ello se desprende que la tarea de revertir los daños y de construir un desarrollo humano sustentable es una tarea social.

**La construcción social de desarrollo sustentable tiene que considerar, entre otras condiciones, las siguientes:**

- Un cambio en los conceptos actuales de las necesidades básicas, de bienestar y de calidad de vida.
- Un cambio para que el acceso de los recursos esté en posibilidades de beneficiar a la mayoría de la gente.
- La participación social amplia en la toma de decisiones.
- Una reorientación hacia el desarrollo y uso de tecnologías limpias.
- La responsabilidad ética de nuestra generación por todos los seres vivos y las futuras generaciones.

- Conciencia de la interdependencia global y ecológica de los procesos sociales.
- La constitución de un naturalismo-humanizado y un humanismo-naturalista.

### Consideraciones para la sustentabilidad

La sustentabilidad deberá considerar la ampliación de su campo conceptual con una visión compleja de la realidad, así como su campo espacial, con un conocimiento en la globalización de las mercancías y de los recursos naturales y una temporalidad transgeneracional con respecto al futuro.

Se trata de pensar al planeta y a la especie humana de una manera distinta. Cambiar la concepción que se tiene de identidad, satisfacción de necesidades, nacionalidad, género, medio ambiente, y por supuesto, producción y consumo.

En este contexto, la agenda XXI reconoce “Que la causa principal del deterioro ambiental lo representa el modelo de consumo insustentable”. Este documento invita a encontrar nuevos mecanismos que minimicen la depredación y reduzcan la contaminación. De la misma forma, sugiere el apoyo tecnológico de los países más ricos, a los países en desarrollo.<sup>(5)</sup>

### 1.3 Los Elementos del Desarrollo Sustentable

Los elementos de la sustentabilidad son cuatro pilares que deben estar en constante equilibrio para que el ser humano logre una relación armónica con la naturaleza, beneficiándose de ella y que el beneficio sea repartido en términos equitativos.



Figura 1.3.1 Elementos para el desarrollo sustentable

Para poder alcanzar la sustentabilidad es indispensable que la sociedad contemporánea realice una serie de acciones en cada una de los elementos señalados en la figura 1.3.1. A continuación se señalan algunas de las estrategias que, a la luz del imperativo de la sustentabilidad, resultan impostergables.<sup>(5)</sup>

### **En la dimensión económica**

- Reducir continuamente los niveles de desperdicio en el consumo de energía y otros recursos naturales, por medio de una mayor eficiencia y del cambio en los estilos de vida.
- Cambiar los patrones de consumo que amenazan sin necesidad la biodiversidad y el medio ambiente.
- Utilizar recursos financieros, técnicos y humanos para desarrollar tecnologías más limpias y menos intensivas en el uso de los recursos.
- Generar políticas para que todas las personas tengan un acceso más igualitario a los recursos.
- Transferir dinero del presupuesto de impuestos a las necesidades del desarrollo humano con equidad.
- Comprometer los recursos hacia el continuo mejoramiento de la calidad de vida.
- Combatir la pobreza absoluta y extrema.
- Mejorar el acceso a la tierra, la educación y los servicios sociales.
- Desarrollar un sector de producción eficiente para crear más fuentes de empleo y producir para el consumo y para los mercados locales y regionales.

### **En la dimensión social**

- Estabilizar la población mejorando la calidad de vida
- Disminuir la migración hacia las ciudades por medio de un desarrollo rural sustentable.
- Adoptar medidas políticas y tecnológicas que minimicen las consecuencias de la urbanización.
- Mejorar los niveles sociales de alfabetización.
- Hacer que los beneficios esenciales para la salud sean más accesibles.
- Mejorar el bienestar social, protegiendo la diversidad cultural e invirtiendo en el bienestar humano.
- Estimular una amplia participación ciudadana en la toma de decisiones.
- Cambiar los patrones de consumo y los estilos de vida.

### **En la dimensión ambiental.**

- Usar con mayor eficiencia los abastos de agua y las tierras de cultivo.
- Mejorar las prácticas agrícolas y las tecnologías para incrementar la producción.
- Evitar el uso excesivo de fertilizantes y pesticidas químicos.
- Conservar el agua eliminando los hábitos y usos industriales que la desperdician, mejorando la eficiencia de los sistemas de agua.

- Mejorar la calidad del agua y limitar la toma de aguas superficiales.
- Conservar la biodiversidad deteniendo lo más posible la extinción y la destrucción de hábitats y ecosistemas.
- Utilizar cuidadosamente los sistemas de irrigación.
- Evitar el cultivo de tierras en lugares de alta pendiente o marginal.
- Disminuir o detener la destrucción de los bosques tropicales, los ecosistemas de arrecife de coral, manglares y otros humedales, al igual que otros hábitats únicos para conservar la diversidad biológica.

### **En la dimensión tecnológico-cultural**

- Cambiar nuestras tecnologías por unas que sean más eficientes y limpias, que minimicen el consumo de energía y de otros recursos naturales, que no contaminen el aire, el agua o el suelo.
- Reducir las emisiones de carbono para limitar el índice de incremento global de los gases de invernadero y, eventualmente, estabilizar las concentraciones atmosféricas de estos gases.
- Reducir considerablemente el uso de combustibles fósiles, sustituyéndolos con el tiempo con otras fuentes de energía.
- Suprimir el uso de los clorofluorocarbonos (CFC) para prevenir la degradación de la capa de ozono protectora del planeta. Asimismo, disminuir la producción de gases que provocan el efecto invernadero y el calentamiento global.
- Preservar las tecnologías tradicionales que crean pocos desechos y contaminantes, que reciclan los desperdicios y que trabajan con o apoyan a los sistemas naturales.
- Apoyar políticas gubernamentales para la rápida adopción de tecnologías mejoradas, e instrumentar acciones que las fomenten.

### **1.4. Indicadores de Sustentabilidad Comparables entre Países**

Hablando objetivamente de indicadores de sustentabilidad comparables entre países, el análisis con mayor alcance y rigor que se ha llevado a cabo hasta ahora en el mundo establece un incómodo pero muy sugerente común denominador entre **México**, El Salvador, India, Perú, Filipinas, Tailandia, Turquía, Ucrania, Vietnam y Zimbawe. Todos ellos pertenecen al último quintil (o último veinte por ciento) (Tabla 1.4.1) en la jerarquía de países clasificados de acuerdo al índice de sustentabilidad recién publicado por el World Economic Forum, conjuntamente con las universidades de Yale y Columbia. Esto no es más que una constatación numérica e imparcial de la necesidad de una profunda reforma institucional y en las políticas públicas en el área ambiental.

**Tabla 1.4.1 índice de Sustentabilidad Ambiental a nivel mundial**

<b>PRIMER QUINTIL</b>	<b>SEGUNDO QUINTIL</b>	<b>TERCER QUINTIL</b>	<b>CUARTO QUINTIL</b>	<b>QUINTO QUINTIL</b>
Australia	Argentina	Bélgica	Bulgaria	Egipto
Austria	Alemania	Bolivia	China	El Salvador
Canadá	Israel	Brasil	Colombia	India
Dinamarca	Japón	Chile	Grecia	<b>México</b>
Finlandia	Holanda	Costa Rica	Indonesia	Perú
Francia	Portugal	República Checa	Jordania	Filipinas
Islandia	Rusia	Ecuador	Malasia	Tailandia
Irlanda	República Eslovaca	Hungría		Turquía
Nueva Zelanda	España	Italia	Mauritania	Ucrania
Noruega	Reino Unido	Korea	Singapur	Vietnam
Suiza	Estados Unidos	Polonia	Africa del Sur	Zimbawe
Suecia			Venezuela	

**FUENTE:** (6)

El exitoso desarrollo del mercado ambiental está directamente vinculado a las características y comportamiento de diversas variables económicas, políticas y sociales, así como la existencia de un adecuado aparato regulatorio e institucional conjugado con mecanismos eficientes de información.

Esto se confirma observando la relación directa que existe entre el nivel de desarrollo económico, institucional y social de los países y el volumen de su mercado ambiental. Los países o regiones con un mayor mercado ambiental son Estados Unidos, Europa Occidental, Japón, Canadá, Australia y Nueva Zelanda, es decir, el grupo de países desarrollados y que cuentan con una alta densidad regulatoria ambiental. La relación entre el valor del mercado ambiental y el PIB (MA/PIB) de cada país, es un indicador del esfuerzo y la importancia que cada sociedad asigna a la solución de los problemas ambientales (Tabla 1.4.1.2)

**Tabla 1.4.1.2 MA/PIB de cada país**

<b>Relación Alta</b>	
<b>PAIS</b>	<b>MA/PIB</b>
Suecia	3,29
Suiza	3,09
E.U	2,78
Alemania	3,60
Holanda	2,57
Bélgica	2,36
Austria	2,27
Canadá	2,01
<b>Relación Media</b>	
Reino Unido	1,91
Francia	1,87
Singapur	1,74
Italia	1,48
Taiwán	1,48
Malasia	1,27
Corea del Sur	1,18
Hong Kong	1,16
<b>Relación Baja</b>	
Tailandia	0,97
Chile	0,86
Brasil	0,68
Indonesia	0,68
Argentina	0,63
<b>México</b>	<b>0,61</b>
Colombia	0,59
Venezuela	0,52

FUENTE: (6)

En México, el mercado ambiental tiene un bajo desarrollo, alcanzando apenas un poco más de 0,6% del PIB, mientras que en países industrializados ésta relación llega a superar el 3%. Conforme se mantenga el proceso de desarrollo del país y se fortalezcan las preferencias sociales a favor del medio ambiente y del desarrollo sustentable, ésta cifra tenderá a elevarse, de acuerdo a algunas proyecciones preliminares, hasta el 1,8% del PIB en el año 2010. <sup>(6)</sup>

En la tabla 1.4.2.3 se muestra una comparación entre acciones sustentables e insustentables para facilitar el entendimiento del término.

**Tabla 1.4.2.3 Comparación de acciones sustentables y no sustentables**

<b>Sustentable</b>	<b>No Sustentable</b>
Combate a la pobreza	Pobreza Extrema
Promoción de la educación, la concientización pública y la capacitación.	Alto analfabetismo, no capacitación e inconciencia pública.
Protección y promoción de la salud humana	Insalubridad
Promoción del desarrollo de asentamientos humanos sustentables.	Asentamientos humanos insustentables
Transferencia de tecnología	No transferir tecnología
Protección de océanos, todo tipo de mares y áreas costeras.	Contaminación de los océanos, mares y áreas costeras
Combate a la deforestación	Tala inmoderada de los árboles.
Conservación de la diversidad biológica	Extinción de la biodiversidad.
Protección de la atmósfera	Contaminación de la atmósfera.
Manejo ambientalmente limpio de desechos sólidos y aspectos relacionados con aguas servidas.	Manejo insustentable del agua y desechos sólidos.
Integración del medio ambiente y el desarrollo industrial en la toma de decisiones.	No involucrar al medio ambiente para la toma de decisiones en lo referente al desarrollo industrial.

**FUENTE:** (5)

### **1.5 Cultura del Reciclaje y Reuso Hacia un Desarrollo Sustentable.**

Primero debemos diferenciar entre reciclaje y reuso. El reciclaje se entiende como la actividad que las industrias llevan a cabo internamente con el fin de reducir su consumo de agua mediante sistemas de recuperación y tratamientos. Así, por ejemplo, una industria papelera que recupera sus aguas y las trata para su uso nuevamente está reciclando esas aguas.

El reuso consiste en tomar aguas residuales de alguna fuente externa a la industria y tratarla para ser reutilizada en ésta. Por ejemplo, esto se cumple al tomar agua residual de origen municipal y tratarla con el fin de usarla en la industria para torres de enfriamiento.

Pasando a otro aspecto, los beneficios de tratar el agua son, entre otros, económicos, pues al disminuir el consumo de la potable y descargar dentro de los parámetros establecidos, se evita el pago de derechos por consumo y por descargas fuera de la norma. Un segundo beneficio es la sustentación y permanencia de la empresa. En un entorno en donde el agua es un bien escaso como Monterrey, Torreón o Puebla, la industria debe garantizar su futuro recuperando parte de ellas y recurrir al uso de aguas tratadas en donde sea disponible.

Las industrias deberán recurrir cada vez más a las aguas tratadas, pues los recursos hidráulicos son más escasos y por lo tanto se le debe de dar prioridad a las necesidades de la población. El reciclaje dentro de la industria constituye una buena parte de la solución, tanto desde el punto de vista ecológico, como para facilitar el cumplimiento de la normatividad y para obtener una mayor rentabilidad en las industrias".

Falta una mayor aplicación de las leyes. "Si se hicieran efectivas las normas, la mayoría de las descargas deberían tratarse". En segundo lugar, para que el reuso sea atractivo deberá tomarse en cuenta el costo del agua potable contra el agua tratada. Por último, urge una mayor conciencia entre los industriales para prevenir la contaminación. Los ecosistemas no soportan la carga de contaminantes y debemos actuar a favor de las futuras generaciones.

Los beneficios del reciclaje de agua son incuestionables. El concepto de rentabilidad no se puede separar del costo ecológico, lo cual es igual a un costo ambiental que conlleva a un precio económico a veces imposible de cubrir. Por lo tanto, el medio empresarial tiene el compromiso ineludible de tratar sus aguas para el reuso.

Sin embargo, debido a los problemas económicos por los que atraviesa el mundo, México cuenta con escasas perspectivas para invertir en una medida justa en proyectos ecológicos. No se debe olvidar que la mayoría de los equipos y maquinarias son importados, y la inestabilidad cambiaria limita la adquisición requerida.

A esto se añaden otras limitantes, además de las económicas, como las culturales. "Debemos pugnar por una cultura del agua, en este caso en particular y por la sustentabilidad del desarrollo." <sup>(7)</sup>

## **Capítulo 2**

# **Agua y Desarrollo Sustentable**

## 2.1 Distribución y Disponibilidad del Recurso Hídrico

Aun cuando 70% del planeta está cubierto por agua, 97.5% es agua salada que forma los océanos. El resto, 2.5%, es agua dulce, de la cual 70% se encuentra congelado en los glaciares y nieves perpetuas y la mayor parte del resto se localiza en la humedad del suelo, en los pantanos o a profundidades inaccesibles como las aguas subterráneas. Las aguas superficiales de ríos y lagos representan solamente 105 000 km<sup>3</sup>. El resultado de este balance es que el agua disponible en el planeta para abastecer los ecosistemas y a la población humana, entre aguas subterráneas accesibles y superficiales, es menos de 1% del total de agua dulce y únicamente 0.1% del agua existente en todo el planeta (TABLA 2.1.1). De los 200 000 km<sup>3</sup> de agua disponible para los ecosistemas y la población humana sólo 42 780 km<sup>3</sup> se consideran como agua renovable cada año, aunque esto puede variar entre 15% y 25% del total, dependiendo de los años.<sup>(8)</sup>

La distribución del agua renovable es muy diferente entre las distintas regiones del planeta. El continente americano concentra la mayor disponibilidad de agua a nivel mundial (19 920 km<sup>3</sup>). Con algo más de 31.3% de la superficie terrestre y 13.7% de la población global, la región cuenta con casi 47% de la disponibilidad mundial total de recursos hídricos renovables.

En el continente americano, es en América Latina y el Caribe donde se concentra el mayor volumen de recursos hídricos y particularmente en Suramérica, gracias a sus importantes formaciones lacustres y ríos. La disponibilidad potencial de agua por km<sup>2</sup> en Suramérica duplica el promedio mundial y no tiene comparación con ninguna otra región. Solamente Brasil conserva cerca de 40% al total de los recursos hídricos regionales. Los estados insulares caribeños reciben por su parte una precipitación muy inferior a aquella de la que disponen sus homólogos de otras regiones del mundo, como el Pacífico o el Océano Índico y es ésta la única fuente de agua dulce de la que disponen (Antigua y Barbuda, las Bahamas y Barbados usan agua desalada). La mayor parte de los recursos de agua dulce del continente yace en las capas subterráneas. Se calcula que en América del Sur, las reservas de aguas subterráneas son de 3 millones de km<sup>3</sup>.

Aunque el promedio regional de precipitación anual indica una gran abundancia del recurso hídrico en el continente americano con respecto a otras regiones, su distribución irregular tanto en el espacio como en el tiempo, genera situaciones de disponibilidad restringida o incluso de estrés en algunos casos. La región cuenta con grandes extensiones áridas o semiáridas. Las diferencias en la distribución de los recursos hídricos no sólo ocurren entre regiones o países sino dentro de los países. La distribución de los biomas se encuentra vinculada a la variación climática (precipitación pluvial, temperatura, humedad y vientos), determinada por la altitud y latitud geográfica.

En las regiones en las que las temperaturas son altas y las precipitaciones escasas se distribuyen los desiertos. En las regiones cálidas con precipitaciones intermedias se ubican los bosques tropicales secos y en las cálidas más húmedas los bosques tropicales húmedos. En las zonas lluviosas

frías los bosques templados y por lo general los pastizales y sabanas se presentan en las zonas de precipitación y temperatura intermedia. Existe una correlación entre las precipitaciones altas y temperaturas cálidas con la presencia de mayor biodiversidad. <sup>(8)</sup>

**Tabla 2.1.1. Disponibilidad de agua en el planeta**

	Volumen Km <sup>3</sup>	%
Total de Agua	1431,000,000	100
Salada	1395,000,000	97.5
Dulce	36,000,000	2.5
Dulce Congelada	25,000,000	1.75
Subterránea y en humedad del suelo	10,780,000	0.75
Superficial	105,000	0.01
<b>Disponible para ecosistemas y población humana</b>	200,000	>0.01

**FUENTE:** (8)

Como se puede observar en la tabla 2.1.2, la mayor disponibilidad anual promedio de agua renovable por regiones se encuentra en el continente asiático con 13,510 Km<sup>3</sup>/año, seguido de Suramérica con 12,030 Km<sup>3</sup>/año.

**Tabla 2.1.2 Disponibilidad anual promedio de agua renovable por regiones**

Región	Agua Disponible (Km <sup>3</sup> /año)	Disponibilidad de agua por habitante (1000m <sup>3</sup> /año)
Europa	2900	4.23
Norteamérica	7890	17.4
África	4050	5.72
Asia	13510	3.92
Suramérica	12030	38.2
Australia y Oceanía	12400	83.7
Total mundial	42780	7.6

**FUENTE:** (8)

En la figura 2.1.1 se observa el porcentaje de población con servicio de agua potable a nivel mundial, en donde podemos observar que en países como Estados Unidos, Canadá, Australia, Francia y los Países Bajos, el 100% de la población cuenta con servicio de agua potable, y en países como China, Brasil y México, todavía hay gran deficiencia en el servicio de agua potable para la población, por otro lado, en la figura 2.1.2 se puede ver el porcentaje de la población mundial con servicio de alcantarillado en donde se observa una situación similar al servicio de agua potable. En ambas figuras se pone de manifiesto que en los países altamente desarrollados existe en una mayor proporción el Desarrollo Sustentable.

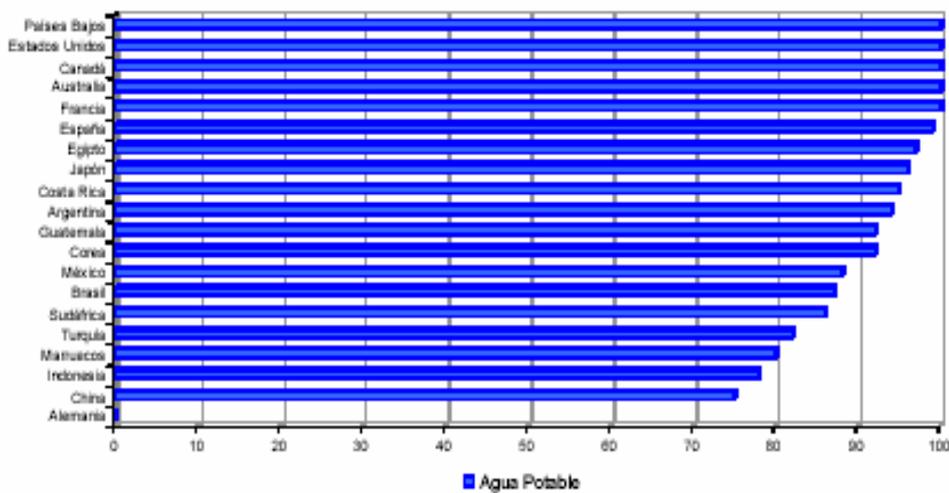


Figura 2.1.1 Porcentaje de Población con Servicio de Agua Potable a Nivel Mundial

FUENTE: (9)

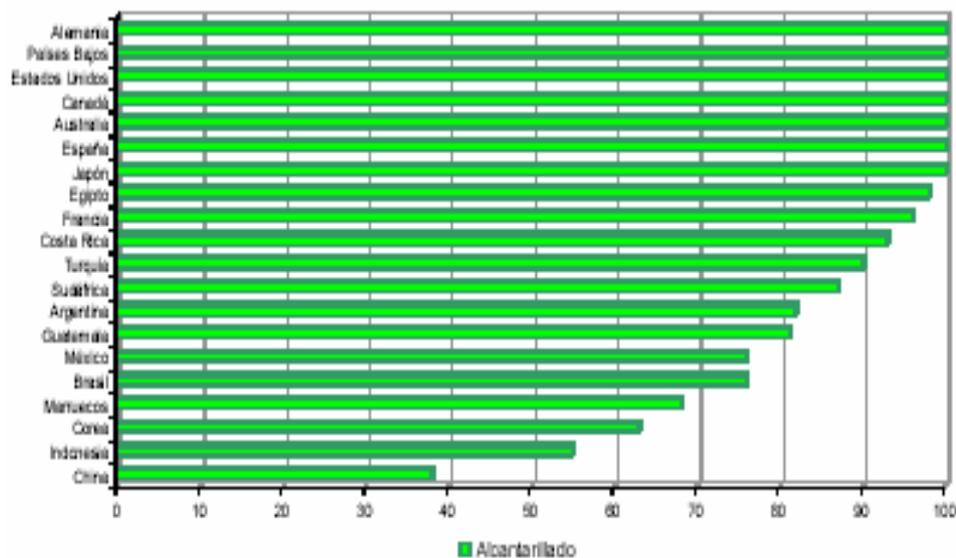


Figura 2.1.2 Porcentaje de Población con Servicio de Alcantarillado a Nivel Mundial

FUENTE: (9)

En la Tabla 2.1.3, se observan los principales ríos existentes en el continente americano, en él, se señalan las cuencas de mayor superficie, las cuales son los ríos y arroyos del alto amazonas con 3, 400,000 Km<sup>2</sup> y los ríos y arroyos del escudo amazónico brasileño con 2, 500,000 Km<sup>2</sup>.

**Tabla 2.1.3. Principales ríos del continente americano**

Río	País (es)	Superficie de la cuenca (Km <sup>2</sup> )
Colorado	México, EUA	700,000
Misisipi bajo	EUA	640,000
Ríos y arroyos piemonteses del misisipi	EUA	525,000
Amazonas y bosques inundados	Brasil-Colombia-Perú	840,000
Ríos y arroyos de alto amazonas	Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Guyana, Suriname, Guyana Francesa, Venezuela	3,400,000
Ríos y arroyos del escudo amazónica Brasileño	Bolivia, Brasil, Paraguay	2,500,000
Orinoco y bosques inundables	Brasil, Colombia, Venezuela.	938,000
<b>Ríos y arroyos alto Paraná</b>	Argentina, Brasil, Paraguay.	900,000

**FUENTE:** (8)

En la tabla 2.1.4, se observan los principales lagos del continente americano, como se puede ver, los grandes lagos de Estados Unidos y Canadá se encuentran en primer lugar con una superficie de 245,660 Km<sup>2</sup>

**Tabla 2.1.4. Principales lagos de América**

Lago	Superficie (Km <sup>2</sup> )
Grandes lagos de EUA y Canadá	245,660
Gran lago el Oso, Canadá	31,153
Gran Lago del Esclavo, Canadá	28,570
Winnipeg, Canadá	24,390
Titicaca, Bolivia-Perú	8,300
Nicaragua	8,157
Chapala, México	1,080
Managua	1,035

**FUENTE:** (8)

La tabla 2.1.5 muestra la extracción anual de agua por sectores a nivel mundial y en el continente Americano, como podemos darnos cuenta, en México existe un alto porcentaje de extracción.

**Tabla 2.1.5 Distribución regional de la extracción del agua en Latinoamérica**

Subregión	Extracción anual de agua por sectores							Extracción total		
	Agrícola		Doméstico		Industrial		km <sup>3</sup>	% de AL y C	m <sup>3</sup> por hab.	en % de los RHIR
	km <sup>3</sup>	% del total	km <sup>3</sup>	% del total	km <sup>3</sup>	% del total				
México	60.3	78	13.4	17	3.9	5	77.8	30	825	19.0
América Central	9.4	77	1.8	15	0.9	8	12.2	5	428	1.7
Antillas Mayores	11.7	75	3.6	24	0.1	1	15.4	6	531	18.9
Antillas Menores	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Subregión Guayanesa	1.8	96	0.0	2	0.0	2	1.9	0	1 117	0.6
Subregión Andina	36.5	73	10.5	21	3.1	6	50.2	19	483	1.0
Brasil	33.4	61	11.6	21	9.9	18	54.9	21	335	1.0
Subregión Sur	39.4	91	5.7	6	4.7	3	50.0	19	852	3.8
América Latina y Caribe	192.7	73	47.0	19	22.9	9	262.8	100	519	2.0
Mundo	2 310.5	71	290.6	9	652.2	20	3253.3	-	564	8.0
AL y C como % del mundo	8.3		16.0		3.5		8.1			

FUENTE: (9)

## 2.2 Recursos Hídricos de la República Mexicana

Los recursos hídricos de México están constituidos por ríos, arroyos, lagos y lagunas, así como por almacenamientos subterráneos y grandes masas de agua oceánica.

Existe una gran cantidad de cuencas hidrológicas, sobre todo en las zonas donde las sierras están en contacto directo con el mar y en el Altiplano seco endorreico, pero el número de grandes cuencas que abarcan amplias zonas del país es reducido. En México existen cerca de 42 ríos principales que transcurren en tres vertientes: occidental o del Océano Pacífico, oriental o del Océano Atlántico (Golfo de México y Mar Caribe), y la interior cuyos ríos desembocan en lagunas interiores. En la vertiente del Pacífico destacan las cuencas de los ríos Yaqui, Fuerte, Mezquital, Lerma- Santiago y Balsas; en la costa del Golfo de México destacan las cuencas de los ríos Bravo, Pánuco, Papaloapan, Grijalva y Usumacinta. Destaca la del río Nazas entre las cuencas endorreicas. La mayor parte de la Península de Yucatán carece de drenaje superficial, pues se trata de una extensión de poco relieve y sustrato permeable, por lo que casi toda la circulación de agua es subterránea. Algunas llanuras costeras tienen fuertes deficiencias de drenaje por su escasa pendiente, como el caso de áreas de Baja California, Sonora, Tamaulipas, Nayarit, Tabasco y las partes bajas de las cuencas del Pánuco y del Papaloapan, en Veracruz. Algunas cuencas que recogen aguas de zonas húmedas lejanas son relativamente grandes, como las correspondientes a los ríos Nazas, Aguanaval y Casas Grandes. Otras son de tamaño reducido, como las que en conjunto forman el llamado Bolsón de Mapimí, en Coahuila, Durango y Chihuahua, o el Bolsón del Salado, que abarca los estados de Zacatecas, San Luís Potosí, Nuevo León, Coahuila y Tamaulipas.

Debido al régimen climático del país, en casi todos los ríos existe una diferencia notable entre el volumen de agua que llevan en la época de secas y el de lluvia. Esta variación está acentuada por las obras de retención de agua y su uso para irrigación, de tal manera que muchos de los ríos que originalmente eran permanentes, ahora se vuelven intermitentes, por lo menos en algunos tramos de su recorrido. En amplias zonas la deforestación y la erosión del suelo producen un aumento en el escurrimiento superficial.

El ciclo hidrológico ocurre en cuencas, las cuales son unidades mínimas de manejo del agua. Las cuencas del país se encuentran agrupadas en 37 regiones hidrológicas (fig 2.2.1) para la realización de estudios hidrológicos y de calidad del agua. Esta regionalización fue elaborada en los años 60 por la entonces Dirección de Hidrología de la Secretaría de Recursos Hidráulicos. <sup>(9)</sup>



**Fig. 2.2.1 Regiones hidrológicas De México.**

FUENTE: (9)

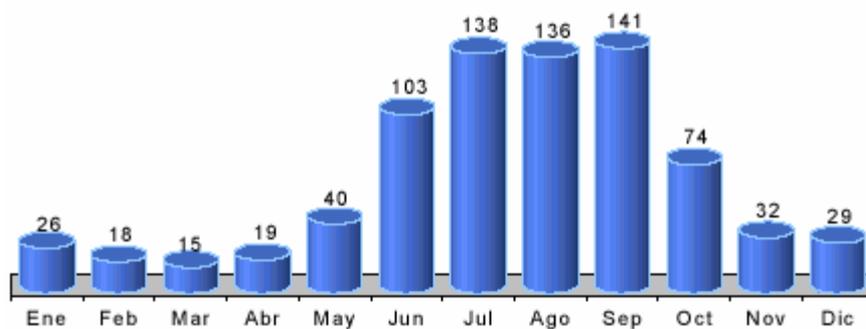
### **2.2.1 Situación Actual de los Recursos Hídricos en República Mexicana**

La situación hídrica de México es difícil, dado que:

- La distribución natural del recurso es muy irregular
- La mayoría de los cuerpos de agua superficiales están contaminadas
- El nivel de tratamiento de aguas residuales es muy bajo
- La eficiencia del uso del agua es baja, especialmente en el riego
- La infraestructura hidráulica no está en buen estado
- El aumento de población disminuye la disponibilidad del agua per cápita

- Algunas regiones tienen problemas recurrentes por exceso del agua en temporada de lluvias (inundaciones y deslaves en el suroeste del país)
- Otras regiones tienen problemas de escasez debido a sequías y/o la demanda excesiva (las del norte y centro, la del Valle de México).

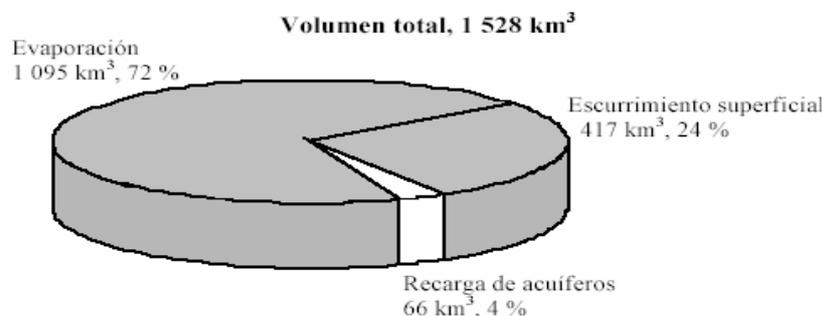
La precipitación pluvial en México es en promedio del orden de 772 mm anuales (equivalente a un volumen de agua de 1 528 km<sup>3</sup>). La característica principal de esta precipitación es su irregularidad, tanto en tiempo como en espacio. Las lluvias más importantes en el país ocurren en cuatro meses (jun-sep, gráfica. 2.2.1.1). Las variaciones históricas de la República Mexicana que presenta la precipitación pluvial (mm) mensual a lo largo de los años 1941-2002 pueden observarse en la figura. 2.2.1.1. <sup>(9)</sup>



**Figura. 2.2.1.1. Precipitación Media Mensual Histórica**

FUENTE: (9)

Como se muestra en la figura 2.2.1.2, de la precipitación pluvial media anual, el 72 % de su volumen se pierde por evaporación; un 24 % escurre por las corrientes superficiales en las 314 cuencas que existen en el territorio nacional, y una pequeñísima parte, el 4 %, se infiltra y recarga los mantos acuíferos, cuyo volumen de renovación anual se estima en alrededor de 66 km<sup>3</sup>, es decir, hay una disponibilidad neta de agua u oferta neta natural de 1528 km<sup>3</sup> anuales, en promedio, en todo el territorio. <sup>(8)</sup>



**Figura 2.2.1.2 Distribución de la precipitación pluvial media anual en México (el esguimiento superficial incluye 50 km<sup>3</sup> de los ríos Colorado y Suchiate).**

FUENTE: (8)

En la tabla 2.2.1.1 se muestra la precipitación media mensual histórica por entidad federativa de 1941 al 2002, donde se observa que Tabasco es el estado con mayor precipitación pluvial anual. El Distrito Federal reporta bajas lluvias durante el año en comparación con otros estados de la República.

**Tabla 2.2.2.1 Precipitación Media Mensual Histórica por Entidad Federativa**

Entidad Federativa	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	mm												
Aguas Calientes	450	12	6	3	8	17	71	100	102	77	33	11	10
Baja California	201	37	32	37	16	4	1	1	5	6	9	21	32
Baja California Sur	174	13	4	2	1	1	1	18	42	54	17	7	14
Campeche	1151	29	23	18	16	63	163	190	204	217	132	59	37
Coahuila	318	12	12	8	19	36	40	34	43	56	32	14	12
Colima	884	21	7	4	2	8	113	164	203	222	102	25	13
Chiapas	1970	77	59	46	57	134	268	270	269	344	232	112	102
Chihuahua	418	16	10	6	8	10	36	109	99	68	28	10	18
Distrito Federal	719	8	5	9	24	51	124	155	145	126	54	11	7
Durango	500	20	9	6	5	11	59	113	115	90	35	13	24
Guanajuato	597	12	7	8	15	36	106	127	124	99	41	14	10
Guerrero	1106	10	3	3	9	48	198	221	218	257	107	26	6
Hidalgo	610	20	18	22	40	65	122	116	111	157	82	56	21
Jalisco	821	14	8	7	7	25	144	203	182	142	61	16	12
Estado de México	887	13	6	9	24	61	155	182	175	166	72	20	9
Michoacán	806	13	4	4	10	33	138	185	171	157	65	17	9
Morelos	878	10	3	4	14	55	183	170	166	184	70	14	5
Nayarit	1061	18	9	5	4	8	137	280	274	218	75	16	17
Nuevo León	591	20	17	17	36	59	72	54	85	130	64	20	17
Oaxaca	1521	30	26	22	31	67	255	268	257	292	152	64	37
Puebla	1265	30	26	27	45	83	187	199	195	234	140	63	36
Querétaro	554	11	6	8	20	41	101	106	100	98	43	13	7
Quintana Roo	1258	65	40	32	33	99	177	120	140	209	165	96	82
San Luis Potosí	951	19	17	17	35	66	148	142	148	203	96	36	24
Sinaloa	776	28	13	12	8	10	57	186	193	156	58	23	32
Sonora	423	23	15	10	4	3	20	116	109	57	25	14	27
Tabasco	2424	179	123	60	75	123	246	277	252	383	349	272	191
Tamaulipas	766	19	15	19	35	66	123	101	108	154	78	28	20
Tlaxcala	707	8	6	12	34	73	130	124	128	112	55	17	8
Veracruz	1484	42	34	34	45	78	207	239	205	290	163	89	58
Yucatán	1096	34	34	30	31	79	162	166	165	186	113	51	45
Zacatecas	516	15	8	5	7	19	82	118	113	84	36	13	16
Total Nacional	771	26	18	15	19	40	103	138	136	141	4	32	29

Fuente: (9)

### 2.2.1.1 Balance Hidrológico para la Sub Región Valle de México y Tula

Como muestra la tabla 2.2.1.1.1, en la cuenca del Valle de México los acuíferos se encuentran en una condición de sobreexplotación, por lo tanto no existe posibilidad de incrementar las extracciones, por el contrario, se deben reducir las existentes a fin de obtener el equilibrio de los acuíferos de la subregión. En la cuenca del Río Tula existe una reducida disponibilidad de 40 mill m<sup>3</sup>/año, pero en caso de incrementar la explotación de estos acuíferos, ésta deberá de ser planeada y controlada para no provocar la misma situación de

sobreexplotación de la cuenca del Valle de México, además de que debido a la contaminación de estos acuíferos, para la utilización de esta fuente será necesario el control y tratamiento de las aguas residuales de la ZMCM, así como de la potabilización de las aguas de estos acuíferos. <sup>(10)</sup>

**Tabla 2.2.1.1.1 balance hidrológico para la subregión del valle de México y tula (Volúmenes en mill m<sup>3</sup>)**

Región	Valle de México	Tula
Lluvia	6,646	3,510
Evapotranspiración	5,377	1,947
Infiltración	689	336
Escurrecimiento Virgen	580	1,227
Extracción Subterránea	1,587	296
Balance	-895	40
Importación	610	-
Uso Superficial	198	2,306
Reuso	312	31
Escurrecimiento Aguas Abajo	1,636	966

Fuente: (10)

## 2.2.2. Situación Actual de los Recursos Hídricos en la Región XIII (Valle de México y Tula)

El Consejo de Cuenca del Valle de México (CCVM) tiene una superficie de 16 424 kilómetros cuadrados. Está integrado por 115 municipios que pertenecen a los estados de México (56), Hidalgo (39) y Tlaxcala (4), y por las 16 Delegaciones del Distrito Federal. En la Cuenca del Valle de México se localiza una parte importante de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) y la Zona Metropolitana de Pachuca. Este consejo de cuenca (CC) corresponde a la Región Hidrológica-Administrativa XIII Valle de México, que se ubica a una altitud promedio de 2,200 metros sobre el nivel del mar, ocupa menos de uno por ciento de la superficie del país, es la residencia de 20 por ciento de la población nacional (19 millones) y en ella se genera 31.3 por ciento del PIB del país. La disponibilidad natural base media en la cuenca es de 3805 hectómetros cúbicos (hm<sup>3</sup>), y la extracción total bruta de agua de 4 784 hm<sup>3</sup>, lo cual significa una fuerte presión sobre el recurso hídrico (126%).

Debido a su elevada concentración demográfica y económica, se estima que las fuentes de agua superficiales de esta cuenca están prácticamente agotadas, y también presenta una sobreexplotación del recurso, lo cual hace muy vulnerable el equilibrio ecológico de esta zona. La sobreexplotación de los acuíferos, sobre todo en la subregión Valle de México, excede en 140 por ciento la magnitud de la recarga, lo que provoca fuertes asentamientos en el terreno, hundimientos que producen grietas y daños en la infraestructura urbana.

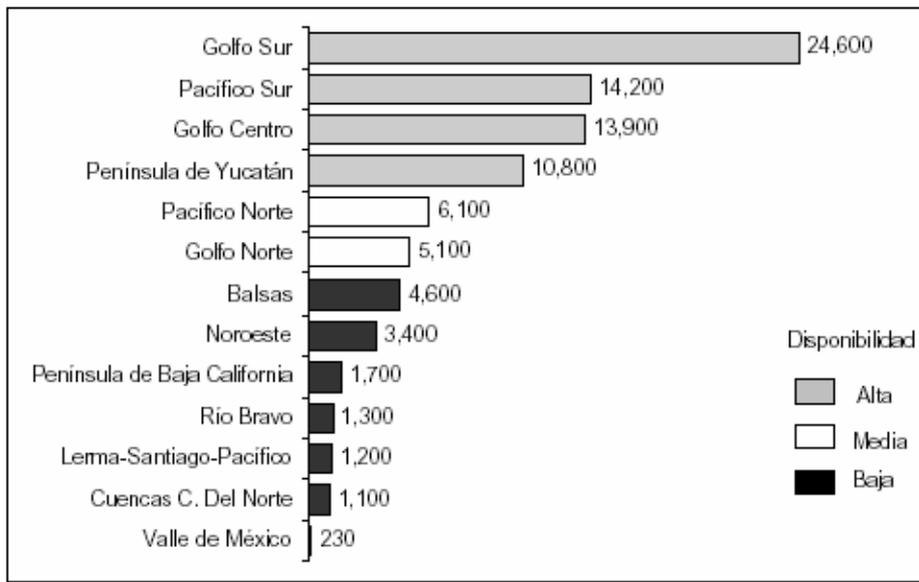
En la cuenca existen 106 almacenamientos de agua con una capacidad de 659 hectómetros cúbicos. Se identifican 13 sistemas acuíferos: 6 en la subregión del Valle de México y 7 en Tula. La región recibe una recarga de agua subterránea de 1 800 hectómetros cúbicos al año. Se estima una demanda total para usos regionales en poco más de 4 800 hectómetros cúbicos al año. Para cubrir la creciente demanda de agua se ha recurrido a importarla desde 1950, de las cuencas del Lerma y Cutzamala.

Se observa que 48 por ciento del agua en la cuenca se destina a la agricultura, 36 al uso público urbano y 16 al uso industrial. Existen casi 140 mil hectáreas de riego, correspondientes a cinco distritos de riego y 700 unidades de riego, donde 63 por ciento de sus requerimientos se satisfacen con agua residual sin tratamiento. En esta región 34 por ciento de la superficie agrícola es de temporal. En cuanto al uso industrial del agua, se estima que 80 por ciento de los usuarios se autoabastecen. La industria de la transformación concentra 80 por ciento de la demanda total de agua, especialmente en las ramas alimenticia, química, papelera, textil, embotelladora, cervecera, metal-mecánica y cementera.

La Región XIII Valle de México comprende la concentración urbano-industrial de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, una de las más grandes del mundo. Este hecho propicia graves problemas de contaminación de las fuentes de agua, tanto superficiales como subterráneos, principalmente en la cuenca del río Tula la cual recibe las aportaciones de aguas residuales provenientes de la cuenca del Valle de México concretamente del Distrito Federal y su Zona Metropolitana.<sup>(10)</sup>

### **2.2.3 Disponibilidad y Consumo de Agua en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México**

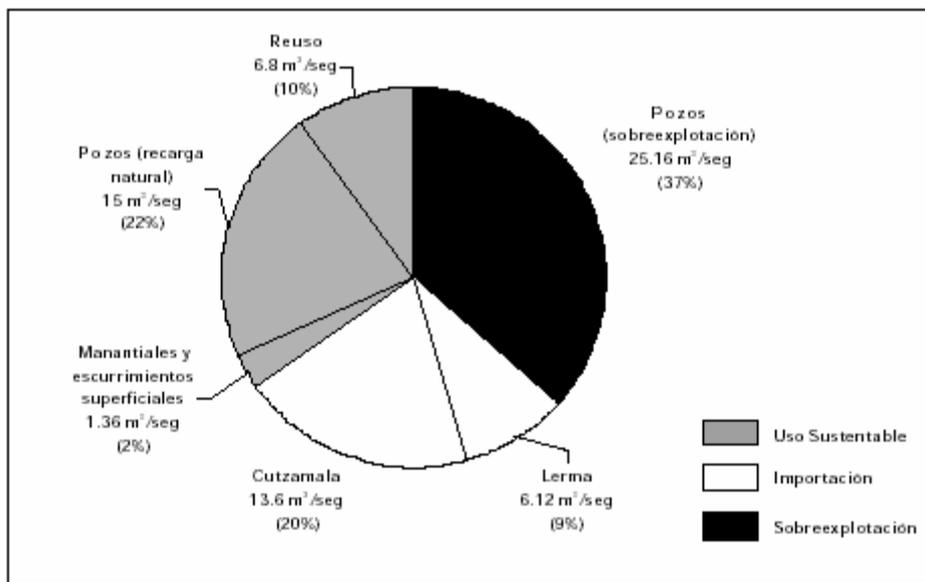
Los parámetros de disponibilidad hidrológica ilustran la situación real de escasez de agua, ya que establecen una relación entre la oferta natural (escurrimientos y recarga de acuíferos) y la población. La disponibilidad hidrológica de la región del Valle de México es notoriamente la más baja del país, (figura 2.2.3.1); no rebasa los 230 metros cúbicos anuales por habitante. Contrasta con las regiones del Golfo y del Pacífico sur, donde los valores sobrepasan la decena de miles de metros cúbicos. Cabe mencionar que según clasificaciones internacionales, las regiones que muestran datos por debajo de los 1,000 metros cúbicos anuales por habitante, tienen una disponibilidad muy baja o incluso crítica del recurso, tal es el caso de la ZMCM.<sup>(11)</sup>



**Figura. 2.2.3.1 Disponibilidad de Agua por Región Hidrológica (m³/hab/año)**

FUENTE: (11)

El suministro total a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México oscila alrededor de 68 metros cúbicos por segundo, tal como se muestra en la figura 2.2.3.2, de los cuales 35 metros cúbicos por segundo corresponden al Distrito Federal y 33 metros cúbicos por segundo al Estado de México <sup>(11)</sup>.



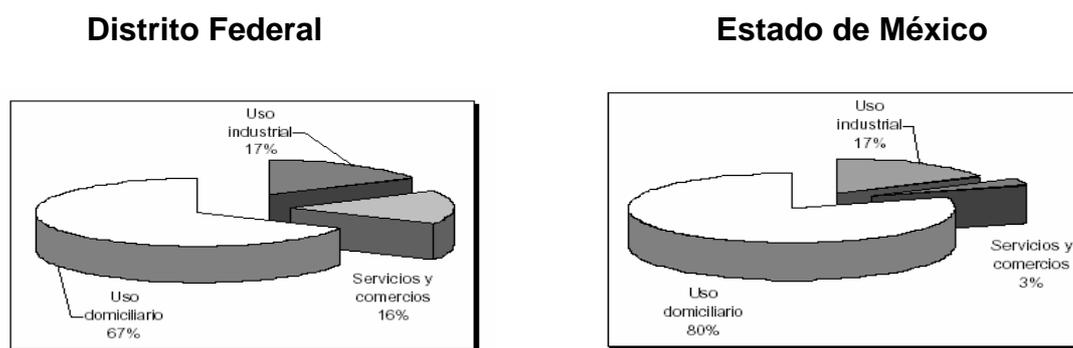
**Figura. 2.2.3.2 Suministro en el Valle de México (Total 68 m³/seg)**

FUENTE: (11)

Con referencia a condiciones de sustentabilidad, existe un déficit de dos terceras partes del volumen consumido, que se resuelve a través de la sobreexplotación de los acuíferos propios (37%) e importando agua de otras regiones (29%), tal como lo muestra la figura 2.2.3.2.

El uso sustentable del líquido representa menos del 35% del total. El sector doméstico es el mayor consumidor del líquido en la ZMCM, seguido por el industrial y en último lugar por el sector de servicios urbanos y comerciales. El consumo de los sectores varía entre el Distrito Federal y el Estado de México. En esta última entidad federativa se incrementa notablemente la proporción destinada al consumo del sector doméstico, debido en gran parte a la elevada tasa de crecimiento demográfico registrada en algunos de los municipios conurbados, como Chalco y Chimalhuacán donde alcanza el 9.2% y 9.8%, respectivamente. En promedio los municipios conurbados crecen al 3.31%, lo cual contrasta con la tasa de crecimiento del Distrito Federal, de 0.54%.<sup>(11)</sup>

En la figura 2.2.3.3, se puede observar que el consumo de agua, tanto en el Distrito Federal como en el Estado de México es en su mayoría domiciliario, seguido del industrial, y finalmente servicios y comercios.



**Figura. 2.2.3.3 Consumo de agua en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México por tipo de actividad**

FUENTE: (11)

En la Ciudad de México existe una gran sequía, 1 millón 500 mil habitantes de la Ciudad sólo recibe agua de manera restringida, mientras que el 2% de la población no recibe el líquido.<sup>(12)</sup>

### 2.3 Cuestiones Geográficas y Socioeconómicas Nacionales y Su Influencia en la Situación del Agua

México es una República Federal formada por 32 Entidades Federativas incluyendo al Distrito Federal (D.F.), mismos que están constituidos por 2,446 municipios (incluye las 16 delegaciones políticas del D. F.). Existen 199,391 localidades en el país, repartidas según su tamaño, como se muestra en la tabla 2.3.1.

**Tabla 2.3.1 Numero de localidades y Numero de habitantes en la República Mexicana**

No. De Localidades	No. De Habitantes
178	50 000 o más habitantes
2863	Entre 2 500 y 49 999 habitantes
47771	entre 100 y 2 499 habitantes
<b>148579</b>	menos de 100 habitantes

FUENTE: (9)

Las principales características geográficas y socioeconómicas del país se muestran en la tabla 2.3.2

**Tabla 2.3.2 Características Geográficas y Socioeconómicas del país**

<b>Producto Interno Bruto (PIB)</b>	6 153 Miles de millones de pesos
<b>PIB per cápita:</b>	59 374 Pesos
<b>Extensión territorial del país</b>	1 964 375 km <sup>2</sup> Extensión territorial continental 21 959 248 km <sup>2</sup> Extensión territorial insular
<b>Fronteras</b>	3 152 Km. con Estados Unidos de América, 956 Km. con Guatemala y 193 Km. con Belice
Litoral	11 122 Km.

FUENTE: (9)

### 2.3.1 Población y Tendencias de Crecimiento

De 1950 al año 2000, la población del país casi se cuadruplicó y pasó de ser predominantemente rural (57% rural) a predominantemente urbana (75% urbana). La tasa de crecimiento ha disminuido significativamente y se estima que en el año 2030 será de sólo el 0.4%.

Si en los años 50's se hubiera pensado sustentablemente, en la actualidad se justificarían los segundos y talvez los terceros niveles de vialidad, ya que seria vital para transitar en un posible "Venecia, americano". (Ver anexo 1, sobre la historia del desagüe del Distrito Federal).

No obstante, se puede observar que la tendencia poblacional de crecimiento va en aumento pero a un menor ritmo según la proyección de la tabla 2.3.1.1, por lo cual, el consumo de agua será cada día mayor y la disponibilidad de agua per cápita disminuirá. <sup>(9)</sup>

**Tabla 2.3.1.1 Proyecciones de población y tasas de crecimiento**

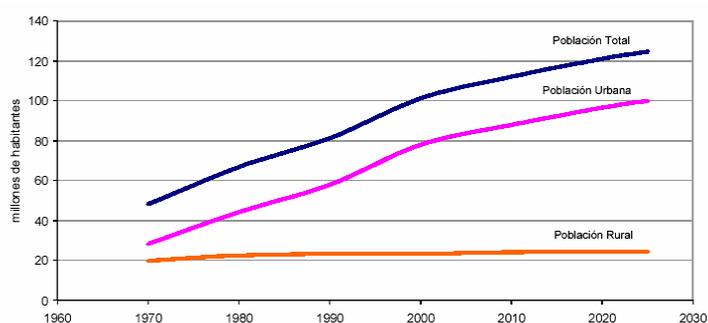
Año	Población			Tasa de crecimiento media anual (%)
	Total	Urbana	Rural	
	(millones de habitantes)			
2000	101.20	78.01	23.19	1.2
2001	102.43	79.10	23.33	1.2
2002	103.63	80.17	23.46	1.1
2003	104.78	81.21	23.57	1.1
2004	105.90	82.22	23.68	1.0
2005	106.99	83.21	23.78	1.0
2006	108.05	84.18	23.87	1.0
2007	109.09	85.14	23.95	0.9
2008	110.12	86.09	24.03	0.9
2009	111.12	87.03	24.09	0.9
2010	112.10	87.95	24.15	0.9
2020	121.04	96.53	24.51	0.6
2025	124.65	100.10	24.55	0.5
2030	127.46	103.02	24.44	0.4

FUENTE: (9)

Notas:

- La población para el año 2000 no coincide con los datos del INEGI, ya que CONAPO hace ajustes por subconteo.
- Las proyecciones de población fueron interpoladas por la CNA a diciembre de cada año.

Uno de los aspectos más importantes que moldearán el futuro de México es el incremento de la población. De acuerdo con estimaciones de CONAPO, entre 2003 y 2025 la población del país se incrementará en 19.9 millones de personas, el 95% de las cuales se asentará en localidades urbanas y prácticamente el 80% se asentará en la zona centro, norte y noroeste del país (figura 2.3.2.1) (regiones I, II, III, IV, VI, VII, VIII, IX y XIII).<sup>(9)</sup>



**Fig. 2.3.2.1 Población en México, del año 1970 al año 2025**

FUENTE: (13)

### 2.3.2 Cuestiones Geográficas y Socioeconómicas por Región Administrativa y Entidad Federativa

En la tabla 2.3.2.1. Se muestra la información sobre extensión territorial, población, Producto Interno Bruto y municipios, por región administrativa y por entidad federativa. Observando que la región XIII se tiene una extensión de 16.4 Km<sup>2</sup> con una gran población de 20.86 millones de habitantes, siendo la mas poblada y la de menor extensión territorial. <sup>(9)</sup>

**Tabla 2.3.2.1 Datos geográficos y socioeconómicos por región administrativa**

Región Administrativa	Extensión territorial continental <sup>a</sup> (miles de km <sup>2</sup> )	Población <sup>b</sup> (diciembre 2003) (millones)	Densidad de población 2003 (hab/km <sup>2</sup> )	PIB <sup>c</sup> (%)	Municipios <sup>d</sup> (número)
I Península de Baja California	145.5	3.31	23	4.1	10
II Noroeste	205.3	2.54	12	2.8	79
III Pacífico Norte	151.9	4.10	27	2.9	51
IV Balsas	119.2	10.65	89	6.7	422
V Pacífico Sur	77.1	4.17	54	2.1	358
VI Río Bravo	379.6	10.36	27	14.6	141
VII Cuencas Centrales del Norte	202.4	3.95	20	3.3	83
VIII Lerma-Santiago-Pacífico	190.4	20.22	106	16.0	327
IX Golfo Norte	127.2	4.99	39	3.7	154
X Golfo Centro	104.6	9.67	92	5.5	443
XI Frontera Sur	101.8	6.41	63	2.9	139
XII Península de Yucatán	137.8	3.55	26	4.2	124
XIII Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala	16.4	20.86	1 272	31.2	115
<b>Total Nacional</b>	<b>1 959.2</b>	<b>104.78</b>	<b>53</b>	<b>100.0</b>	<b>2 446</b>

FUENTE: (9)

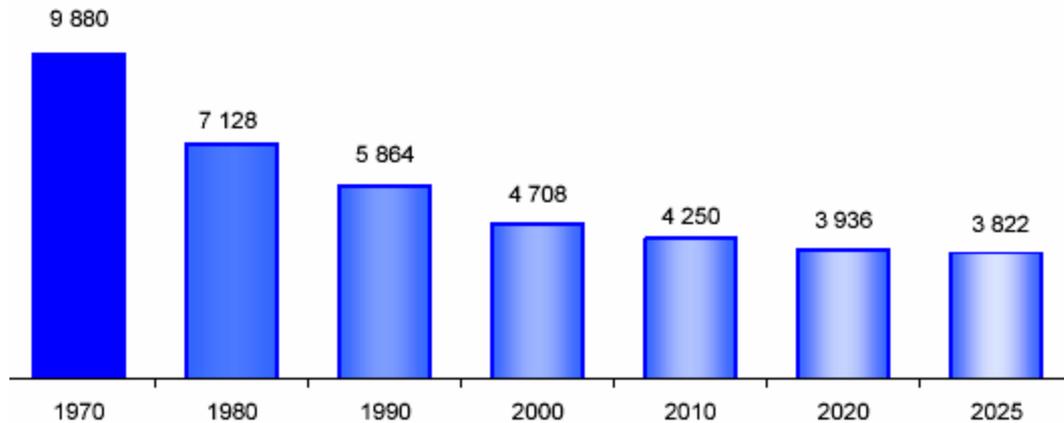
En la tabla 2.3.2.2 se puede ver la proyección poblacional de las diferentes Regiones Administrativas, destacándose que la población en la Región XIII seguirá siendo la más poblada para el año 2025, asegurando que habrá constante demanda del líquido vital.

**Tabla 2.3.2.2 Población en los años 2003 y 2025 Por Región Administrativa**

Región Administrativa	Población 2003	Población 2025	Incremento de población
	(miles de habitantes)		
I Península de Baja California	3 310	5 310	2 000
II Noroeste	2 538	3 297	759
III Pacífico Norte	4 100	4 502	402
IV Balsas	10 657	12 038	1 381
V Pacífico Sur	4 167	4 406	239
VI Río Bravo	10 360	14 088	3 728
VII Cuencas Centrales del Norte	3 954	4 260	306
VIII Lerma-Santiago-Pacífico	20 223	23 353	3 130
IX Golfo Norte	4 983	5 559	576
X Golfo Centro	9 670	10 407	737
XI Frontera Sur	6 404	7 997	1 593
XII Península de Yucatán	3 554	5 124	1 570
XIII Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala	20 863	24 312	3 449
<b>Total Nacional</b>	<b>104 783</b>	<b>124 653</b>	<b>19 870</b>

FUENTE: (9)

El incremento de población hará que la disponibilidad natural media de agua por habitante a nivel nacional disminuya de 4 547 m<sup>3</sup>/hab/año en el 2003, a 3 822 m<sup>3</sup>/hab/año en el 2025., como se muestra en la figura 2.3.2.4.



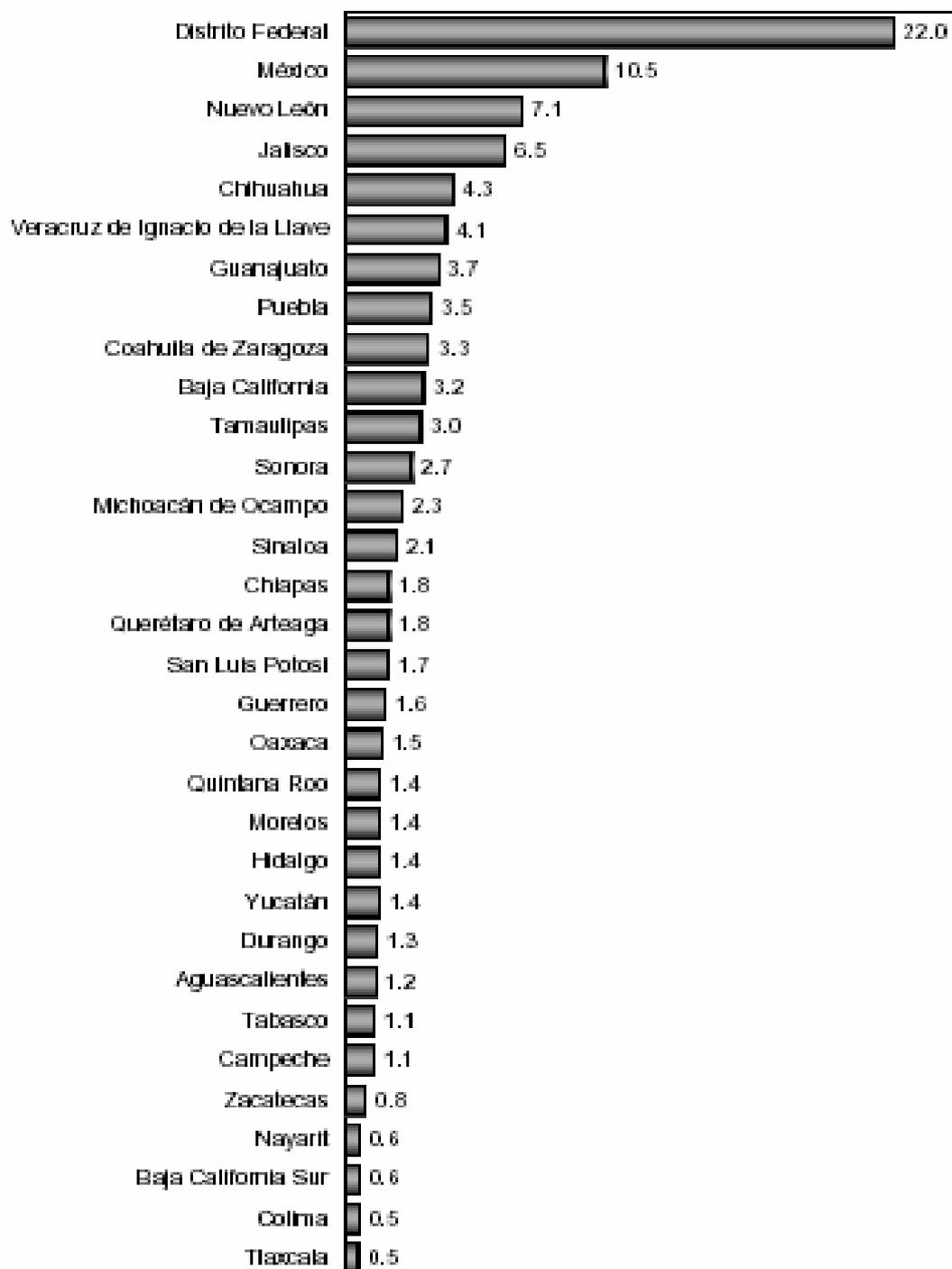
**Figura 2.3.2.4 Disponibilidad natural media de agua per cápita (1970 a 2025) (m<sup>3</sup>/hab)**

FUENTE: (9)

### 2.3.3 Producto Interno Bruto por Entidad Federativa

En la figura 2.3.3.1, podemos ver que el Distrito Federal contribuye con el más alto porcentaje al Producto Interno Bruto de la república Mexicana, seguido del Estado de México que contribuye con un 10,1% <sup>(13)</sup>

**DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL VALOR AGREGADO BRUTO  
EN VALORES BÁSICOS POR ENTIDAD FEDERATIVA  
2002<sup>p</sup>**



Valor agregado bruto en valores básicos (Mil millones de pesos a precios de 1993): 1 483 284

FUENTE: INEGI. *SCNM. Producto Interno Bruto por Entidad Federativa, 1997-2002*. Aguascalientes, Ags., México, 2004.

**Figura. 2.3.3.1 Producto Interno Bruto por entidad Federativa**

Como se muestra en la tabla 2.3.3.1, las industrias Química, Construcción, Alimentos, Papel y textil, son las que contribuyen en un mayor porcentaje al Producto Interno Bruto en el Distrito Federal. <sup>(13)</sup>

**Tabla 2.3.3.1 PIB por actividad Económica en el Distrito Federal.**

<b>Industria</b>	<b>PIB (%)</b>
Minería y extracción de petróleo	0,00278
Alimentos	15,23
Papel	9,65
Metalúrgica	1,58
Electricidad	2,28
Construcción	15,95
Textil	8,18
Química	25,86
Madera	1,19
Otros	20,1

FUENTE: (13)

En la tabla 2.3.3.2, podemos observar las industrias existentes en los principales estados del país, teniendo que el mayor número de industrias se encuentran concentradas en el Distrito Federal, en segundo lugar se encuentra el estado de Nuevo León con 5676 industrias. En el caso de estudio, que es el distrito federal, se obtiene un dato de la DGCOSTC reportando que la delegación azcapotzalco, concentra una zona industrial donde existen 58 concesiones de pozos particulares con extracción promedio de 1,008 L/seg de agua.

**Tabla 2.3.3.2 Cantidad de Industrias existentes por entidad Federativa**

<b>Estado</b>	<b>Minería y extracción de petróleo</b>	<b>Alimentos</b>	<b>Papel</b>	<b>Metalúrgica</b>	<b>Química</b>	<b>Electricidad</b>	<b>Construcción</b>	<b>Textil</b>	<b>Total</b>
Nuevo León	84	2394	1267	43	827	1	823	1064	5676
San Luís Potosí	60	2425	372	20	156	1	277	494	3649
Sonora	81	2285	444	7	16	1	373	409	3600
Distrito Federal	11	9472	4797	30	2031	2	1584	3605	21532
Tamaulipas	32	2515	624	0	140	1	437	562	4171
Sinaloa	55	2146	341	0	103	1	290	311	3144

FUENTE: (13)

### 2.3.4 Agua y Salud

El componente más importante del subsector salud y laboral, es la salud que concentra aproximadamente el 99% del gasto del Subsector. Este componente está dividido a su vez en el gasto del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), el Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado (ISSSTE) y la Secretaría de Salud (SSA), principalmente.

En el 2003 el gasto total por regiones se distribuyó de la siguiente manera: región Centro 29%; Norte 25%; Pacífico 21%; Sureste y Golfo, 18% y Distrito Federal, 6%<sup>(9)</sup>. En los gastos que realiza el sector salud, se encuentran consideradas todas aquellas enfermedades que como el cólera son causadas por el consumo de agua contaminada

De acuerdo a datos y cifras de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), las enfermedades diarreicas se encuentran vinculadas con el comercio ambulante por representar un precario saneamiento básico, como falta de agua potable, preparación de alimentos al aire libre, acumulación de basura y desechos orgánicos, proliferación de fauna nociva, entre otros.

Ésta Comisión hizo un estudio de las enfermedades transmitidas por alimentos y agua se describen en la tabla 2.3.4.1

**Tabla 2.3.4.1 Asignación de enfermedades producidas por alimentos y agua**

<b>ENFERMEDAD</b>	<b>AGUA</b>	<b>ALIMENTOS</b>
Cólera	90%	10%
Fiebre Tifoidea	20%	80%
Paratifoidea y otras salmonelosis	5%	95%
Shigelosis	80%	20%
Intoxicación alimentaria bacteriana.	0.0%	100%
Amebiasis intestinal	80%	20%
Otras infecciones intestinales	70%	30%
Infecciones intestinales protozoarios	10%	90%
Giardiasis	90%	10%

**FUENTE:** (14)

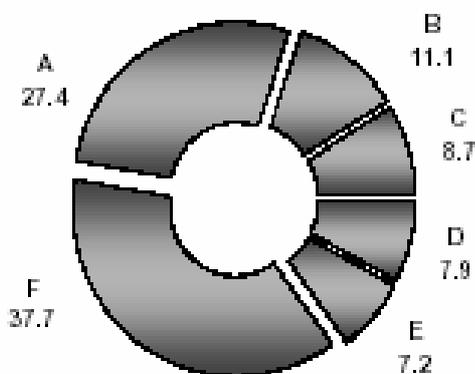
Los egresos por salud a nivel nacional tanto en el sector público como en el privado se muestran en la tabla 2.3.4.2 y en la figura 2.3.4.1, en donde se observa la cantidad gastada por principales causas de morbilidad. Teniendo que, las enfermedades causadas por la ingesta de agua y alimentos contaminados oscila entre los 74,536 pesos en instituciones públicas y 313,366 pesos anuales en el sector privado a nivel nacional.

Como se mencionó anteriormente, en el 2003 el gasto total en salud en el Distrito Federal fue el 6% del nacional, así que el gasto total en el D.F tanto en el sector público como en el privado por principales causas de morbilidad es de 352,675 pesos anuales.<sup>(14)</sup>

**Tabla 2.3.4.2 Egresos Hospitalarios en Instituciones del Sistema Nacional de Salud por principales causas de morbilidad**

CAUSA DE MORBILIDAD	EGRESOS
Total	4 228 621
Parto único espontáneo	526 123
Aborto	130 305
Diabetes mellitus	120 577
Colelitiasis y colecistitis	117 593
Nefritis y nefrosis	116 695
Apendicitis	83 404
Infecciones respiratorias agudas bajas (influenza y neumonía)	75 027
Enfermedades infecciosas intestinales	74 536
Asfixia y trauma al nacimiento	65 977
Hemorragia obstétrica	53 417
Edema proteinuria y trastornos hipertensivos en el embarazo	52 658
Parto obstruido	52 643
Enfermedades isquémicas del corazón	49 100
Hernia inguinal y femoral	47 893
Enfermedades de la piel	44 460
Fracturas del hombro, del brazo y del antebrazo	44 339
Bronquitis, bronquiolitis y otras infecciones respiratorias agudas bajas	41 079
Enfermedad cerebrovascular	37 413
Fractura de pierna, inclusive del tobillo	36 483
Enfermedades endocrinas, metabólicas, hematológicas e inmunológicas (excepto diabetes mellitus)	35 846
Causas mal definidas	61 080
Las demás causas	2 361 973

FUENTE: (13)



Egresos hospitalarios:  
\$1,649,296 pesos anuales

**Donde:**

- A. Embarazo, parto y puerperio.
- B. Enfermedades del sistema digestivo.
- C. Enfermedades del sistema respiratorio.
- D. Enfermedades infecciosas y parasitarias.
- E. Traumatismos, envenenamientos y algunas otras consecuencias de

F. Las demás causas.

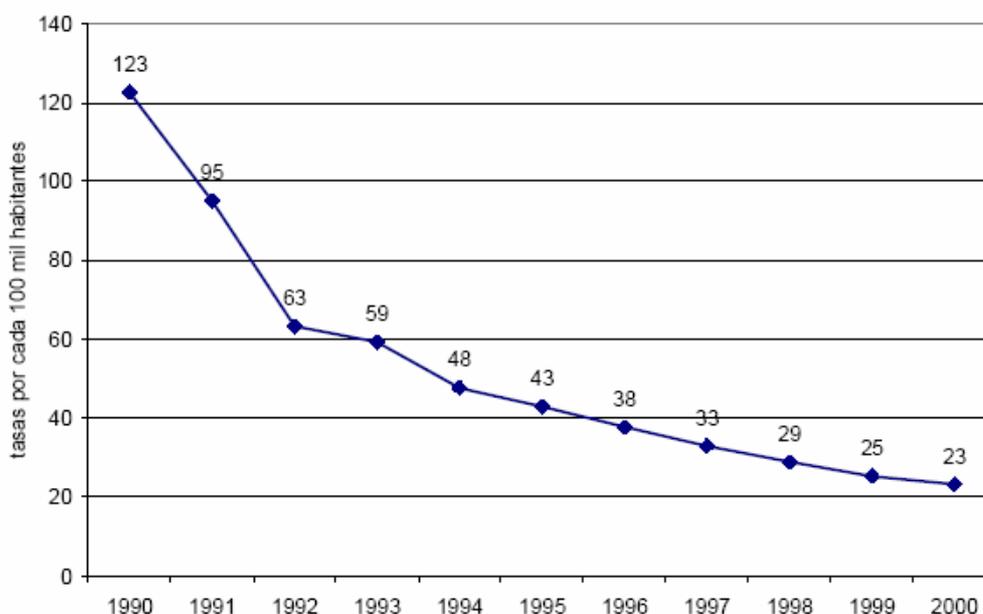
causas externas.

**Figura 2.3.4.1 Distribución Porcentual de los egresos hospitalarios en establecimiento Médicos particulares por principales causas de morbilidad.**

FUENTE: (13)

Gracias a los esfuerzos por desinfectar el agua se ha experimentado una reducción muy importante de la mortalidad infantil por enfermedades diarreicas, así como la eliminación de casos de cólera, pero teniendo en cuenta que el estado de Chiapas sigue en niveles altos de mortalidad y ubicando al Distrito federal en un intermedio entre Chiapas y Nuevo León el cual registra un número menor de muertes por esta enfermedad. <sup>(14)</sup>

Como se muestra en la figura 2.3.4.2, la mortalidad por enfermedades diarreicas en menores de 5 años a nivel nacional para el periodo (1990-2000), tendiendo a decrecer gracias a los programas de desinfección del agua que se han implementado en México <sup>(9)</sup>



**Figura 2.3.4.2 Mortalidad por enfermedades diarreicas en menores de 5 años a nivel nacional para el periodo (1990-2000)**

FUENTE: (9)

## 2.4 Agua Residual Urbana Generada, Volumen Tratado, Usos y Características

Es de gran importancia conocer las características del agua residual, ya que mediante estas se determina el contenido de contaminantes que es una de las bases para definir las necesidades de tratamiento, el primer paso consiste en realizar un análisis de una muestra de agua representativa.

Las aguas residuales de tipo municipal están constituidas por aproximadamente 99% de agua y 0.1% de residuos sólidos y de estos, de 40 a 70% son de origen orgánico y son los responsables de las características desagradables del agua residual, tales como color, olor, apariencia, además de que constituyen la fuente de alimentos de los microorganismos patógenos existentes en el agua.

### **2.4.1 Características Biológicas y Microorganismos Patógenos**

Los microorganismos se pueden introducir al subsuelo a través de fosas sépticas, irrigación de aguas negras, disposición de lodos de desecho, etc. Los patógenos, bacterias, virus, protozoarios y lombrices parasitas constituyen uno de los problemas mas serios de salud en el país, ya que los padecimientos gastrointestinales ocupan el primer lugar de las enfermedades endémicas y la principal fuente de estos microorganismos son las aguas residuales. <sup>(15)</sup>

Casi todos los desechos orgánicos contienen grandes cantidades de microorganismos, el agua residual contiene  $10^6$  coliformes/ml. Después del tratamiento convencional el agua residual todavía contiene una gran cantidad de microorganismos, al igual que muchas aguas superficiales naturales. <sup>(15)</sup>

### **2.4.2 Características Químicas del Agua Residual**

#### **2.4.2.1 Demanda Bioquímica de Oxígeno**

La demanda bioquímica de oxígeno es uno de los parámetros mas significativos para definir la calidad del agua, debido a que proporciona una medida exacta del oxígeno utilizado por una población microbiana, heterogénea durante la oxidación de la materia orgánica.

La prueba se basa en que toda la materia orgánica contenida en las aguas residuales deberá oxidarse hasta  $\text{CO}_2$ , agua y amoniaco usando Oxígeno molecular como electrón receptor, convirtiéndose en una medida directa del oxígeno y en una medida indirecta de la materia orgánica biodegradable.

Las reacciones oxidativas efectuadas en la prueba de DBO son el resultado de una actividad biológica, la velocidad de estas reacciones esta regida por la población de microorganismos y la temperatura. Teóricamente, esta reacción requiere un tiempo infinito para una oxidación biológica completa de la materia orgánica, pero para fines prácticos, la reacción se puede considerar completa a los 20 días, sin embargo, aun es un periodo muy grande para esperar resultados, por lo que se ha encontrado que un porcentaje razonable de la DBO total se logra en 5 días (Aproximadamente 10 a 80 en las aguas residuales domesticas y muchas industriales), por lo que este periodo de incubación se ha aceptado como un patrón. La tabla 2.4.2.1.1 muestra los criterios de calidad de agua basada en la DBO. <sup>(10)</sup>

**Tabla 2.4.2.1.1 Escala de clasificación de la calidad del agua conforme a la Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO.**

DBO <sub>5</sub>	Criterio	Descripción
Menor o igual a 6mg/l	No contaminada	Típico de aguas naturales Con bajas concentraciones de materia orgánica o presencia de agua municipal tratada con procesos biológicos.
Mayor de 6 y menor o igual a 30 mg/l	Buena Calidad	Presencia de agua municipal sedimentable o de industria poco contaminante.
Mayor de 30 y menor o igual a 120 mg/l	Con indicios de contaminación	Presencia de agua residual municipal cruda o de industria contaminante.
<b>Mayor de 120 mg/l</b>	Contaminada	

**FUENTE:** (10)

### 2.4.2.2 Demanda Química de Oxígeno

La demanda química de oxígeno determina la cantidad de oxígeno consumido por una muestra de agua residual de dicromato de potasio de 2 o 3 h de reflujó con ácido sulfúrico concentrado a una temperatura de aproximadamente 145 grados centígrados, casi todas las sustancias orgánicas se oxidan en su totalidad, con excepción de compuestos con piridina, el benceno o el tolueno. La diferencia de DBQ entre dos puntos de un reactor bioquímica puede tomarse como una medida directa de la energía requerida para oxidación del substrato en términos del oxígeno.

En esta prueba existen limitaciones como la de oxidar la materia orgánica del desecho sin importar su degradabilidad biológica. Una segunda limitante es que no se proporciona la velocidad de estabilización de desecho, tal como ocurriría en la naturaleza por medio de la oxidación de microorganismos.

En aguas naturales, la DBO disminuye mas rápido que la DQO lo que significa que en la naturaleza la oxidación enzimático reduce rápidamente los compuestos biológicamente existentes (Esto sucede en plantas de tratamiento biológico) En la naturaleza, la relación DQO/DBO tiende a aumentar con el tiempo, el tratamiento de desecho y/o condiciones que favorezcan la estabilización. <sup>(15)</sup> La tabla 2.4.2.2.1 muestra los criterios de calidad basándose en la DQO.

**Tabla 2.4.2.2.1 Escala de clasificación de la calidad del agua, conforme a la Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

DQO	CRITERIO	DESCRIPCION
Menor o igual a 20 mg/l	No contaminada	Típico de aguas naturales
Mayor de 20 y menor o igual a 100 mg/l	Buena calidad	Aguas con materia orgánica
Mayor de 100 y menor o igual a 250 mg/l	Con indicio de contaminación	Presencia de agua residual urbana
Mayor de 250 y menor o igual a 500 mg/l	Contaminada	Presencia de agua residual con concentración débil de materia orgánica
Mayor a 500 y menor o igual a 1000 mg/l	Muy contaminada	Presencia residual con concentración media de materia orgánica.
Mayor de 1000 mg/l	Fuertemente contaminada	Presencia de agua residual con concentración alta de materia orgánica.

**FUENTE:** (10)

### 2.4.3 Sabor y Olor

Hay muchas fuentes naturales de sabor y olor que causan los compuestos en adición de químicos sintéticos. El componente natural mejor conocido y oloroso es el H<sub>2</sub>S, que es rápidamente soluble en agua. Aunque este compuesto es toxico, su olor no es notable a muy bajas concentraciones.

Las fuentes de olor y sabor son muchas. Los fenoles son encontrados naturalmente en los fósiles, pero también son producidos en algunas industrias. Los fenoles son detectables a bajas concentraciones y son medianamente tóxicos. <sup>(15)</sup>

### 2.4.4 Generación de Agua Residual Urbana en el Valle de México

Como puede observarse en la Tabla 2.4.4.1, la producción media de aguas residuales asciende a 1665.22 millones m<sup>3</sup>/año, de los cuales 1 300.94 millones m<sup>3</sup>/año son captados por las redes existentes, y 364.28 millones m<sup>3</sup>/año son descargados directamente a corrientes naturales cercanas a sus localidades o en calles de las mismas. La capacidad instalada de tratamiento de aguas urbanas es de 7.030 m<sup>3</sup>/s en la subregión Valle de México y de 0.010 m<sup>3</sup>/s en Tula, y solamente se procesan 3.650 m<sup>3</sup>/s y 1.9 m<sup>3</sup>/s respectivamente. <sup>(9)</sup>

**Tabla. 2.4.4.1 Agua residual generada en la región XIII**

	Tula(Millones m <sup>3</sup> /año)	Valle de México (Millones m <sup>3</sup> /año)
Urbana	261.9	1,083.1
Industrial	39.9	73.8
Agrícola	107.6	98.9
Total	409	1,255.8

FUENTE: (10)

En la tabla 2.4.4.2. Se puede observar la Generación de deshechos en la región del Valle de México, Observando desde la cantidad de agua residual hasta la cantidad que es tratada. Particularmente en el caso del Distrito Federal, las plantas de Tratamiento de aguas residuales domesticas no son 100% eficientes a razón de que el precio que se paga por el agua tratada no es proporcional al costo de tratamiento.

**Tabla 2.4.4.2. Generación de Deshechos en el valle de México**

Concepto	Cantidad
Aguas residuales	44.8 m <sup>3</sup> /S (1,412.81 hm <sup>3</sup> /año)
Se recolecta en alcantarillado	40.3 m <sup>3</sup> /S (1,270.90 hm <sup>3</sup> /año)
Se generan	381,264 toneladas de DBO al año
Se recolecta en alcantarillado	343,143 toneladas de DBO al año
<b>Se remueven en los sistemas de tratamiento</b>	48,100 toneladas de DBO al año

FUENTE: (10)

## 2.4.5 Uso de las Aguas Municipales Tratadas

Actualmente existe en el Distrito Federal una capacidad instalada para el tratamiento de aguas residuales de 5.3m<sup>3</sup>/s. La capacidad de reuso del agua residual tratada en el nivel secundario para fines industriales es del orden de 3 m<sup>3</sup>/s, es decir, de 8% del caudal abastecido en la capital.<sup>(17)</sup>

En la tabla 2.4.5.1, se muestran los principales usos del agua residual tratada y los problemas potenciales que representa su utilización.<sup>(17)</sup>

**Tabla 2.4.5.1 Categorías de Reuso de Agua Residual y problemas potenciales**

<b>Reuso de agua residual</b>	<b>Problemas potenciales</b>
Riego en agricultura Hortalizas Cosechas comerciales (lechuga, col, rabanos, acelgas, etc)  Riego de áreas verdes Parques Patios escolares Camellones Campos de Golf Cementerios Acotamientos Residencias	Contaminación superficial y de aguas subterráneas. Comercialización y aceptación pública. Salud pública en cuanto a patógenos. El uso de área de control y seguridad incrementa el costo
Reciclamiento y reuso industrial Enfriamiento Alimentación de calderas Proceso Contra Incendio Construcción pesada	Incrustaciones, corrosión, ensuciamiento, crecimientos biológicos.
Recarga de aguas subterráneas Reimplementación Control de instrucción Control subsecuente	Salud pública por transmisión en vapor. Químicos orgánicos y efectos tóxicos. Sólidos totales patógenos y nitratos.
Uso recreacional / ambiental Lagos y estanques Decorativo Aumento de caudales Pesca deportiva Hielo artificial	Salud pública por virus y bacterias. Toxicidad en vida acuática. Eutrofización por N <sub>2</sub> y P.
Usos urbanos no potables Protección contra incendios Aire acondicionado Descarga de inodoros	Salud pública. Incrustaciones, corrosión, ensuciamiento. Infiltraciones.
Uso potable Mezcla con agua de abasto Abasto por pipas	Efectos tóxicos de químicos orgánicos. Aceptación pública y apariencia. Salud pública.

**FUENTE:** (17)

### **1.0.0.0 Uso de Agua Residual Tratada por Entidad Federativa**

Tal como se muestra en la tabla 2.4.5.1.1, En El estado de Nuevo León, El Estado de México y El Distrito Federal, es en donde se utiliza más el agua residual tratada, sin embargo, como se puede observar, en el Distrito Federal, todavía no se ha implementado el uso del agua residual tratada en la industria como ocurre en Nuevo León y el Estado de México <sup>(18)</sup>

**Tabla 2.4.5.1.1. Reuso del Agua residual tratada por entidad federativa (L/s)**

Estado	Riego Agrícola	Uso Indust.	Áreas verdes	Agrícola A. Verd	Indust. A. Verd	Energía eléctrica	Río/R Forraje	Total	%
Aguascalientes	3.8							3.8	0.03
Baja California Norte	31.2		5					36.2	0.33
Baja California Sur	410.5		245					655.5	6.03
Chihuahua	60		50					110	1.01
Coahuila	42	500	50					592	5.45
Distrito Federal	250		356	2100	488			3194	29.39
Durango	15.6		25					40.6	0.37
Guanajuato	0					45		45	0.41
Hidalgo	19							19	0.17
Jalisco	1							28	0.26
Edo. de México	1330	870	27					2200	20.24
Michoacán	310							310	2.85
Nayarit	26							26	0.24
Nuevo León	219.6	1440	149.5					1809.1	16.65
Oaxaca	0		140					140	1.29
Puebla	209.9							209.9	1.93
Querétaro	528							528	4.86
Quintana Roo	0		320					320	2.94
San Luís Potosí	0		170					170	1.56
Sinaloa	40		60					100	0.92
Sonora	46		17				233.9	296.9	2.73
Tamaulipas	11							11	0.10
Veracruz	9							9	0.08
Zacatecas	0		13.6					13.6	0.13
<b>Suma</b>	<b>3562.6</b>	<b>2810</b>	<b>1628.1</b>	<b>2100</b>	<b>488</b>	<b>45</b>	<b>233.9</b>	<b>10867.6</b>	<b>100</b>
% Actividad	32.78	25.86	14.98	19.32	4.49	0.41	2.15		

FUENTE: (18)

### 2.4.5.2 Número de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales por Entidad Federativa

En la tabla 2.4.5.2.1 se indica el número de plantas de tratamiento de aguas municipales, así como la capacidad instalada y caudal tratado en los principales estados de la República y Ciudad de México Comparando los de mayor problemática de recursos de agua. <sup>(18)</sup>

**Tabla 2.4.5.2.1 Cantidad de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales Por Entidad Federativa**

Estado	Número De plantas en operación	Capacidad instalada (m <sup>3</sup> /seg)	Caudal tratado (m <sup>3</sup> /seg)
Nuevo León	55	12.25	8.64
San Luís Potosí	5	0.80	0.55
Sonora	61	3.32	2.36
Distrito Federal	28	7.03	3.65
Tamaulipas	15	2.58	2.37
<b>Sinaloa</b>	<b>47</b>	<b>3.00</b>	<b>2.38</b>

FUENTE: (13)

En el anexo 2 se mencionan las plantas de tratamiento de agua en la República Mexicana y en la ciudad de México con su capacidad instalada, el tipo de tratamiento utilizado y los principales usos.

### 2.4. 5.3 Caudal de Agua Residual Municipal Generada por Entidad Federativa para el Caso de Estudio

En la tabla 2.4.5.3.1, se puede observar que en el Distrito Federal se genera la mayor cantidad de agua residual municipal entre los estados seleccionados para el estudio, además nos damos cuenta de que el caudal de agua residual generada el D.F. supera por mucho a la que se genera en los otros estados.<sup>(18)</sup>

**Tabla 2.4.5.3.1 Caudal de Agua Residual Municipal Generada por Entidad Federativa**

Estado	Número De Municipios	Q de agua residual (m <sup>3</sup> /seg)
Nuevo León	51	0.0045
San Luis Potosí	58	0.0406
Sonora	72	0.00326
Distrito Federal	16	2.3
Tamaulipas	43	0.064
<b>Sinaloa</b>	18	0.0139

FUENTE: (13)

### 2.4.6 Áreas Regadas con Aguas Residuales en México

El estado que tiene mayor cantidad de hectáreas regadas con aguas residuales es Hidalgo, provenientes principalmente de la ciudad de México, con 90,000 hectáreas. Nuevamente encontramos una situación preocupante, y es que después de Hidalgo (26.2% del total nacional), es el estado de Michoacán el que sigue en orden de importancia con 52,205 hectáreas (15.2%), es decir este estado ocupa el segundo lugar a nivel nacional en utilizar aguas contaminadas para riego. Otros estados también representativos son Morelos con 42,797 (12.43%), Veracruz con 40,768 (11.8%) y Sonora con 25,523 hectáreas (7.4%). Estos 5 estados contabilizan el 73.3% del total de áreas regadas con aguas residuales<sup>(9)</sup>

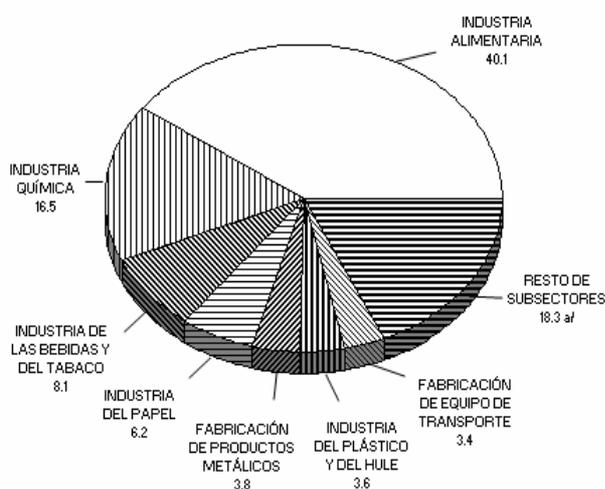
## 2.5 Consumo de Agua en la Industria

En el Distrito Federal se consumen 35 m<sup>3</sup>/s de agua de los cuales el 17% se destina al uso industrial. La ciudad cuenta con 21,532 industrias, en las cuales, sobresale la industria Química con 2,031 fábricas. La concentración mayor de la industria en general se ubica en la zona norte, por lo cual, el presente

estudio está dedicado a esta zona. En la Delegación Azcapotzalco la industria utiliza un 37.4% de área de la delegación y cuenta con un total de 1148 industrias, de las que el 16.5% son industrias químicas (Figura 2.5.1)

El agua en la industria es el servicio auxiliar de tipo primario que se emplea en mayor proporción dentro de la industria de procesamiento con la finalidad de obtener productos o subproductos químicos, petroquímicos o de refinación.

Dado el uso tan diverso del agua, es necesario conocer la cantidad de agua disponible (se puede observar en la tabla 2.5.1. el volumen concesionado en el Distrito Federal para el 2003), lo cual nos permitirá ver su posible reutilización y por lo tanto ahorro económico.



**Figura 2.5.1 Porcentaje de Participación por Tipo de Industria en la Delegación Azcapotzalco**

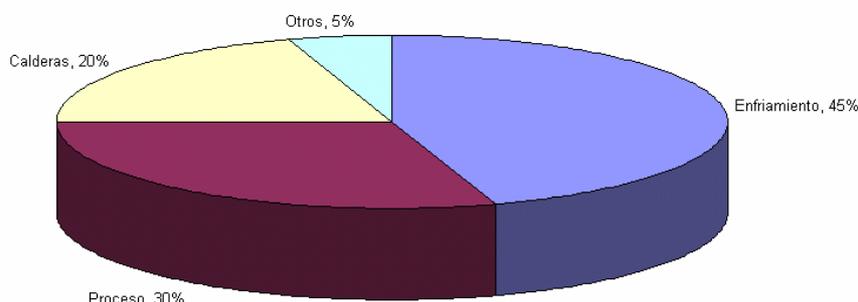
FUENTE: (19)

**Tabla 2.5.1 Volumen Agua que se utiliza en el Distrito Federal**

Uso (m <sup>3</sup> /año)	Superficial	Subterránea
Agrícola	37	0
Agroindustrial	0	0
Domestica	0	2
Acuacultura	19	0
Servicios	95	431
Industrial	0	3,056
Pecuario	0	0
Publico Urbano	30,905	78,052
Múltiples	0	29
Energía eléctrica	0	0
Total	31,056	81,569

FUENTE: (10)

En la Figura 2.5.2, se muestra el porcentaje de agua que se utiliza en la industria para diferentes fines, en donde podemos observar que el más alto porcentaje del líquido es utilizado para enfriamiento.



**Fig 2.5.2 Porcentaje de agua en la industria por tipo de uso.**

**FUENTE:** Creación propia basada en (15)

Los usos de mayor interés son, en términos del tipo de proceso industrial: el enfriamiento, transporte, lavado de materiales y calderas, en ese orden. Entre las industrias que emplean los procesos anteriores, destacan la generación de energía eléctrica, metalúrgica, explotación minera, petroquímica, química y curtidorías, como puede observarse en la tabla 2.5.2. <sup>(20)</sup>

**Tabla 2.5.2. Consumo de agua en industria de México**

Proceso	Consumo	Dimensión
<b>Fabrica de conservas:</b>		
Judías verdes	75700	L/Ton
Melocotones y peras	2000	L/Ton
Otros frutos y vegetales	7570 – 37850	L/Ton
<b>Industria Química:</b>		
Amoniaco	142000	L/Ton
Anhidro carbónico	92750	L/Ton
Gasolina	7000 – 34000	L/1000 L
Lactosa	89000	L/Ton
Sulfuro	11400	L/Ton
<b>Industrias alimenticias y de la bebida:</b>		
Cerveza	15000	L/1000 L
Pan	2270	L/Ton
Productos Lácteos	15000 – 19000	L/Ton
Whisky	80000	L/1000 L
<b>Pulpa y papel:</b>		
Pulpa	310000 – 870000	L/Ton de algodón
Papel	178000	L/Ton de algodón
<b>Textiles:</b>		
Blanqueos	275000 – 365000	
Tintura	36000 - 72000	

**FUENTE:** (21)

## 2.5.1 Tipos de Impurezas en el Agua Utilizada por la Industria

En la tabla 2.5.1.1 se muestran los principales tipos de problemas que se presentan por el uso de agua con diferentes impurezas en la industria, donde se puede observar que los problemas principales es la corrosión y la incrustación del material de los equipos utilizados.

**Tabla 2.5.1.1 Tipos de Impurezas en el Agua Usada en la Industria**

TIPOS DE IMPUREZAS	CARACTERÍSTICAS	PROBLEMAS GENERADOS
Alcalinidad (De sodio, de calcio y de magnesio )	$\text{CO}_3^{=}$ , $\text{HCO}_3$ , $\text{OH}^-$ , Sólidos Disueltos	Espumas en las Calderas, Mal Sabor (>400ppm), Formación de $\text{CO}_2$ , Acarreo de Sólidos, Corrosividad
Algas, materia orgánica (color)	Color, sólidos en suspensión y disueltos	Mal aspecto y sabor Mancha el papel y telas
Aluminio	Al, Sólidos Disueltos	Forma parte de dureza Incrustaciones de Sílice
Anhídrido Carbónico	$\text{CO}_2$ , Gases Disueltos	Corrosión
Aceites y Grasas	Coloides	Corrosión, Forma Espumas, Películas aislantes
Acidez o bajo pH	Minas	Corrosión, No potable
Acido sulfhídrico	$\text{H}_2\text{S}$ , Gases Disueltos	Corrosión, Mal Sabor y Olor
Cloruro	Cl, Sólidos Disueltos	Sabor Salado, Corrosión
Dureza	Sales de Calcio y Magnesio Sólidos Disueltos $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ $\text{CaSO}_4$ $\text{CaCl}_2$ $\text{MgSO}_4$ $\text{NaCl}_2$	Forma Escamas Depósitos Destruye el jabón Destruye tuberías
Hierro y manganeso	$\text{Fe}^{++}$ $\text{Mn}^{++}$ , Sólidos disueltos, Coloides, sólidos en suspensión	Sabor astringente, Obstrucciones, Manchas de óxidos
Nitratos (Es rara su presencia)	$\text{NO}_3$ , Sólidos disueltos	Daña la sangre, No causa daños industriales
Nitritos	$\text{NO}_2$ , Sólidos disueltos	Afecta posibilidad, Es venenoso
Radioactividad	Gases Radioactivos	Carecer, Medicina (Poca Cantidad)
Sílice	$\text{SiO}_2$ , Sólidos Disueltos	Incrustaciones, Depósitos
Sodio y Potasio	$\text{Na}^+$ $\text{k}^+$ Sólidos Disueltos	Afecta el agua Potable No afecta Procesos Industriales
Sulfatos	$\text{SO}_4^{=}$	Incrustación, Sabor Amargo y Purgante
Turbidez	Sólidos Disueltos	Causa Manchas en papel y telas, Depósitos
<b>Oxígeno</b>	$\text{O}_2$ Gas Disuelto	Corrosión

FUENTE: (21)

## 2.5.2 Principales Usos de Agua en la Industria

En las industrias es necesaria la utilización de agua para diversos usos con diferentes características. En este capítulo se describe el tipo de agua que se utiliza en diferentes sistemas, y se resumen en la tabla 2.7.2.1. <sup>(21)</sup>

**Tabla 2.5.2.1. Tipos de Agua manejadas en Plantas de Proceso**

Tipo de Agua	Usos	Características	Velocidad Recomendada (Ft/seg)	Presión (Pisg)	Temperatura(°F)
Enfriamiento	Enfriamiento en cambiadores de calor, uso en bombas, compresores, eyectores, etc.	Limpia, libre de sólidos, libre de materia orgánica, sin gases y baja dureza	3-7	-60	20-40
Para Calderas	Producción de vapor de agua (Baja, media y alta presión)	Agua desmineralizada bidestilada	6-8	1.10	60
Contra Incendio	Combatir incendios en exteriores e interiores	Libre de sólidos en suspensión y baja dureza	7-12	100	60
De Servicio	Limpieza, mantenimiento, pruebas	Libre de sólidos en suspensión y baja dureza	4-8	25	60
De Proceso	Dilución, eliminación de ciertos elementos	Agua potable bidestilada, desmineralizada	4-8	La requerida por el proceso	60 o la requerida por el proceso
Uso Sanitario	Empleo en muebles Sanitarios	Libre de sólidos, materia orgánica y gases, baja dureza	4-8	100	75-90
Potable	Para beber, preparación de alimentos, limpieza, aseo	Agua bidestilada con cierta concentración de Cl <sub>2</sub>	3-6	14.7 a 40	60

FUENTE: (21)

### 2.5.2.1 Agua de Proceso

Esta agua se usa en los procesos como compuesto reaccionante o solvente, así como para evitar la contaminación de productos o envenenamiento de catalizadores. Se requiere que el agua destinada para el uso en proceso esté altamente purificada, para esto se ablanda y desmineraliza.

La calidad del agua es muy variada dependiendo del proceso del cual será materia prima. Una de las industrias que demanda muy alta calidad de agua es la de Semiconductores y Microcircuitos, debido a la enorme influencia de los contaminantes disueltos sobre las características eléctricas y de continuidad en el circuito impreso. En todos los casos el agua debe ser ultra pura; la ASPEC (Association for the Control and Estudy of Contamination), ha establecido niveles de calidad en su norma ASPEC82/17. <sup>(22)</sup>

### 2.5.2.2 Agua de Alimentación para Calderas

La calidad del agua requerida en calderas y sistemas de generación de potencia obedece a los factores incrustación, arrastre de sólidos en el vapor y corrosión. El caso típico arrastre por volatización de minerales disueltos, es el problema de la sílice. Esta vaporiza a temperaturas superiores a 250 °C,

entonces la sílice se depositara ya sea en la superficie de transferencia de calor o en los alabes de la turbina. <sup>(21)</sup>

Los principales tratamientos para la adaptación del agua que utilizan las calderas son, los siguientes:

- Tratamiento ácido por agentes orgánicos tensoactivos para evitar depósitos de  $\text{CaCO}_3$  y de  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  en las líneas de alimentación de agua para calderas.
- Eliminación de sílice para prevenir la formación de incrustaciones de  $\text{CaSiO}_2$  Y  $\text{MgSiO}_2$
- Separación de aceite para evitar depósitos carbonosos y formación de espuma
- Deareación para eliminar gases disueltos que puedan ser corrosivos

### **2.5.2.3 Agua Contra Incendio**

La instalación de agua contra incendio debe tener la particularidad de que en caso de requerirse así, pueda interconectarse con el almacenamiento de agua más grande del que se disponga. El agua contra incendio no requiere de tratamiento previo. El agua de mar también es utilizada para éste servicio. <sup>(22)</sup>

### **2.5.2.4 Agua Para Servicios Generales**

Este tipo de agua se utiliza para operaciones de lavado y limpieza. Debe estar libre de sedimentos y no requiere de ningún tipo de tratamiento posterior. <sup>(15)</sup>

### **2.5.2.5 Agua de Enfriamiento**

La mayor parte del agua empleada con fines industriales se usa para enfriar un producto o un proceso. El enfriamiento directo con aire está hallando su uso creciente, sobre todo en áreas donde el agua es escasa, pero todavía está muy atrás del agua en número total de aplicaciones y en la carga total de transferencia de calor.

Durante años recientes, el uso de agua para enfriamiento se ha puesto bajo una vigilancia que va en aumento desde el punto de vista ambiental.

Para el agua de enfriamiento es necesario realizar un tratamiento que evite la incrustación, corrosión y formación de algas y hongos. Se deben incrementar los tratamientos si el sistema es de recirculación. <sup>(22)</sup>

### Existen tres técnicas de enfriamiento:

- Circuito abierto. El agua se pone en contacto con el cuerpo (líquido, sólido o gaseoso) por enfriar y es posteriormente desechada. Se emplea así cuando se dispone de una gran cantidad de agua sin costo (proveniente de lagos, mares o ríos).
- Circuito Semicerrado. El agua se pone en forma alternativa en contacto con el objeto por enfriar y luego con la atmósfera (en una torre o estanque de enfriamiento). El consumo de agua (agua de repuesto) corresponde a las pérdidas por evaporación y purgas, para evitar la concentración de sales. La relación de concentración (gasto de agua de repuesto/gasto de purga) se relaciona en función de la calidad del agua y varía entre 1.05 y 5. El gasto de repuesto es aproximadamente 1 a 4% del gasto en el circuito. Esta es la técnica en donde preferencialmente se aplica agua residual doméstica tratada.
- Circuito cerrado. El agua no entra en contacto directo con el medio por enfriar. En este caso, el agua de repuesto es menos que el del circuito semicerrado. <sup>(23)</sup>

Para el enfriamiento se emplea agua de pozos fluvial potable (frecuentemente cara para este propósito), marina, o aguas residuales domésticas o industriales. <sup>(23)</sup>

La composición típica del agua utilizada en torres de enfriamiento es la que se muestra en la tabla 2.6.2.5.1

**Tabla 2.6.2.5.1 Criterios de calidad de agua de enfriamiento.**

Parámetro (mg/l)	Un solo paso	Recirculación
Alcalinidad	500	350
Aluminio	Como llegue	0.1
Bicarbonato	600	24
Calcio	200	50
Cloro	600	500
Cobre	Como llegue	Como llegue
Dureza	850	650
Acido sulfhídrico	Como llegue	Como llegue
Hierro	0.5	0.5
Magnesio	Como llegue	Como llegue
Manganeso	0.5	0.5
Aceite	No flotante	Como llegue
Carbón orgánico total	No flotante	Como llegue
Substancias activas al azul del metileno	Como llegue	Como llegue
Oxígeno disuelto	Presente	Como llegue
pH	5-8.3	Como llegue
Sólidos suspendidos	5000	100
Sílice	50	50
Sólidos disueltos totales	1000	Como llegue
Sulfato	680	200

FUENTE: (17)

Los principales problemas que se pueden presentar debido a la mala calidad del agua son:

- Formación de depósitos. Principalmente de carbonato o fosfato de calcio, y en casos excepcionales carbonato de magnesio.
- Corrosión. Principalmente en metales ferrosos. Es ocasionada por el Oxígeno disuelto del agua y celerada en agua de pH ácido, baja alcalinidad y alto contenido de dióxido de carbono. La corrosión reduce la vida de las canalizaciones y afecta al rendimiento del proceso, problema que se incrementa en los circuitos semicerrados donde ocurre una concentración de compuestos a medida que el agua se evapora.
- Obstrucción de los sistemas. Por sedimentación de partículas en suspensión.
- Crecimientos biológicos. Formados Principalmente por bacterias metabolizadoras de fierro, magnesio y azufre, así como por algas de diversos géneros. <sup>(23)</sup>

#### **2.5.2.5.1 Usuarios del Agua de Enfriamiento**

En general, la industria emplea grandes cantidades de agua para enfriamiento en muy diversos procesos, entre los principales se pueden mencionar los siguientes:

- Enfriamiento de condensadores en plantas generadoras de energía, refinadoras de petróleo, plantas químicas, destilerías, etc.
- Enfriamiento de máquinas de combustión y plantas de bombeo.
- Enfriamiento de hornos.

Las ramas industriales que son posibles usuarias del agua residual doméstica tratada para enfriamiento son:

- Generación de energía eléctrica en centrales térmicas o nucleares
- En la siderurgia en los altos hornos.
- En la fabricación del acero en los hornos de difusión.
- En la petroquímica, química y fabricación de caucho.
- En las industrias alimentarias.
- Vidrieras
- Automotriz
- Textil
- Papeleras, etc. <sup>(23)</sup>

## **Capítulo 3**

### **Legislación Ambiental en Materia de Agua**

El problema que representa el uso, manejo y disposición de las aguas residuales sin tratamiento alguno, es de tal magnitud que se han dictado normas y leyes expresas enfocadas a su resolución.

Hace algunos años (1998) que en nuestro país, se comenzó a dar la importancia que merece esta problemática, y por lo tanto el Gobierno ha establecido leyes y reglamentos que regulan el uso y protegen el recurso hidráulico.

La base de estas leyes es el Art. 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, que establece que corresponde a la Nación la propiedad originaria de las aguas y de las tierras comprendidas dentro del territorio nacional y, además, regular el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de apropiación, entre los cuales se encuentra el agua.

Para ejercer este artículo, el Gobierno se vale de leyes y reglamentos expedidos para regular el aprovechamiento entre los sectores municipal, agrícola e industrial en forma prioritaria, así como para prevenir y controlar la contaminación del recurso hidráulico.

El Instituto Nacional de Ecología y la Comisión Nacional del Agua expidieron en forma coordinada tres Normas Oficiales Mexicanas para la prevención y control de la contaminación del agua. La nomenclatura de las normas cambió de ECOL a SEMARNAT de acuerdo con las modificaciones de nomenclaturas especificadas en el Diario Oficial de la Federación del 23 de abril de 2003.

- **NOM-001-SEMARNAT-1996.** Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el día 6 de enero de 1997 y entró en vigor el día 7 de enero de 1997. Esta norma se complementa con la aclaración publicada en el mismo medio de difusión del día 30 de abril de 1997.
- **NOM-002-SEMARNAT-1996.** Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Se publicó en el Diario Oficial de la Federación el día 3 de junio de 1998 y entró en vigor el día 4 de junio de 1998.
- **NOM-003-SEMARNAT-1997.** Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se rehúsen en servicios al público. Se publicó en el Diario Oficial de la Federación el día 21 de septiembre de 1998 y entró en vigor el día 22 de septiembre de 1998.
- **NOM-004-SEMARNAT-2002.** Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Se publicó en el Diario Oficial de la Federación el día 15 de agosto de 2003 y entró en vigor el día 16 de agosto de 2003.

### **3.1 Ley de Aguas Nacionales**

Esta Ley es reglamentaria de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en materia de aguas nacionales; es de observancia general en todo el territorio nacional, sus disposiciones son de orden público e interés social y tiene por objeto regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable.

El Título Séptimo de esta Ley trata sobre la prevención y control de la contaminación de las aguas, haciendo mención que la declaratoria de interés público es importante en el establecimiento de las modalidades necesarias para proteger la calidad del agua. Esta disposición se relaciona con el artículo 117 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente <sup>(24)</sup>

En el Art. 112 de esta Ley, se menciona, que en el caso de descarga de aguas residuales a bienes nacionales, se cobra un derecho federal por la utilización de los bienes como cuerpos receptores de las descargas, independientemente de que se cumpla con la legislación ecológica, es decir, no es en sustitución de las obligaciones de tratamiento de aguas residuales, sino además, cuando no cumplan con las normas y condiciones particulares de descarga, deberán efectuar su pago, independientemente de la aplicación de las sanciones que procedan. No es un derecho por contaminar, sino precisamente lo contrario, o sea, para descontaminar a través del uso o aprovechamiento de los cuerpos receptores nacionales que diluyen la descarga o restablecen la calidad perdida <sup>(24)</sup>

### **3.2 Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Agua**

Las Normas Oficiales Mexicanas en materia de agua establecen los límites máximos permitidos de contaminantes en descargas de aguas residuales de diferentes orígenes a cuerpos receptores.

Los valores expresados en las Normas para los diferentes parámetros se definen no solamente considerando el origen del agua, sino considerando las características del cuerpo receptor, su capacidad de autopurificación o asimilación de las sustancias, o en base a criterios de calidad de agua recomendados para ecosistemas acuáticos naturales. En el caso de que el receptor sea el sistema de drenaje y alcantarillado, los valores límites se fijan en base a los procesos de tratamiento que recibirán en la planta las aguas residuales municipales.

Para cumplir con los criterios establecidos en la Norma, las aguas residuales deben recibir un tratamiento, a fin de alcanzar los valores permitidos para su descarga. A nivel internacional se exige como mínimo un tratamiento secundario de los efluentes de origen municipal e industrial o con la mejor tecnología disponible. Cuando existen algunos contaminantes en el agua residual no contemplados en la Norma, se fijan Condiciones Particulares de Descarga, para esas sustancias, de tal manera que no se altere el equilibrio ecológico. <sup>(22)</sup>

### **3.3 Norma Oficial Mexicana NOM – 003 - SEMARNAT -1997**

Esta Norma establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas tratadas que se rehúsen en servicios al público con el objeto de proteger el medio ambiente y la salud de la población, y es de observancia obligatoria para las entidades públicas responsables de su tratamiento y reuso.  
(25)

### **3.4 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente**

La LGEEPA es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto propiciar el desarrollo sustentable y establecer las bases para:

- I.-** Garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente adecuado para su desarrollo, salud y bienestar;
- II.-** Definir los principios de la política ambiental y los instrumentos para su aplicación;
- III.-** La preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente;
- IV.-** La preservación y protección de la biodiversidad, así como el establecimiento y administración de las áreas naturales protegidas.
- V.-** El aprovechamiento sustentable, la preservación y, en su caso, la restauración del suelo, el agua y los demás recursos naturales, de manera que sean compatibles la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad con la preservación de los ecosistemas;
- VI.-** La prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo;
- VII.-** Garantizar la participación corresponsable de las personas, en forma individual o colectiva, en la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente;
- VIII.-** El ejercicio de las atribuciones que en materia ambiental corresponde a la Federación, los Estados, el Distrito Federal y los Municipios, bajo el principio de concurrencia previsto en el artículo 73 fracción XXIX - G de la Constitución;
- IX.-** El establecimiento de los mecanismos de coordinación, inducción y concertación entre autoridades, entre éstas y los sectores social y privado, así como con personas y grupos sociales, en materia ambiental, y

**X.-** El establecimiento de medidas de control y de seguridad para garantizar el cumplimiento y la aplicación de esta Ley y de las disposiciones que de ella se deriven, así como para la imposición de las sanciones administrativas y penales que correspondan.

En todo lo no previsto en la presente Ley, se aplicarán las disposiciones contenidas en otras leyes relacionadas con las materias que regula este ordenamiento.

### **3.5 Ley de Aguas del Distrito Federal**

Publicada en la gaceta oficial del D.F. el 27 de mayo de 2003 y entro en vigor 28 de mayo de 2003

Los objetivos principales de la ley de aguas del D.F. son regular la gestión integral:

- De los recursos hídricos
- Y la prestación de los servicios públicos de agua potable, drenaje y alcantarillado
- El tratamiento y reuso de aguas residuales.

#### **Sujetos a los que se aplica:**

Todas las personas físicas y morales que se encuentren en el distrito federal.

#### **Autoridades encargadas de aplicarla:**

- SMA
- SISTEMA DE AGUAS
- PAOT (procuraduría ambiental y del ordenamiento territorial del D.F.)
- DELEGACIONES <sup>(26)</sup>

**Capítulo 4**  
**Tecnologías para Tratamiento de Aguas Residuales**

## 4.1 Esquema General de Tratamiento de Aguas Negras

A comienzos del siglo XX, algunas ciudades e industrias empezaron a reconocer que el vertido directo de desechos en los ríos provocaba problemas sanitarios. Esto llevó a la construcción de instalaciones de depuración. Aproximadamente en aquellos mismos años se introdujo la fosa séptica como mecanismo para el tratamiento de las aguas residuales domésticas tanto en las áreas suburbanas como en las rurales.

A finales de los años 50's se inicio el tratamiento formal de las aguas residuales y se construyo la primer planta de tratamiento de lodos activados para las aguas municipales de la ciudad de Morelia, Michoacán.

Se generalizo el uso de sistemas lagunales diseñados para la remoción de carga orgánica y mezcla completa. Hasta la década de los años 80's, se iniciaron trabajos para determinar la cinética de remoción de coniformes fecales. Entre 1926 y 1927 se construyeron alrededor de cien sistemas lagunales para la segunda mitad de los años 70's y principios de los 80's, las principales preocupaciones eran la carga orgánica y la presencia de sólidos en los efluentes, así como sus efectos en las corrientes. También en esta década se evaluaron y caracterizaron las aguas residuales de algunos sectores industriales y se recomendaron métodos de tratamiento. A principios de los años 70's se realizaron los estudios sobre tratados de aguas residuales, provenientes de las refinerías y la industria petroquímica, hasta 1981 se establece como parámetros a controlar la temperatura, el pH, los sólidos sedimentables, la materias flotantes, las grasas y aceites. <sup>(15)</sup>

En la actualidad se han desarrollado diversos procesos para el tratamiento de aguas residuales, con el fin de cumplir con las normas y requerimientos de calidad establecidos por las organizaciones gubernamentales.

Los procesos de tratamiento de las aguas residuales persiguen varios objetivos como son: <sup>(27)</sup>

- la eliminación de los sólidos suspendidos, de tamaño apreciable, por medio de cribado o de sedimentación,
- la eliminación de grasas, aceites y sólidos grasos por medio de flotación y desnatado, auxiliado en algunos casos por tratamientos químicos,
- la eliminación de los sólidos coloidales a través de la floculación - coagulación, seguida de procesos de sedimentación y filtración,
- la neutralización de la acidez o alcalinidad excesiva, por adición de productos químicos,
- la eliminación o estabilización de los sólidos disueltos mediante precipitación química, intercambio iónico, procesos biológicos o sus combinaciones,
- la decoloración por tratamiento químico, con sedimentación o filtración, o adsorción,
- y la disminución de la temperatura de los residuos excesivamente calientes, por enfriamiento.

Los contaminantes presentes en el agua residual pueden eliminarse por medios físicos, químicos y biológicos. Por lo cuál, los métodos de tratamiento se clasifican en operaciones físicas unitarias, procesos químicos unitarios y procesos biológicos unitarios, lo cual se observa en la tabla 4.1.1 <sup>(27)</sup>

**Tabla 4.1.1 Sistemas de tratamiento utilizados para eliminar los contaminantes presentes en el agua residual**

Contaminante	Tipo de tratamiento
Sólidos en suspensión	Sedimentación Desbaste y aereación Variaciones de filtración Flotación Adición de polímeros o reactivos químicos Coagulación/sedimentación Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno
Materia orgánica biodegradable	Variaciones de lodos activados Película fija: filtros percoladores Película fija: discos biológicos Variaciones del lagunaje Filtración intermitente en arena Sistemas de tratamiento por evacuación a terreno Sistemas fisicoquímicos
Patógenos	Cloración Hipocloración Ozonización Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno
Nitrógeno	Variaciones de sistemas de cultivo - suspendido con nitrificación y desnitrificación Arrastre de amoníaco (stripping) Intercambio de iones Cloración en el punto crítico Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno
Fósforo	Adición de sales metálicas Coagulación y sedimentación con cal Eliminación biológica y química del fósforo Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno
Materia orgánica refractaria	Adsorción en carbón Ozonización terciaria Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno
Metales pesados	Precipitación química Intercambio de iones Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno
Sólidos disueltos inorgánicos	Intercambio de iones Ósmosis inversa Electrodialisis

**FUENTE:** (27)

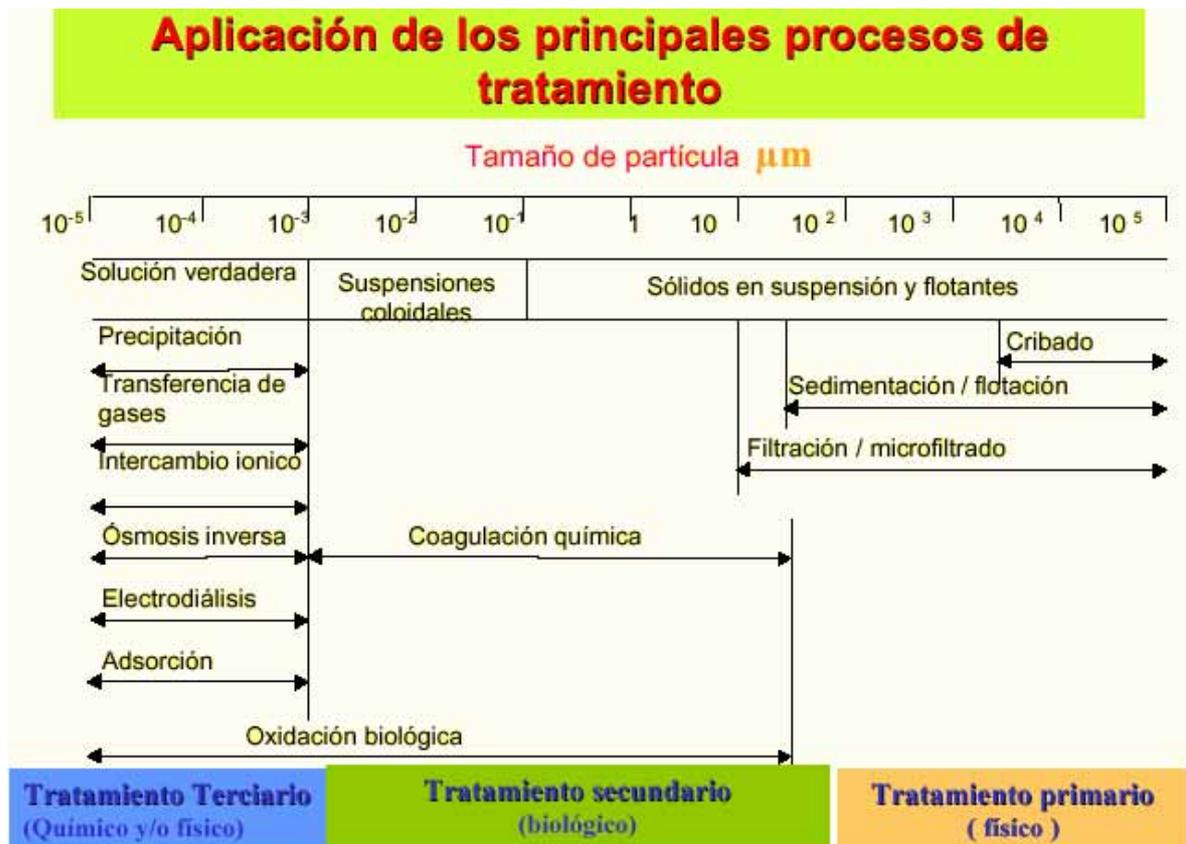
El porcentaje de utilización de los principales métodos de tratamiento de las aguas se muestra en la tabla 4.2.

**Tabla 4.1.2 Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales**

Proceso	% de agua tratada
Lodos Activados	39.5
Otros	27
Lagunas de estabilización	18.3
Lagunas aisladas	7.1
Filtros Biológicos	3.8
Zanjas de Oxidación	3.5
Tanques IMHOFF	0.8

FUENTE: (28)

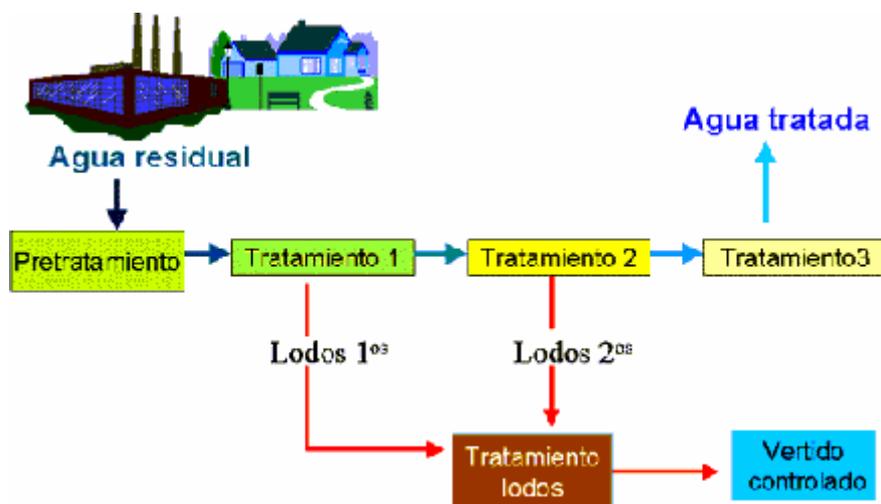
En la figura 4.1.1 se muestran los procesos que se aplican para el tratamiento de agua residual municipal considerando el tamaño de partícula.



**Figura 4.1.1 Tipo de Tratamiento del Agua Residual Municipal por su Tamaño de Partícula**

FUENTE: (27)

El Agua Fresca tiene un ciclo de utilización muy corto, el cual se pretende ampliar, por medio del tratamiento de las aguas residuales. En la figura 4.1 se observa la secuencia de tratamiento para las aguas residuales domesticas.



**Fig. 4.1.1 Secuencia de Tratamiento que puede aplicarse al tratamiento de aguas residuales domesticas.**

FUENTE: (27)

## 4.2 Tratamiento Primario

Se utiliza fundamentalmente para acondicionar el agua a fin de poder aplicar después algún método de tratamiento para disminuir o eliminar la contaminación orgánica o inorgánica. De igual modo, con el propósito de retirar sólidos perniciosos para el equipo de bombeo y equipo secundario.

Los métodos más comunes de tratamiento primario son: cribado, homogeneización, neutralización, sedimentación, separación de grasas y aceites (flotación), y coagulación.

Las operaciones físicas unitarias constituyen los primeros métodos de tratamiento utilizados, es decir el primer tratamiento que se les da a las aguas residuales Urbanas. Las principales aplicaciones son mostradas en la tabla 4.2.1 <sup>(27)</sup>

**Tabla 4.2.1 Aplicaciones del tratamiento primario de aguas residuales**

Operación	Aplicación
Desbaste	Eliminación de sólidos gruesos y sedimentables por intercepción
Dilaceración	Trituración de sólidos gruesos hasta conseguir un tamaño uniforme
Homogeneización del caudal	Regulación del caudal y de las cargas de DBO y sólidos en suspensión
Mezclado	Mezclado de los reactivos químicos y gases con el agua residual, y mantener los sólidos en suspensión
Floculación	Provoca la agregación de pequeñas partículas aumentando el tamaño de las mismas, para mejorar su eliminación por sedimentación por gravedad
Sedimentación	Eliminación de sólidos sedimentables y espesamiento de fangos
Flotación	Eliminación de sólidos en suspensión finamente divididos y de partículas con densidades cercanas a la del agua
Filtración	Eliminación de los sólidos finos en suspensión que restan tras el tratamiento biológico o químico
<b>Microtamizado</b>	Elimina algas procedentes de los lagunas de estabilización

**FUENTE:** (27)

#### **4.2.1 Cribado**

El objetivo del desbaste o cribado es eliminar de las aguas residuales los constituyentes que pueden dañar u obstruir las tuberías y bombas, interfiriendo en los procesos de tratamiento. Los dispositivos utilizados para este fin son las rejas de barras, clasificadas de acuerdo a su tamaño.

Las rejas consisten de una serie de barras o soleras de metal paralelas, colocadas en un determinado ángulo de inclinación en el canal que conduce las aguas residuales a la planta de tratamiento. El ángulo de inclinación de la rejilla, está en función de la técnica de limpieza prevista, que puede ser manual o mecánica. Para la limpieza manual se colocan en ángulos hasta de 60° con respecto a la horizontal y para la limpieza mecánica se instalan en ángulos mayores, inclusive hasta en posición vertical.

La cantidad de desperdicios sólidos retenidos por las cribas varía según la naturaleza de las aguas negras y el tamaño de las aberturas de la criba. Los desperdicios retenidos contienen de 75 a 90% de humedad y están formados por desperdicios fecales, trapos, papel, trozos de caucho, residuos de alimentos y otros productos expuestos a la putrefacción, por lo que se requiere su rápida eliminación, a través de procesos como enterramiento, incineración o digestión.<sup>(28)</sup>

#### **4.2.2 Desmenzadores**

Se utilizan para reducir el tamaño de los sólidos mayores a través de la trituración o corte sin removerlos de las aguas residuales. Entre los desmenzadores más comunes están:

- Bomba desmenzadora
- Cilindro de cuchillas
- Tambor de rendijas

Los alabes de las bombas están provistos de cuchillas reemplazables. El agua pasa a través de la bomba y los sólidos quedan reducidos a dimensiones apropiadas para su desarenado posterior, dejando una cantidad suficiente de partículas flotables del orden de 0.2 mm, que sirven de soporte a los lodos.<sup>(28)</sup>

#### **4.2.3 Desarenadores**

Las arenas pueden causar daños a las bombas por abrasión, ocasionando dificultades de operación. La cantidad de arena dependerá de varios factores, tales como el sistema de alcantarillado. Puede esperarse un volumen de arenas de 7 a 80 litros por cada 1,000 m<sup>3</sup>. Las unidades utilizadas en la remoción de arenas deben diseñarse de forma que las arenas sean separadas del flujo residual, pero sin remoción de sólidos orgánicos.<sup>(28)</sup>

Los tipos de unidades para remover las arenas son:

- Cámaras simples de flujo horizontal
- Tanque aireados

#### **4.2.4 Separadores de Grasas**

Un tanque separador de grasas es 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 líquido salga del tanque de forma continua, a través de una abertura situada en el fondo, o por debajo de unos muros o deflectores de espumas bastante profundos. La finalidad de los separadores de grasas es la separación del agua residual de las sustancias más ligeras que tienden a flotar. La mayoría de los separadores de grasas son rectangulares o circulares y están previstos para tiempos de detención de 1 a 15 minutos.<sup>(28)</sup>

#### 4.2.5 Sedimentación

La sedimentación es la separación de las partículas más pesadas que el agua, mediante la acción de la gravedad. Esta operación se aplica para la eliminación de arena, material sólido. Particularmente en el tanque de decantación primaria, de los flóculos químicos cuando se aplica la coagulación química y para la concentración de sólidos en los espesadores de lodos.

Generalmente en un agua residual doméstica la relación de sólidos es:

- Sólidos suspendidos totales 100%
- Sólidos sedimentables totales 60%
- Sólidos suspendidos no sedimentables 40%

El proceso de sedimentación se basa en la diferencia en gravedad específica entre el material sedimentable y el agua, por lo que cualquier factor que afecte esta característica, afectará la velocidad de sedimentación. <sup>(28)</sup>

#### 4.2.6 Flotación

La flotación es una operación unitaria utilizada para separar partículas sólidas o líquidas de una fase líquida, que se efectúa mediante la introducción de finas burbujas de aire en la fase líquida, las cuales al adherirse a las partículas que poseen una densidad mayor a la del agua, propician que tal diferencia de densidad desaparezca, lográndose así su elevación y eliminación. <sup>(28)</sup>

Los métodos utilizados para introducir aire y provocar la formación de burbujas son:

- Inyección de aire mientras el líquido se halla bajo presión, seguido de liberación de la presión (flotación por aire disuelto)
- Aireación a presión atmosférica (flotación por aire)
- Saturación con aire a presión atmosférica, seguido de aplicación de vacío al líquido (flotación por vacío). <sup>(28)</sup>

#### 4.2.7 Floculación

Es el proceso de agitación para aumentar la posibilidad del contacto entre partículas tras la adición de los productos químicos. La floculación se ve favorecida por una agitación moderada con paletas a poca velocidad. Un mayor contacto entre las partículas favorecerá la formación de flóculos, pero si la agitación es demasiado fuerte, los esfuerzos cortantes que se producen romperán el flóculo en partículas más pequeñas. <sup>(28)</sup>

#### 4.2.8 Filtración

La filtración es una operación unitaria utilizada para lograr remociones de sólidos suspendidos de efluentes provenientes de los procesos de tratamiento biológico y químico. La filtración se lleva a cabo pasando el agua residual a través de una cama filtrante compuesta de material granular con o sin adición de sustancias químicas, involucra principalmente dos fases: filtración y retrolavado.

El medio filtrante utilizado puede ser arena, carbón, arena - carbón, tierra de diatomeas etc. Los principales tipos de filtro de medio granular pueden clasificarse de acuerdo con: <sup>(28)</sup>

- el sentido del flujo,
- los tipos de lecho filtrante,
- la fuerza aplicada y
- el método de control del caudal.

Con respecto a la fuerza motriz, los filtros son de gravedad y a presión. La diferencia es que en los filtros a presión, la operación se lleva a cabo en un recipiente cerrado sujeto a presión por la acción del bombeo de las aguas.

La tasa de flujo a través del filtro se expresa según la ecuación:

$$Tasa\ de\ flujo = \frac{Fuerzamotoz}{Re\ sistenciadel\ filtro}$$

El final del proceso de filtración es cuando los sólidos suspendidos en el efluente comienzan a incrementarse más allá de un nivel aceptable o cuando se sobrepasa el límite recomendable de pérdida de carga.

Al terminar la fase de filtración, el filtro es retrolavado para remover el material que se ha acumulado en la cama filtrante. El agua de lavado que contiene los sólidos suspendidos es regresada a sedimentación primaria o al proceso de tratamiento biológico.

En relación a la dirección del flujo, los filtros pueden clasificarse como de flujo ascendente, descendente y mixto. Respecto al tipo de cama filtrante, los filtros pueden ser clasificados en función del número de medios filtrantes utilizados como medio simple, medio dual y medio triple.

La clasificación más comúnmente adoptada para los filtros se basa en la operación hidráulica, de acuerdo a esto, <sup>(28)</sup> los filtros se agrupan como filtros rápidos, filtros lentos y filtros a presión.

### **4.3 Tratamiento Secundario**

Esta etapa es mucho más vasta y amplia en métodos de tratamiento; se pueden dividir en dos grandes apartados: aerobios y anaeróbicos. El más popular, sobre todo en plantas municipales, es el aerobio, que tiene a su vez una serie de variantes: lodos activados convencionales, lodos activados de mezcla completa, lodos activados de alta tasa, aereación extendida, aereación por pasos, proceso Kraus, oxígeno puro, lagunas aereadas, lagunas facultativas, zanjas de oxidación, biodiscos y reactor de cargas secuenciales.

Para agua residual con una mayor carga orgánica se utilizan los anaerobios, los más comunes: fosa séptica, tanque Imhoff, manto de lodos de flujo ascendente, reactor de metanación y biofiltros.

Estos procesos tienen como finalidad el tratamiento biológico del agua residual para coagular y eliminar los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica.<sup>(28)</sup>

#### **4.3.1 Lodos Activados**

Como lodos activados se conoce al conjunto de procedimientos de tratamiento, que poseen en común la operación de poner en contacto el agua residual con una masa biológica preformada en un tanque de aereación, con la finalidad de lograr que la materia orgánica presente en el agua residual sea degradada o descompuesta a sustancias más simples e inocuas para el ambiente, a través de la acción de los microorganismos presentes en los flóculos.

Como lodo activado se conoce a un conglomerado floculento de microorganismos, materia orgánica y materiales inorgánicos. La superficie de estos flóculos es altamente activa en la acción de adsorber los materiales coloidales y suspendidos que se encuentran en el agua residual.

Este proceso consiste en que el agua residual se introduce en un reactor donde se mantiene un cultivo bacteriano aerobio en suspensión, al contenido del reactor se le denomina líquido - mezcla. Dentro del reactor las bacterias en suspensión convierten la materia orgánica a sustancias más simples a través de una serie compleja de reacciones químicas. Estas reacciones son catalizadas por sustancias orgánicas presentes en los microorganismos, llamadas enzimas.

Dos aspectos fundamentales en la degradación de la materia orgánica, son la naturaleza del residuo y la clase de microorganismos presentes; así como la forma, las condiciones ambientales y la presencia de sustancias tóxicas en el agua residual.

El ambiente aerobio del reactor se consigue mediante el uso de difusores o aireadores mecánicos, que a su vez, mantienen el líquido mezclado completamente. El agua residual es aereada por un periodo de 4 a 8 horas en

el tanque de aereación. El licor se conduce a un tanque de sedimentación donde las células se separan del agua residual tratada. Una parte de las células sedimentadas es recirculada para mantener la concentración deseada de organismos en el reactor, mientras que otra es purgada del sistema. El nivel al cual debe mantenerse la masa biológica depende de la eficiencia deseada del tratamiento y de otras consideraciones de la cinética del crecimiento. <sup>(28)</sup>

### **Ventajas**

- Alta remoción de carga orgánica.
- Efluentes de buenas características organolépticas.
- No requiere sedimentación primaria, ni digestión de lodos.
- Procesos estables, cuando los lodos son manejados apropiadamente.
- Estas plantas se caracterizan por el poco espacio que requiere su instalación.
- Estas plantas son sistemas modulares, fácilmente expansibles <sup>(28)</sup>

### **Desventajas**

- Requiere equipo mecanizado (motor, reductor. Aireadores, bombas, etc.).
- Alto consumo de energía.
- Requiere personal capacitado. Eventual producción de olores.
- Eventual aspersión de partículas de agua y espumas.
- Requiere mayor mantenimiento y reposición de equipos.
- Produce gran cantidad de fango.
- La opción de lodos activados es la más costosa. <sup>(28)</sup>

### **4.3.2 Lagunas de Aireación**

La laguna aireada es uno de los métodos de depuración biológica más antiguos y muy empleado en países donde la utilización de espacio es más factible que en nuestro entorno.

Nacieron como evolución de las lagunas naturales aerobias o facultativas, tienen la ventaja sobre estas, de menor superficie ocupada y la utilización de un medio controlado, mediante el aporte de oxígeno por medios mecánicos.

Los rendimientos que pueden alcanzarse con el lagunaje superan las exigencias de vertido.

El funcionamiento y explotación de las aguas es muy simple, lo cual hace de esta solución un proceso muy adecuado para poblaciones hasta 5.000 habitantes donde no existan problemas de espacio.

Los fangos producidos en el proceso se acumulan en el fondo de las lagunas de sedimentación y solo deben efectuarse las extracciones muy de tarde en tarde, el tiempo entre evacuaciones puede llegar a 3 o 4 años, esto facilita la operación de la planta en municipios donde no se dispone de equipos especializados de mantenimiento conocedores de la tecnología de los procesos biológicos.

El oxígeno necesario para mantener la laguna en condiciones aireadas se suministra mediante alguno de los equipos que a continuación detallamos, para cada caso nuestro departamento técnico estudiará el proceso más adecuado. <sup>(29)</sup>

- a. Aireadores superficiales, conocidos tradicionalmente como turbinas de aireación, en este caso están equipados con sistemas de flotadores.
- b. Hidroeyectores y aireadores sumergidos, en este caso todos los elementos de aireación quedan sumergidos en la laguna, tiene la ventaja de sencillez mecánica y ausencia de ruidos.
- c. Aireación mediante soplantes y difusores, el sistema tradicional de aireación de fondo mediante soplantes y difusores no necesita presentación, la utilización de difusores de burbuja fina permite un elevado rendimiento en la introducción de O<sub>2</sub>.

#### **4.4 Tratamiento Terciario**

Los tratamientos terciarios consideran operaciones más caras y sofisticadas, como filtración por carbón activado, desmineralización por osmosis inversa o resinas, coagulación-sedimentación-filtración y métodos electroquímicos. Éstos se recomiendan cuando el costo del agua es muy alto y conviene su reciclado al cien por ciento.

En el tratamiento de las aguas residuales, los procesos químicos unitarios se utilizan generalmente junto con las operaciones físicas unitarias y con los procesos biológicos unitarios, con el fin de conseguir los objetivos del tratamiento. Algunas de las aplicaciones de estos procesos son listadas en la tabla 4.3.1. <sup>(28)</sup>

### Cuadro 4.4.1 Aplicaciones de los procesos unitarios en el tratamiento de las aguas residuales

<b>Proceso</b>	<b>Aplicación</b>
<i>Precipitación química</i>	<i>Eliminación de fósforo y aumento de la eliminación de sólidos en suspensión en instalaciones de sedimentación primaria utilizadas en el tratamiento fisicoquímico</i>
<i>Adsorción</i>	<i>Eliminación de materia orgánica no eliminada en los tratamientos químicos y biológicos. Decloración del agua residual.</i>
<i>Desinfección</i>	<i>Destrucción selectiva de los organismos causantes de enfermedades</i>
<i>Desinfección con cloro</i>	<i>Destrucción selectiva de organismos causantes de enfermedades</i>
<i>Decloración</i>	<i>Eliminación del cloro combinado residual total remanente después de la cloración</i>
<i>Desinfección con ozono</i>	<i>Destrucción selectiva de organismos causantes de enfermedades</i>
<i>Otros</i>	<i>Productos químicos utilizados con objetivos específicos en el tratamiento del agua residual</i>

**FUENTE:** (28)

#### 4.4.1 Precipitación Química

Este proceso consiste en la adición de productos químicos al agua residual, con la finalidad de alterar el estado físico de los sólidos disueltos y en suspensión y facilitar su remoción por sedimentación. La eliminación se logra al quedar atrapados dentro de un precipitado voluminoso, constituido principalmente por el propio coagulante. Como resultado de la adición química hay un incremento neto de constituyentes disueltos en el agua.

Mediante la precipitación química llega a eliminarse del 80 al 90% de la materia total suspendida, del 40 al 70% de la DBO<sub>5</sub>, del 30 al 60% del DCO y del 80 al 90% de las bacterias. Los productos químicos más utilizados con este fin son: el sulfato de alúmina, el sulfato de hierro, la cal, el cloruro férrico y el sulfato férrico. <sup>(28)</sup>

#### 4.4.2 Adsorción

El proceso de adsorción consiste en la captación de sustancias solubles presentes en una solución por una interfase conveniente. Esta interfase puede encontrarse entre el líquido y un gas, un sólido u otro líquido. El proceso de adsorción en el tratamiento del agua residual suele llevarse a cabo con carbón activado y se considera como un proceso de afinado del agua ya tratada por procesos de tratamiento biológico, utilizándose el carbón como un medio para eliminar la materia orgánica residual disuelta.

Los tipos de carbón activo más usuales son: el granular y en polvo; el diámetro del carbón en polvo es inferior a la malla 200, mientras que el carbón granular tiene un diámetro superior a 0.1 mm.

El carbón activado se prepara de materiales carbonosos crudos como lana, lignita, carbón y cáscara de nueces o coco por un proceso de activación térmica que permite obtener una estructura muy porosa con grandes superficies (hasta de 1,000 m<sup>2</sup>/g). La ventaja del carbón activado como adsorbente es que permite la posibilidad de su reactivación (hasta 30 veces o más) sin pérdida apreciable de su poder adsorptivo. La reactivación se hace calentando el carbón hasta cerca de 1,700 °F (927 °C) en una corriente de aire atmosférico (reactivación térmica). Esta operación se puede adaptar en una mufla o en un horno rotatorio. Los compuestos orgánicos adsorbidos se queman y el carbón activado se restablece básicamente a su capacidad inicial de adsorción. <sup>(28)</sup>

#### 4.4.3 Desinfección

Por desinfección se entiende la destrucción selectiva de los organismos causantes de enfermedades. Las tres clases de microorganismos entéricos causantes de enfermedades en los humanos son las bacterias, los virus y los quistes amebianos. Las enfermedades bacterianas más comunes transmitidas por el agua son la tifoidea, cólera, paratifoidea y disentería bacilar. Las enfermedades causadas por virus y transmitidas por el agua son la poliomielitis y la hepatitis infecciosa. <sup>(28)</sup>

Para la desinfección se utilizan diferentes métodos clasificados en:

- agentes químicos
- agentes físicos
- medios mecánicos
- radiación

Existen varias técnicas para la desinfección de las aguas como se muestra en la tabla 4.4.3.1.

**Tabla 4.4.3.1 Clasificación de los métodos utilizados para la desinfección**

<b>Medios físicos</b>	<b>Medios químicos</b>	<b>Medios mecánicos</b>	<b>Radiación</b>
1. luz	1. cloro y sus compuestos	1. tamices	1. electromagnética
2. calor	2. bromo	2. desarenadores	2. acústica
3. filtración	3. yodo	3. sedimentación	3. partículas
	4. ozono	4. precipitación	
	5. fenol y compuestos	5. filtro percolador	
	6. alcoholes	6. lodos activados	
	7. metales pesados	7. cloración	
	8. colorantes		
	9. jabones y detergentes		
	10. compuesto amoniacal cuaternario		
	11. ácidos y álcalis		
	12. agua oxigenada		

FUENTE: (30)

Los cuatro mecanismos para la acción de los desinfectantes son:

- daño a la pared celular
- alteración de la permeabilidad de las células
- alteración de la naturaleza coloidal del protoplasma
- inhibición de la actividad enzimática

Para que un desinfectante cumpla con sus objetivos debe de poseer las siguientes características:

1. Capacidad para destruir, dentro de un periodo de tiempo razonable, un ámbito esperado de temperatura, fluctuaciones de composición, concentración y condiciones de las aguas residuales, todos los organismos patógenos presentes en dichas aguas.
2. No debe ser tóxico al hombre ni los animales.
3. Costo razonable, seguridad y facilidad en su manejo, transporte, almacenamiento y aplicación.
4. Proporcionar una protección residual contra la posible recontaminación del agua antes de su uso.<sup>(31)</sup>

#### **4.4.4 Osmosis Inversa**

Aunque los fenómenos Osmóticos se conocen desde hace más de 200 años, los primeros experimentos relacionando presión Osmótica con la temperatura y concentración del soluto se efectuaron al final del siglo pasado por Pfeffer.

El Experimento de Osmosis fue hecho por una membrana permeable al disolvente pero no al soluto (sacarosa), este tipo de membranas se conocen como semipermeables. Las primeras membranas semipermeables, utilizadas en Osmosis, fueron procedentes de tejidos de animales y más tarde se desarrollaron membranas sintéticas, siendo actualmente las más empleadas las de Acetato de Celulosa.

Los Factores que influyen en la Osmosis Inversa son:

- Presión.
- Temperatura.
- Concentración de sal en la alimentación.
- Recuperación.

En el Tratamiento de Aguas Residuales Mediante Osmosis Inversa, en influyente contaminado se pone en contacto con una membrana adecuada a una presión superior a la presión Osmótica de la solución. Bajo estas circunstancias, el agua con una cantidad muy pequeña de contaminantes pasa a través de la membrana. Los contaminantes disueltos se concentran en el compartimiento del agua residual. Este concentrado posiblemente sea una pequeña fracción del volumen total de agua residual a tratar, se descarga y se obtiene agua purificada en el otro compartimiento.<sup>(32)</sup>

#### 4.4.5 Intercambio Iónico

El intercambio iónico es una reacción química reversible, que tiene lugar cuando un ion de una disolución se intercambia por otro ion de igual signo que se encuentra unido a una partícula sólida inmóvil. Este proceso tiene lugar constantemente en la naturaleza, tanto en la materia inorgánica como en las células vivas.

Por sus propiedades como disolvente y su utilización en diversos procesos industriales, el agua acostumbra a tener muchas impurezas y contaminantes. Las sales metálicas se disuelven en el agua separándose en iones, cuya presencia puede ser indeseable para los usos habituales del agua. Además, el creciente interés por el medio ambiente, impone establecer tratamientos eficaces que eviten el deterioro de la calidad de las aguas, especialmente por el vertido de efluentes industriales altamente contaminados. Entre todos los tratamientos posibles, el intercambio iónico es una opción a considerar.

Los intercambiadores iónicos forman un grupo de materiales muy heterogéneo, cuya única característica común es que contienen una carga eléctrica fija capaz de enlazar a iones de carga opuesta. Se clasifican en dos grandes grupos: intercambiadores orgánicos e intercambiadores inorgánicos. Ambos grupos incluyen materiales sintéticos y naturales.<sup>(33)</sup>

##### 4.4.5.1 Intercambiadores Iónicos Inorgánicos

Las resinas para intercambio iónico inorgánico se clasifican en:

1. Naturales: Son aluminosilicatos como zeolitas, arcillas minerales y feldespatos.
2. Sintéticos: Generalmente se pueden subdividir en las siguientes categorías:
  - a. Óxidos metálicos hidratados. Ej. Óxido de titanio hidratado, ácido poliantimónico
  - b. Sales insolubles de metales polivalentes. Ej. Fosfato de titanio
  - c. Sales insolubles de heteropoliácidos. ej. molibdofosfato amónico
  - d. Sales complejas basadas en hexacianoferratos insolubles
  - e. Zeolitas sintéticas.

Las zeolitas y las arcillas son minerales de aluminosilicatos ampliamente distribuidos en la corteza terrestre. Algunas proceden de la erosión de las rocas, otras aparecen como depósitos sedimentarios y, por último, algunas tienen origen volcánico.

La compañía Unión Carbide lanzó al mercado, a principios de 1954, adsorbentes a base de zeolitas estas son sólidos microporosos con una estructura cristalina bien definida. La unidad constructora básica es el tetraedro  $TO_4$  (donde T=Si, Al, B, Ga, Ge, P...) cuya unión tridimensional a través de los átomos de oxígeno da lugar a la estructura poliédrica típica de las zeolitas. Esta estructura tridimensional presenta pequeños poros y canales en los que se

alojan los iones intercambiables y donde tiene lugar la reacción de intercambio iónico.

Las unidades  $\text{TO}_4$  más comunes son  $\text{SiO}_4^{-4}$  y  $\text{AlO}_4^{-5}$ . La fórmula general de las zeolitas se puede escribir como:



La capacidad de intercambio de cationes de las zeolitas proviene de la carga negativa que lleva asociada la unidad  $\text{AlO}_4$ . Cuando  $n \text{ Al}^{3+}$  sustituyen a  $\text{Si}^{4+}$ , es necesario un contracación  $\text{M}^{n+}$  para neutralizar la carga negativa resultante. El contracación  $\text{M}$  suele ser el ion  $\text{Na}^+$  o  $\text{H}^+$  (en cuyo caso la zeolita constituye un ácido sólido) y tienen la particularidad de ser fácilmente reemplazables por otros cationes que puedan difundir a través de los canales de la zeolita.

Las arcillas minerales son aluminosilicatos estructurados en capas bidimensionales. Están formadas por una capa resultado de combinar tetraedros de  $\text{SiO}_4$  y otra capa resultado de combinar octaedros de  $\text{Al}$  unido a seis oxígenos o a seis grupos  $\text{OH}$ . Ambas capas se unen entre sí compartiendo oxígenos. La capacidad de intercambiar cationes es resultado de la sustitución del  $\text{Si}^{4+}$  por el  $\text{Al}^{3+}$  en la capa tetraédrica, lo cual supone un exceso de carga negativa que es contrarrestado por cationes susceptibles de ser reemplazados.

Las zeolitas tienen una estructura de poro rígida, mientras que las estructuras en capa de las arcillas minerales tienen cierta elasticidad dependiendo de en que forma iónica se encuentre el mineral. En ambas, zeolitas y arcillas, las propiedades de intercambio iónico se basan principalmente en la densidad de carga y en el tamaño de poro. <sup>(33)</sup>

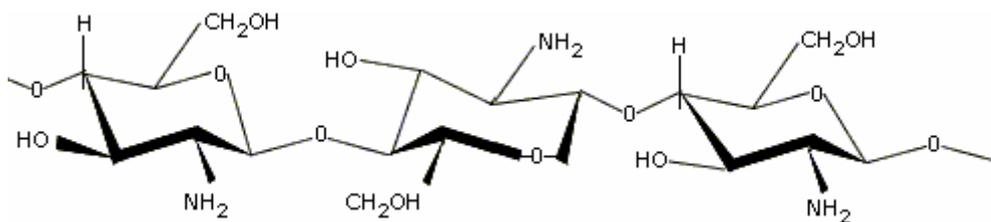
#### 4.4.5.2 Intercambiadores Iónicos Orgánicos

Las resinas para intercambio iónico orgánico se clasifican en:

- **Resinas orgánicas naturales**

Existen varios polímeros naturales que actúan como intercambiadores iónicos, como celulosa, ácido algínico, chitina, chitosan, dextrano y agarosa y también derivados de éstos.

Chitina y chitosan son dos polisacáridos naturales que han mostrado excelentes propiedades en la fijación de metales. La chitina es un polímero lineal de alto peso molecular de la N-acetil-D-glucosamina, que abunda en las paredes celulares de algunos hongos y en el caparazón de crustáceos como cangrejos, langostas y langostinos. El chitosan es un derivado de la chitina que se obtiene por hidrólisis de esta última, y consiste en uniones de D-glucosamina. La presencia de nitrógeno en su estructura hace que sean susceptibles de emplearse como polímeros quelatantes de metales. <sup>(33)</sup>



### Estructura del chitosan

El ácido algínico es un polisacárido lineal formado por dos monómeros, el ácido D-manurónico y el ácido L-gulurónico. Es un componente del esqueleto de las algas pardas, de donde se aísla. Debido a esta función de soporte, el ácido algínico destaca por ser un polímero fuerte y a la vez flexible, propiedad que ha determinado sus aplicaciones industriales.

El ácido algínico puede ser soluble o insoluble en agua dependiendo del catión al cual se asocia su sal. Las sales sódicas, amónicas o de otros metales alcalinos son solubles, mientras que las sales de metales polivalentes, como calcio, son insolubles, con la excepción del magnesio. Los cationes polivalentes se unen al polímero allí donde encuentran dos residuos de ácido gulurónico cercanos, por lo que se considera que estos cationes son los responsables del entrecruzamiento de la cadena polimérica. Esta afinidad por los cationes polivalentes unida a la insolubilidad del polímero resultante, indican su posible aplicabilidad como extractante de metales.

Los polisacáridos dextrano y celulosa son polímeros de D-glucosa, (1-6)-glucosa y b(1-4)-glucosa respectivamente. La agarosa es un polisacárido preferentemente neutro y es el componente que determina el poder gelificante del agar. Consiste en cadenas alternadas de D-galactosa-3,6-3,6-anhidro-L-galactosa.

La celulosa natural tiene propiedades intercambiadoras debido al pequeño número de grupos carboxilo que contiene su estructura. Se emplea como estructura base para, mediante derivatización, dar lugar a intercambiadores catiónicos, como la carboximetilcelulosa, o aniónicos, como la dietilaminoetil (DEAE) celulosa.

El dextrano se hace reaccionar con epíclorhidrina que actúa entrecruzando las cadenas para dar polímeros de estructura tridimensional.

Los tres son matrices comunes empleadas en cromatografía de intercambio iónico y en la separación de proteínas ya que al tener poros de gran tamaño permiten la separación de biomoléculas cargadas. <sup>(33)</sup>

- **Resinas orgánicas sintéticas**

Las resinas sintéticas de intercambio iónico consisten en una matriz polimérica reticulada por la acción de un agente entrecruzante y derivatizada con grupos inorgánicos que actúan como grupos funcionales. Son los materiales más habituales en las aplicaciones de intercambio iónico en la industria.

Como ya hemos mencionado, el desarrollo de las resinas sintéticas comenzó con la síntesis de las mismas mediante polimerización por condensación (fenol-formaldehído, epíclorhidrina-amina) y, posteriormente, se sintetizaron mediante polimerización por adición. La mayoría de las resinas comerciales están basadas en la estructura estireno-divinilbenceno, debido a su buena resistencia química y bacteriana a su estabilidad en todo el rango de pH y a la temperatura. También se emplean matrices poliméricas basadas en el ácido acrílico o metacrílico.

En el proceso de fabricación de la matriz polimérica, estireno y divinilbenceno, que son insolubles en agua, se mezclan mediante un agitador a una velocidad que rompe la mezcla en pequeñas esferas. Estas esferas a medida que transcurre la reacción se endurecen formando perlas esféricas, que es la forma en la que se suelen presentar estas resinas. En este punto, el copolímero no está funcionalizado.

El entrecruzamiento confiere a la resina estabilidad y resistencia mecánica, así como insolubilidad. El grado de entrecruzamiento es un factor importante de controlar ya que no sólo determina las propiedades mecánicas de la resina, sino también su capacidad de hincharse (swelling) y de absorber agua.

El hinchado del polímero se produce cuando el disolvente penetra en los poros de la estructura polimérica, ensanchándolos y abriendo, por tanto, la estructura. A simple vista, se observa un aumento en el volumen que ocupa la resina. El proceso de **swelling** (Proceso mediante el cual las resinas y geles incrementan su volumen por sus solventes ambientales. Los solventes entran a la resina de intercambio iónico para diluir los iones), favorece la permeabilidad de iones en la matriz de la resina y mejora la accesibilidad a los grupos funcionales. Como inconveniente, el aumento de tamaño de la resina puede dar problemas de exceso de presión si la resina está empaquetada en una columna y también, que la resina sufra procesos de hinchado y desinchado puede, con el tiempo, afectar a la estabilidad mecánica del polímero.<sup>(33)</sup>

Hay dos formas de obtener una resina de intercambio iónico funcionalizada:

1. Incorporar el grupo funcional durante la polimerización, por ejemplo empleando monómeros ya funcionalizados.
2. Primero se lleva a cabo el proceso de polimerización y después de introducen los grupos funcionales sobre la matriz polimérica mediante las reacciones químicas oportunas, como sulfonación o cloración-aminación.

A pesar de que con el primer proceso se obtiene resinas más homogéneas, las limitaciones que provoca el entrecruzamiento hacen que el proceso más utilizado sea el segundo.

Sobre los polímeros ya funcionalizados pueden realizarse otras reacciones químicas para llevar a cabo su derivatización y obtener resinas con grupos funcionales más específicos que permitan aplicaciones más concretas.<sup>(33)</sup>

Las resinas pueden clasificarse en función de:

- Estructura de la red polimérica
- Tipo de grupo funcional

### **Tipos de resinas de intercambio iónico según su estructura de red**

- Tipo gel: También conocidas como resinas microporosas ya que presentan tamaños de poro relativamente pequeños. En estas resinas el fenómeno swelling es muy importante, ya que se hinchan en mayor o menor medida en función del porcentaje de agente entrecruzante empleado durante la polimerización y del disolvente en el que se encuentre la resina.

Por ejemplo, una resina con baja proporción de divinilbenceno se hinchará mucho en disolución acuosa, abriendo ampliamente su estructura, lo cual permitirá la difusión de iones de gran tamaño.

- Resinas macroporosas: También llamadas macroreticulares. Durante la síntesis de estas resinas a partir de sus monómeros, se utiliza un co-solvente que actúa interponiéndose entre las cadenas poliméricas creando grandes superficies internas. Este disolvente se elimina una vez formada la estructura rígida del polímero. Las perlas tienen una relación área/volumen mayor que las resinas tipo gel, y por tanto, mayor capacidad de intercambio. La estructura macroreticular favorece la difusión de los iones, mejorando por tanto la cinética de intercambio.
- Resinas isoporosas: Se caracterizan por tener un tamaño de poro uniforme, con lo que aumenta la permeabilidad de los iones en el interior de la red. Son resinas de alta capacidad, regeneración eficiente y de coste más bajo que las resinas macroporosas.<sup>(33)</sup>

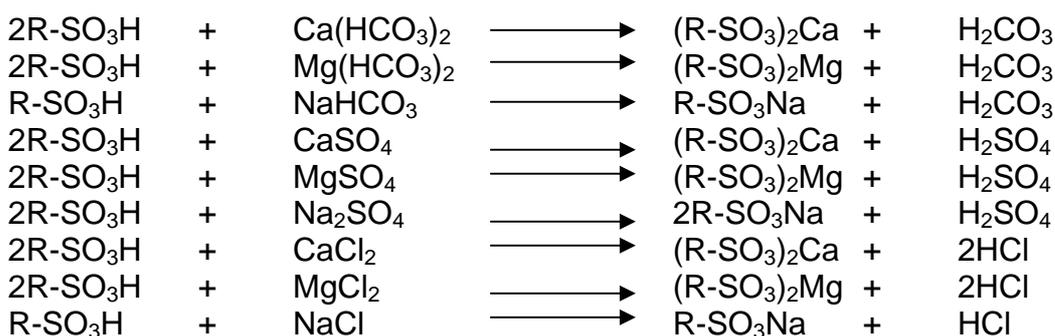
### **Tipos de resinas de intercambio iónico según el grupo funcional**

- Resinas catiónicas de ácido fuerte: Se producen por sulfonación del polímero con ácido sulfúrico. El grupo funcional es el ácido sulfónico, -SO<sub>3</sub>H
- Resinas catiónicas de ácido débil: El grupo funcional es un ácido carboxílico -COOH, presente en uno de los componentes del copolímero, principalmente el ácido acrílico o metacrílico.
- Resinas aniónicas de base fuerte: Se obtienen a partir de la reacción de copolímeros de estireno-divinilbenceno clorometilados con aminas terciarias. El grupo funcional es una sal de amonio cuaternario, R<sub>4</sub>N<sup>+</sup>.

- Resinas aniónicas de base débil: Resinas funcionalizadas con grupos de amina primaria, -NH<sub>2</sub>, secundaria, -NHR, y terciaria, -NR<sub>2</sub>. Suelen aplicarse a la adsorción de ácidos fuertes con buena capacidad, pero su cinética es lenta.
- Resinas quelatantes: En estas resinas el grupo funcional tiene las propiedades de un reactivo específico, ya que forman quelatos selectivamente con algunos iones metálicos. Los átomos más frecuentes son azufre, nitrógeno, oxígeno y fósforo, que forman enlaces de coordinación con los metales. Sus ventajas sobre las demás es la selectividad que muestran hacia metales de transición y que el carácter de ácido débil del grupo funcional facilita la regeneración de la resina con un ácido mineral. No obstante son poco utilizadas en la industria por ser más caras que las anteriores y por tener una cinética de absorción más lenta. La resina quelatante más conocida tiene como grupo funcional el ácido iminodiacético.<sup>(33)</sup>

### Reacciones Químicas en el Intercambio de Cationes

Las reacciones químicas encontradas en el intercambio de cationes pueden expresarse genéricamente de la siguiente forma:



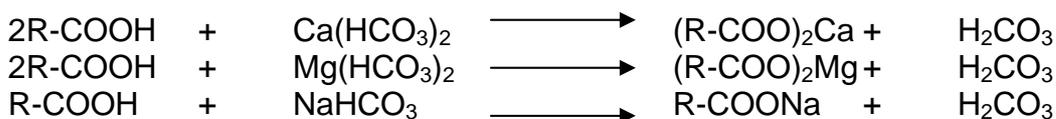
Y así sucesivamente para todas las posibles sales como fosfatos, nitratos, etc. Donde "R" se considera como el grupo orgánico correspondiente a la molécula del polímetro en la región del grupo iónico.

A partir de las reacciones de la resina con los iones ligados a la alcalinidad se produce una segunda reacción correspondiente a la ionización del ácido carbónico de acuerdo a lo siguiente:



Debe recordarse que el CO<sub>2</sub> constituye una carga importante para la resina aniónica fuerte en las instalaciones de tratamiento de agua y en consecuencia, merced a la conversión de toda la alcalinidad en CO<sub>2</sub>, es común eliminar el CO<sub>2</sub> antes de su entrada a la unidad aniónica. Para esto se emplea un agotador de tiro forzado con aire atmosférico, que constituye un método más económico que la instalación de un volumen adicional de resina aniónica.

Las reacciones involucradas en el intercambio con resinas débilmente ácidas, se llevan a cabo exclusivamente con la alcalinidad de acuerdo a lo siguiente:

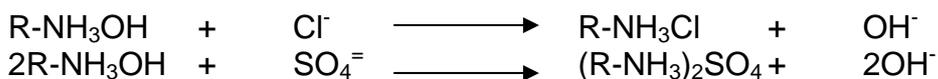


Se presentara igualmente la conversión de toda la alcalinidad en CO<sub>2</sub>.

### Reacciones químicas en el intercambio de aniones

Para analizar estas reacciones en el ámbito de tratamiento de agua por desmineralización debe recordarse que todos los aniones se presentan en la forma de sus ácidos correspondientes ya que el agua de alimentación proviene de un intercambio catiónico que ha removido los cationes originalmente ligados a estos aniones y los ha sustituido con iones hidrogeno.

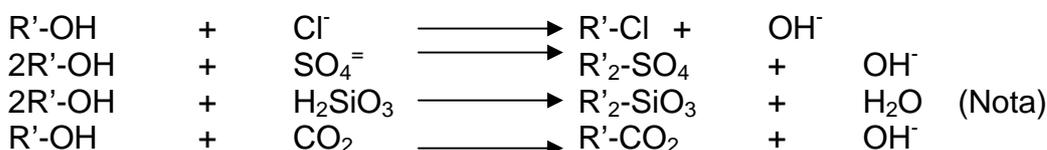
Para las resinas aniónicas débilmente básicas, y como se explico anteriormente, la resina se encontrara en su forma hidróxido (R-NH<sub>3</sub>OH). Estas resinas reaccionan únicamente con los ácidos fuertes como los sulfatos, cloruros y nitratos de acuerdo a las siguientes reacciones:



Y los iones oxidrilo que reaccionan con los iones hidrogeno ligados con los aniones de acuerdo a:



Para las resinas aniónicas fuertes el grupo iónico es un grupo cuaternario de amonio R<sub>4</sub>NOH que se representa como R'-OH. Las reacciones de estas resinas si suceden con todos los aniones existentes, aun el ácido carbónico H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> y el ácido metasilicico (H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>), de acuerdo a las siguientes reacciones:



Nota: estas reacciones, como aquellas correspondientes al ácido bórico, se indican específicamente con el ácido no disociado para indicar explícitamente que la resina interviene en la disociación de la molécula. <sup>(15)</sup>

#### 4.4.5.3 La Materia Orgánica y su Influencia en las Resinas

La materia Orgánica puede presentar efectos diversos y nocivos en los sistemas y equipos de una instalación industrial, son tan variados como la formación de películas y crecimientos bacterianos, obstrucción del proceso o corrosión. La materia Orgánica toma un papel importante en los sistemas de desmineralización, específicamente sobre las características operativas de vida útil y de capacidad de las resinas aniónicas.

La Materia Orgánica la podemos clasificar en insoluble y soluble, algunos ejemplos de Materia Orgánica insoluble son: escombros de uso vegetal y mineral, microorganismos, materia aceitosa, materia húmica, etc.

Algunos ejemplos de materia orgánica insoluble pueden ser: materia húmica, proteínas, aminoácidos, azúcares, sacáridos, compuestos orgánicos sintéticos, gases orgánicos disueltos, extractos solubles de origen animal o vegetal, etc.

El término de ácido húmico generalmente se refiere a la fracción de materia Orgánica de tierras que son solubles en soluciones alcalinas pero insolubles en soluciones ácidas o alcohol etílico.

Algunas aguas contienen materia orgánica en alto nivel que la concentración orgánica se aproxima o excede la concentración de los compuestos inorgánicos. En general, aunque las aguas contengan bajo contenido de materia orgánica, usualmente las superficiales contienen una mayor cantidad.

También la sílice es considerada como un problema en el tratamiento de aguas como lo es la materia orgánica la cual no entra en el balance requerido por la ley de electroneutralidad, sin embargo, mucha materia orgánica es un iónico débil natural, y debería entrar en el balance de anion/catión cuando este presente en grandes cantidades.

Hay muchas instancias en donde la acumulación de materia orgánica en las resinas de intercambio iónico ha interferido la eficiencia de estas resinas utilizadas para la remoción de aniones inorgánicos.

Los métodos para remover la materia orgánica del agua son altamente variados y abarcan casi todas las prácticas para tratamiento de agua, incluyendo clarificación, intercambio iónico, tratamiento con carbón, absorbentes polimérico, procesos de membrana y destilación. Otro de los problemas ocasionados por la materia orgánica es por ejemplo cuando los sistemas contienen resinas de intercambio, estas resinas son más eficientes cuando se remueve la capa de materia orgánica que envuelve a las resinas.

Estos problemas limitan el uso y la vida de las resinas de intercambio iónico, reduciendo sobre toso su efectividad. <sup>(15)</sup>

#### **4.5 Clasificación General de los Procesos de Desmineralización por Intercambio Iónico**

Los procesos de desmineralización por intercambio iónico se clasifican en forma básica de acuerdo a las características del flujo, la ubicación de los diferentes tipos de resinas y el tipo de sistema de regeneración empleado. En la figura (4.5.1) se indica una clasificación general de los sistemas posibles y en los cuales podrá identificarse cualquier proceso comercial.

La clasificación primaria consiste esencialmente en la diferenciación del tipo de contacto entre el fluido y el material de intercambio iónico, catalogados por procesos de lecho fijo y lecho compactado.

Los procesos de lecho fijo simple consisten esencialmente en aquellos en que a pesar de que la resina es efectivamente confinada en el interior de un recipiente, el volumen total de la cámara es superior al volumen de la resina instalada y en consecuencia, esta última puede expandirse libremente hasta cierto límite durante las operaciones de limpieza y regeneración.

Los procesos de lecho compactado también son conocidos como de bloqueo mecánico; La diferencia específica con los procesos de lecho simple es que el volumen de la cámara de confinamiento es estrictamente aquel correspondiente a la cantidad de resina instalada bajo las condiciones de hinchamiento máximo de la misma. En consecuencia, este tipo de sistemas no posee el volumen necesario para expansión del lecho. <sup>(15)</sup>

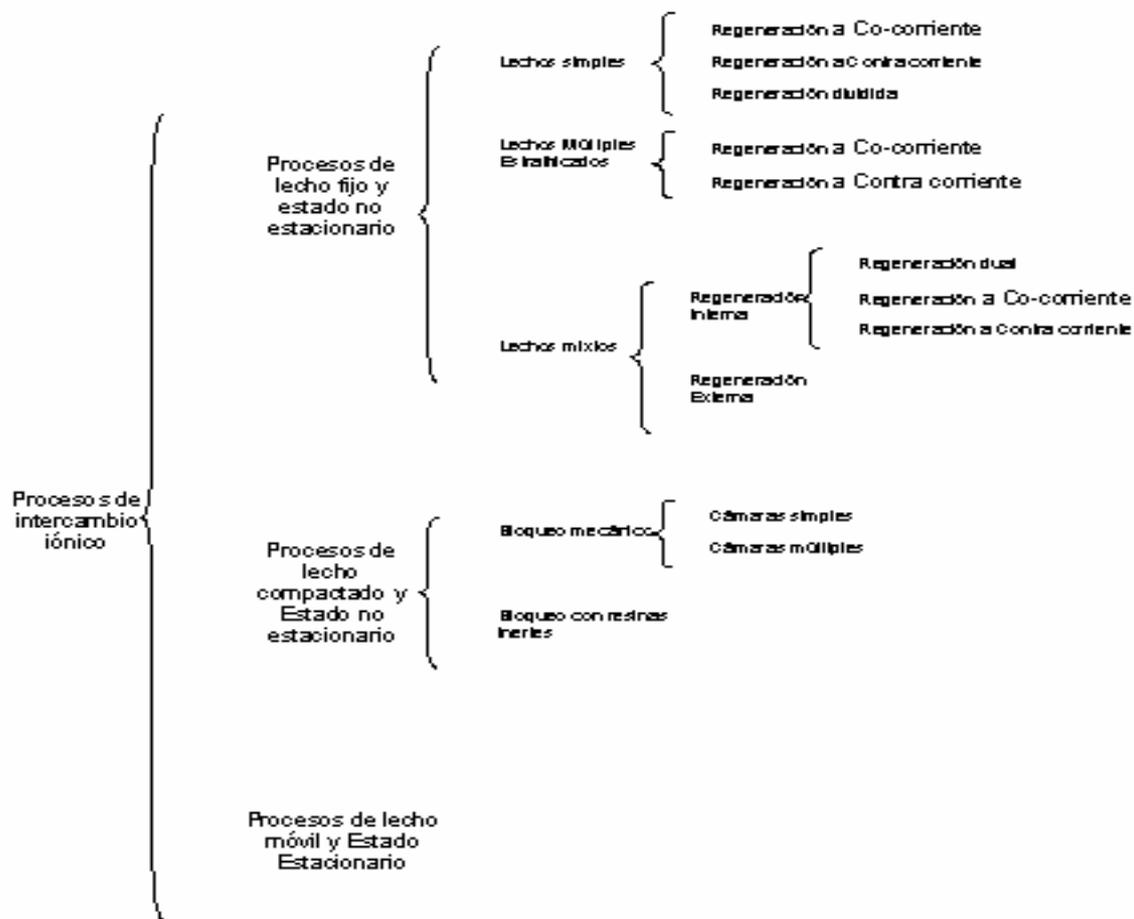


Figura (4.5.1) Clasificación general de los procesos de Intercambio Iónico

FUENTE: (15)

#### 4.5.1 Procesos del Lecho Fijo y Estado no Estacionario

Estos procesos consisten esencialmente en el contacto del fluido a tratar un hecho inmóvil de una resina de intercambio iónico que se encuentra alojada en un espacio confinado de un recipiente. Para estos procesos el volumen de la cámara de contacto corresponde al volumen de la resina instalada en su forma hinchada más un volumen adicional necesario para permitir la expansión hidráulica del hecho durante la regeneración.

El hecho puede estar constituido por un solo tipo de resina en lo que se conoce como lechos simples, esta formado por una combinación de resina débil y resina fuerte en lo que se conoce como lechos múltiples estratificados o contener una mezcla de una resina catiónica y una resina aniónica en lo que se identifica como lecho mixto o mezclado.

En el caso de los lechos múltiples estratificados, ambas resinas están separadas, o estratificadas, o consecuencia de la diferencia de densidad de estas, no existiendo una barrera física que la separe <sup>(15)</sup>

#### 4.5.1.1 Lechos Simples

Este es el caso más sencillo que puede encontrarse. Cada recipiente de intercambio contendrá un solo tipo de resina, ya sea catiónica o aniónica, débil o fuerte, según la combinación de contactos que en serie que constituyan el proceso.

Pueden ser regenerados a co-corriente cuando el sentido de regeneración es el mismo sentido empleado durante la fase de agotamiento del lecho. A contra corriente cuando el sentido de regeneración es contrario al sentido de agotamiento o de regeneración dividida cuando el regenerante se inyecta durante el sentido del agotamiento como en sentido contrario.

La cámara de contacto o se un volumen igual al volumen máximo de la resina mas un volumen libre para expansión del lecho y que en la generalidad de los casos debe ser de un 75% para resinas catiónicas, de un 100% para resinas aniónicas y de un 100% para lechos mezclados.

En la totalidad de los casos el sentido del flujo durante la fase de agotamiento es descendente ya que, debido al volumen libre disponible, el empleo de flujo ascendente implica los siguientes problemas:

- a) Independientemente de tratamiento previo empleado, el agua normalmente contiene cantidades muy pequeñas de sólidos suspendidos. Los sólidos suspendidos quedan atrapadas en la primera parte del lecho de intercambio por lo cual, al emplear flujo ascendente, se depositaran en el fondo de la cama de resina y será muy difícil llevar a cabo la limpieza del lecho por métodos hidráulicas a menos que, como sucede en los sistemas empacados, o de bloqueo mecánico, exista un recipiente externo de lavado que permita una limpieza mas enérgica de la resina.
- b) Debido a que el porcentaje de volumen libre es muy importante respecto al volumen de resinas, existe un riesgo muy alto de que el lecho sufra una expansión muy grande. Las consecuencias de esto puede consistir en la formulación de canales preferenciales, turbulencias y mezclado del lecho. El mezclado puede tener como resultado que se altera la forma del perfil de composiciones del lecho y se pierda el comportamiento de la onda de adsorción. La unica opción es trabajar a velocidades lineales muy altas y esto requiere sistemas de control especiales.
- c) Otro efecto de expansión del lecho es que se reducen notoriamente la eficiencia de contacto y la calidad de agua tratada se deteriora. <sup>(15)</sup>

#### **4.5.1.2 Lechos múltiples estratificados**

Los lechos múltiples son aquellos en que un recipiente contiene tanto una resina débil como una resina fuerte en lugar de que estas se encuentren en recipientes separados. Las ventajas evidentes de este tipo de equipo consisten en que, el mismo arreglo secuencial de proceso, la cantidad de recipiente se reduce y los costos de inversión son menores al igual que los requisitos de superficie. No obstante, este tipo de aplicación esta limitado por la altura del lecho y en que en algunas circunstancias, para casos de agua con alta salinidad, puedan requerir alturas de lecho muy grandes con el problema de que los recipientes deben ser muy altos la caída de presión muy elevada para un solo equipo. El resultado directo de esto es la existencia de problemas de distribución.

En términos generales la profundidad máxima de resina debe ser de 3 metros para evitar problemas de canalización del lecho.

Ambos tipos de resinas (débiles y fuertes) poseen características de densidad muy diferentes por lo cual no se mezclan con facilidad y en tal caso se estratificara rápidamente por lo cual este tipo de unidades se conocen genéricamente como unidades estratificadas.

Las resinas empleadas son idénticas en formulación a las utilizadas en lechos sencillos, con la salvedad de que deben emplearse productos con coeficientes de unidad mayores para reducir el mezclado en la interfase. La regeneración puede ser a co-corriente o a contraflujo, no obstante la regeneración a contra flujo es preferida especialmente para las unidades aniónicas estratificadas debido al efecto de la contaminación por parte de la materia orgánica. <sup>(15)</sup>

#### **4.5.1.3 Lechos mixtos**

El termino lecho mixto se refiere a la utilización de una resina catiónica fuerte y una resina aniónica fuerte físicamente mezclados en un solo recipiente de intercambio iónico. En la aplicación de esta combinación es de uso exclusivo de los procesos de pulido de agua desmineralizada proveniente de un tren primario.

Teóricamente hablando, la combinación de resinas funciona como lo haría un conjunto infinito de contactos catiónicos y aniónicos en serie, por lo cual la calidad encontrada en el agua tratada es muy superior para la mayoría de los casos de desmineralización completa con trenes primarios.

No obstante, los lechos mezclados siguen siendo una opción confiable para garantizar una alta calidad de agua tratada y especialmente en aplicaciones de generación de potencia y en la industria de microcircuitos. <sup>(15)</sup>

#### 4.6 El Estado del Arte en Tratamiento de Aguas Residuales

Ha habido varios nuevos progresos en el campo del tratamiento de aguas en los años pasados. Las alternativas se han presentado para los sistemas de tratamiento de aguas clásicos y convencionales. Para los sistemas de filtración tales como filtración y desinfección de la arena con cloro muchas nuevas soluciones existen.

¿Qué nuevas tecnologías del tratamiento de aguas son interesantes para las aplicaciones industriales?

- Tratamiento de aguas de pozo o tratamiento de aguas superficiales como una alternativa de las aguas mayores.
- La refrigeración con las torres de refrigeración en vez de con el agua subterránea.
- Preinstalación de los sistemas de baja presión de la ósmosis inversa antes de los cambiadores del ion para el agua de alimentación de la caldera.
- Desinfección con UV-desinfectadores en vez de la desinfección con cloro.
- LEL (limpieza en el lugar) con dióxido de la cloro
- Sustituir sistemas de alta presión de la membrana por los sistemas de presión baja.
- Aplicación de sistemas de ultrafiltración en vez de los filtros de arena
- La reutilización del agua residual en la industria (el agua se recicla).
- Biorreactores compactos de membrana para la purificación biológica.
- Tratamiento del agua residual por un tratamiento no biológico por oxidación catalítica por aire húmedo

Tratamiento con ozono del agua de refrigeración en vez de con dosificación química de biocidas. <sup>(15)</sup>

# **Capítulo 5**

## **Costos del Agua**

## 5.1 Problemática de los precios y subsidios

El suministro de agua potable está altamente subsidiado, las tarifas no cubren más del 30 por ciento de su precio convencional. Si agregamos a este valor los costos ecológicos, servicios y funciones que prestan los bienes ambientales y la naturaleza, su imputación nos colocaría en el umbral de una verdadera catástrofe económica y financiera.

Lo que se paga por el agua no cubre el costo de la tasa marginal de recuperación del bien, tampoco el costo de su suministro (incluyendo la extracción y transportación) y mucho menos la provisión en proyectos de desarrollo y crecimiento del recurso. La ONU considera que se debe mirar en la perspectiva de 30 años (una generación) e iniciar ya proyectos de desarrollo de recursos hídricos "puesto que suele necesitarse por lo menos un decenio para ejecutar los aún más modestos proyectos".<sup>(34)</sup>

## 5.2 Tarifas del Agua en México

Durante mucho tiempo de nuestro país, el sector industrial no pago por usar o aprovechar el agua como insumo de los procesos de producción. No es sino hasta mediados de los años 80 que comenzó a cobrarse el derecho por el uso o aprovechamiento de aguas nacionales.

Sin embargo, el precio del agua al igual que el de otros bienes producidos o administrados por el sector público no reflejaba una correcta valuación social del bien, en este contexto las autoridades del sector hidráulico concibieron el precio del agua como un instrumento que permitiera cumplir con los dos objetivos:

1. Reducir el déficit presupuestario del sector, a través del incremento de la recaudación por concepto del pago de derecho por uso o aprovechamiento de aguas nacionales.
2. Impedir el agotamiento de los mantos acuíferos, al moderar el consumo del agua.

A partir de 1998, empezaron a producirse continuos incrementos, con lo cual se observo un aumento directamente proporcional en momentos de la recaudación, cumpliéndose a tiempo las metas programadas en cada año y resolviéndose a favor del déficit financiero inicial<sup>(15)</sup>.

Sin embargo, esta situación duro poco tiempo, pues en la década de los 90, no obstante que se produjo un aumento sustancial en las tarifas del agua llegando hacer en algunos casos hasta del 1300% en términos nominales, la recaudación no aumento proporcionalmente e incluso disminuyo en términos generales. La tendencia decreciente en la recaudación ha provocado la aparición de déficit financiero del sector hidráulico.

El precio del agua puede funcionar como un instrumento efectivo para reducir la demanda de agua como insumo industrial. Sin embargo tal vez por que la participación del costo de agua, en los costos totales de producción en las empresas resulta muy baja, casi no existen estudios sobre la demanda del agua en la industria. <sup>(15)</sup>

Urge establecer una política tarifaria que permita, en primer lugar captar una mayor cantidad de recursos financieros para enfrentar el programa de ampliación de coberturas y rehabilitar la infraestructura hidráulica marginal de costos, en la que el usuario que más agua utilice pague mas y que ayude a cubrir los aspectos sociales involucrados en los servicios del agua Cada municipio puede establecer sus propias tarifas por los servicios.

Después de las ciudades turísticas, son las ciudades fronterizas la que tiene el precio unitario promedio más alto y le siguen en orden las ciudades industriales. Cuando se incrementa el precio del agua Tanto para uso domestico e industrial siempre es mayor de tres a cuatro veces más en las grandes urbes. <sup>(15)</sup>

El reciclaje de agua proporciona beneficios económicos casi para cualquier empresa. En general, el promedio de costos de operación de una planta de tratamiento de aguas residuales, de tipo biológica o fisicoquímica, está en un rango aproximado de 0.70 a 4.50 pesos por m<sup>3</sup> de agua residual tratada, con un promedio general de 2.50 pesos por m<sup>3</sup>, en dependencia del grado de sofisticación del proceso de tratamiento, así como del flujo y de las características del agua a tratar.

Por ejemplo, los costos anteriores se pueden comparar con las tarifas de agua potable para usuarios industriales, que rigen actualmente en las que el precio por m<sup>3</sup> es de 5.122 pesos para usuarios que consumen entre 50 y 99 m<sup>3</sup> mensuales, con una cuota por m<sup>3</sup> excedente de 7.814 pesos; para usuarios que consumen más de 200 m<sup>3</sup> mensuales la tarifa llega hasta 10.159 pesos por m<sup>3</sup>, sin recargos por m<sup>3</sup> adicional consumido. A los costos anteriores hay que agregarles 25% por concepto de drenaje y el factor inflacionario, los cuales se cargan en el recibo de consumo. <sup>(35)</sup>

Los derechos por recolectar y usar el agua, depende del tipo de uso y la escasez del recurso en la localidad. Con este propósito la legislación creó nueve zonas de disponibilidad, cada una con tarifas diferentes que se actualizan anualmente en la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua.

Existen cerca de 16,000 usuarios que descargan en aguas federales son tanto de origen municipal como industrial, agrícola y de servicios. Al sector industrial se le cobra el agua por metro cúbico mientras que a los operadores de servicios de agua destinada a consumo doméstico se les aplican las mismas tarifas pero por cada mil metros cúbicos, es decir, se les cobra mil veces menos como se muestra en la tabla 5.2.1 <sup>(35)</sup>

**Tabla 5.2.1 Ley Federal de Derechos de Agua  
cuotas (pesos/m<sup>3</sup>)**

<b>Zonas de disponibilidad</b>	<b>Uso industrial*</b>	<b>Consumo doméstico**</b>	<b>Generación hidroeléctrica</b>	<b>Acuacultura</b>	<b>Balnearios y centros recreativos</b>
1	11.7683	0.0118	2.4660	1.9180	6.6856
2	9.4119	0.0094	2.4660	1.9180	6.6856
3	7.8501	0.0079	2.4660	1.9180	6.6856
4	6.4664	0.0065	2.4660	1.9180	6.6856
5	5.0964	0.0051	2.4660	1.9180	6.6856
6	4.6032	0.0046	2.4660	1.9180	6.6856
7	3.4661	0.0035	2.4660	0.9453	3.2880
8	1.2330	0.0012	2.4660	0.4384	1.5481
9	0.9179	0.0009	2.4660	0.2055	0.7261

Valores actualizados al 2005

**FUENTE:** (36)

### 5.3 Derechos por Descarga de Aguas Residuales

Para el cobro de derechos por descarga de agua residuales, los cuerpos receptores (ríos, lagos, lagunas, etc.) se clasifican en tres tipos: A, B y C. Los cuerpos receptores C son aquellos en los contaminantes tienen mayor afecto.

La lista de cuerpos receptores que perciben a cada tipo de cuerpo de receptor se encuentra en la Ley Federal de Derechos en materia de descarga, y en la tabla 5.3.1, se muestra la clasificación de los cuerpos de agua, receptores de las descargas de agua residuales en las aguas del valle de México y sistema Cutzamala.

**Tabla 5.3.1 Cuerpos receptores en el Valle de México**

<i>Cuerpo receptor</i>	<i>Distrito Federal</i>	<i>Estado de México</i>	<i>Hidalgo</i>
B	Riío Magdalena en delegación Magdalena Contreras		
C		Presa Madín en los municipios de Naucalpan de Juárez, Jilotzingo y Cuautitlan Izcalli	Presa Jaramillo y Bordo la Estancuela en el municipio de Pachuca de Soto

FUENTE: (10)

Las cuotas por derecho de descargas de aguas residuales municipales a los cuerpos de agua, son las mostradas en la tabla 5.3.2, en donde se puede observar que los costos de descarga varían según el tipo de contaminante contenido en el agua.

**Tabla 5.3.2 Cuotas por derecho de descarga de aguas residuales**

Contaminante	Tipo de cuerpo receptor	
	C	B
	pesos/m3 de agua residual	
Coliformes fecales	0.501	0.501
Potencial de hidrógeno (Ph)	0.04 a 1.39	0.04 a 1.40
	pesos/Kg. de contaminante	
Grasas y aceites	0 a 5.88	0 a 4.90
SST	0 a 5.88	0 a 4.90
DBO	0 a 5.88	0 a 4.90
Nitrógeno total	0 a 5.88	0 a 4.90
Fósforo total	0 a 5.88	0 a 4.90
Arsénico	0 a 200.91	1 a 200.91
Cadmio	0 a 200.91	1 a 200.91
Cianuros	0 a 200.91	1 a 200.91
Cobre	0 a 200.91	1 a 200.91
Cromo	0 a 200.91	1 a 200.91
Mercurio	0 a 200.91	1 a 200.91
Niquel	0 a 200.91	1 a 200.91
Plomo	0 a 200.91	1 a 200.91
Zinc	0 a 200.91	1 a 200.91

FUENTE: (10)

#### 5.4 Precios del Agua Municipal Tratada

Históricamente la primera aplicación de reuso de agua fue para riego que consumía mas de 65% del agua tratada, para esta aplicación solo es necesario el tratamiento primario, por lo cual el precio de esta agua municipal tratada es de \$0.10USD. Aunque podría considerarse que algunos municipios tuvieran la capacidad de ofrecer el efluente de un proceso secundario, cuyo precio podría ser hasta \$0.2USD <sup>(37)</sup>

En la tabla 5.4.1 se muestran los costos del tratamiento del agua residual municipal para los diferentes usos industriales, en donde podemos observar que el costo de tratamiento para uso en calderas es el más elevado. <sup>(23)</sup>

**Tabla 5.4.1 Costos del Tratamiento del Agua Residual Municipal para Diferentes Usos Industriales (Costos en pesos/m<sup>3</sup>)**

Industrial	Por uso	Enfriamiento	Nivel 1 (TPA)	1.08	
			Nivel 2 (TPA, AB)	1.56	
			Nivel 3 (TP, TS)	2.74	
			Nivel 4 (TP, TS, AB)	3.22	
		Calderas	Nivel 1 (TP, TS, AB, ABc)	3.46	
			Nivel 2 (TP, TS, Es, F, ApH, AAE)	6.44	
		Servicios	(TP, TS, D)	3.22	
		Lavado	Nivel 1 (TP)	0.24	
			Nivel 2 (TPA)	1.45	
Por giro		Cementera	Nivel 1 (DES)	0.13	
			Nivel 2 (TP)	0.24	
		Termoeléctrica	Nivel 1 (TPA, AB, D)	1.96	
			Nivel 2 (TP, TS, AB, D)	3.62	
		Metalúrgica básica	Nivel 1 (DES)	0.13	
			Nivel 2 (TPA, D)	1.45	
		Extracción	(TP)	0.24	
		Construcción	(TP)	0.24	
		Celulosa y papel	Nivel 1 (TP, TS, D)	3.22	
			Nivel 2 (TP, TS, D, CA)	3.86	
		Química y petroquímica (enfriamiento)	Nivel 1 (TP)	0.24	
			Nivel 2 (TPA)	1.08	
		Beneficio del café	Nivel 1 (TPA, DF)	1.56	
			Nivel 2 (TP, TS, D)	1.88	
		Industria azucarera	(TPA, D)	1.45	
* Índice de costo para 1993, correspondiente a la operación y mantenimiento de una planta de 1 m <sup>3</sup> /s					
AB	Ablandamiento	C2e	Clarificación en dos etapas	FMM	Filtración en medio mixto
ABc	Ablandamiento con cal	D	Desinfección	N-DN	Nitrificación-desnitrificación biológica
AAE	Adición de antiespuma	DES	Desarenación	OI	Ósmosis inversa
CA	Adsorción con carbón activado	DA	Desorción de amoníaco	TP	Tratamiento primario
ApH	Ajuste de pH	EBN	Eliminación biológica de nitrógeno	TPA	Tratamiento primario avanzado
CAR	Carbonatación	Es	Eliminación de sales	TS	Tratamiento secundario
Cs	Clarificación con sosa	F	Filtración		
C1e	Clarificación en una etapa	FA	Filtración en arena		

FUENTE: (23)

# **Capítulo 6**

## **Torres de Enfriamiento**

## 6.1 Clasificación de las Torres de Enfriamiento

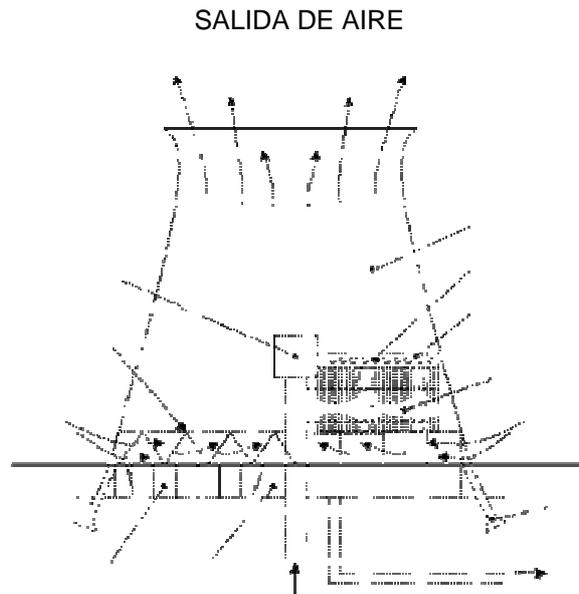
La forma más simple y usual de clasificar las torres de enfriamiento es según la forma en que se mueve el aire a través de éstas. Según este criterio, existen torres de circulación natural y torres de tiro mecánico. En las torres de circulación natural, el movimiento del aire sólo depende de las condiciones climáticas y ambientales. Las torres de tiro mecánico utilizan ventiladores para mover el aire a través del relleno. <sup>(38)</sup>

### 6.1.1 Torres de Circulación Natural

Se clasifican, a su vez, en torres atmosféricas y en torres de tiro natural.

Las torres atmosféricas utilizaban las corrientes de aire de la atmósfera. El aire se mueve de forma horizontal y el agua cae verticalmente (flujo cruzado). Son torres de gran altura y pequeña sección transversal. Deben instalarse en lugares muy despejados, de forma que ningún obstáculo pueda impedir la libre circulación de aire a través de la torre. Tienen un costo inicial alto debido a su gran tamaño, pero el costo de mantenimiento es reducido, al no existir partes mecánicas móviles. Una torre de este tipo puede ser una solución muy económica para determinadas necesidades de refrigeración si se puede garantizar que funcionará habitualmente expuesta a vientos de velocidades iguales o superiores a los 8 Km/h. Si la velocidad promedio del viento es baja, los costos fijos y de bombeo aumentan mucho en relación a una torre de tiro mecánico y no compensan el ahorro del costo de ventilación. Actualmente, las torres atmosféricas están en desuso.

Una torre de tiro natural es aquella en la que el aire es inducido por una gran chimenea situada sobre el relleno (Fig 6.1.1.1). La diferencia de densidades entre el aire húmedo caliente y el aire atmosférico es el principal motivo por el cual se crea el tiro de aire a través de la torre. La diferencia de velocidades entre el viento circulante a nivel del suelo y el viento que circula por la parte superior de la chimenea también ayuda a establecer el flujo de aire. Por ambos motivos, las torres de tiro natural han de ser altas y, además, deben tener una sección transversal grande para facilitar el movimiento del aire ascendente. Estas torres tienen bajos costos de mantenimiento y son muy indicadas para enfriar grandes caudales de agua. Al igual que las torres atmosféricas, no tienen partes mecánicas. La velocidad media del aire a través de la torre suele estar comprendida entre 1 y 2 m/s. Las torres de tiro natural no son adecuadas cuando la temperatura seca del aire es elevada, ya que ésta debe ser siempre inferior a la del agua caliente. No es posible conseguir un valor de acercamiento pequeño y es muy difícil controlar exactamente la temperatura del agua. En las torres de tiro -natural no se pueden utilizar rellenos de gran compacidad, debido a que la resistencia al flujo de aire debe ser lo más pequeña posible. Estas torres son muy utilizadas en centrales térmicas; muy pocas veces son aplicables a plantas industriales debido a la fuerte inversión inicial necesaria. <sup>(38)</sup>

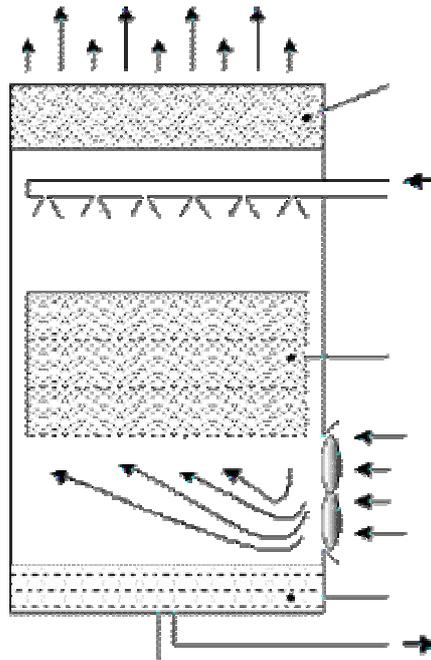


**Fig 6.1.1.1 Esquema de una torre de tiro natural.**

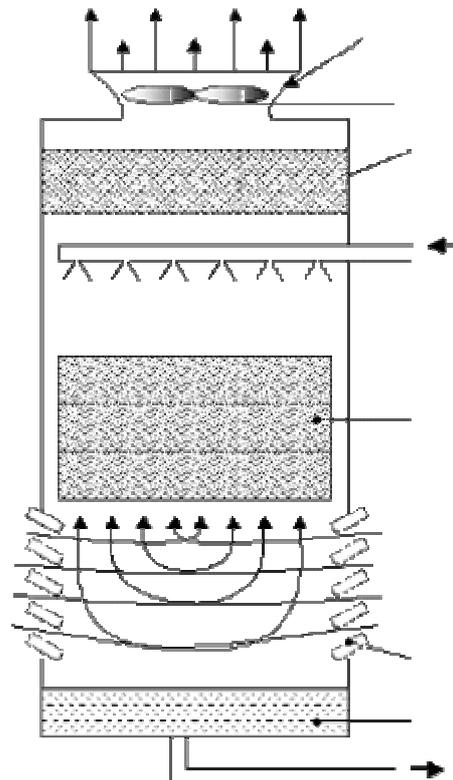
### **6.1.2 Torres de Tiro Mecánico**

Las torres de tiro mecánico proporcionan un control total sobre el caudal de aire suministrado. Se trata de torres compactas, con una sección transversal y una altura de bombeo pequeñas en comparación con las torres de tiro natural. En estas torres se puede controlar de forma precisa la temperatura del agua de salida, y se pueden lograr valores de acercamiento muy pequeños (hasta de 1 o 2 °C, aunque en la práctica acostumbra a ser de 3 o 4 °C). Si el ventilador se encuentra situado en la entrada de aire, el tiro es forzado. Cuando el ventilador se ubica en la zona de descarga del aire, se habla de tiro inducido.

En las torres de tiro forzado el aire se descarga a baja velocidad por la parte superior de la torre (Fig. 6.1.2.1). Estas torres son, casi siempre, de flujo a contracorriente. Son más eficientes que las torres de tiro inducido, puesto que la presión dinámica convertida a estática realiza un trabajo útil. El aire que se mueve es aire frío de mayor densidad que en el caso de tiro inducido. Esto también significa que el equipo mecánico tendrá una duración mayor que en el caso de tiro inducido, ya que el ventilador trabaja con aire frío y no saturado, menos corrosivo que el aire caliente y saturado de la salida, Como inconveniente debe mencionarse la posibilidad de que exista recirculación del aire de salida hacia la zona de baja presión, creada por el ventilador en la entrada de aire<sup>(38)</sup>



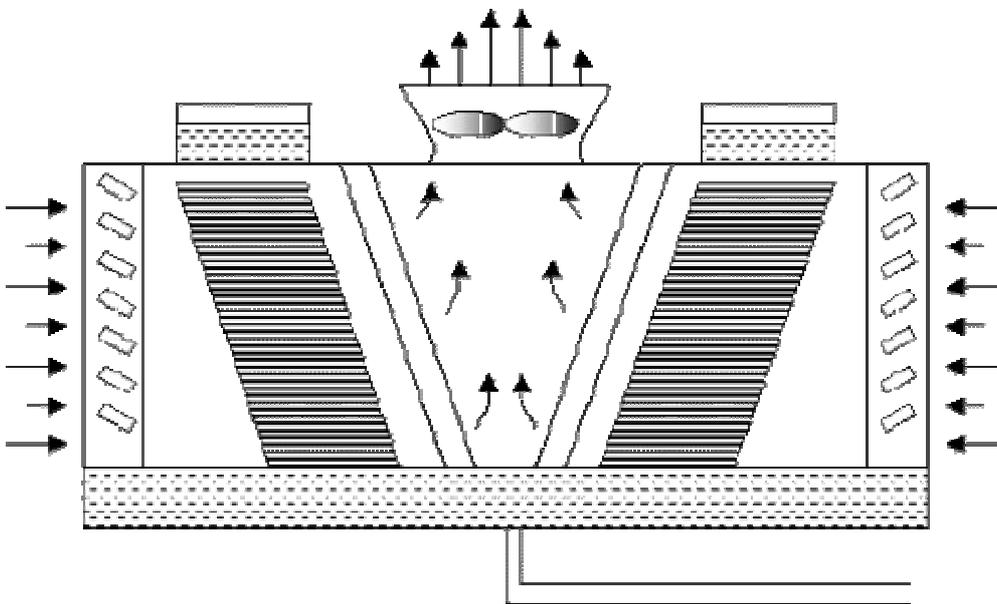
**Fig. 6.1.2.1 Torre de tiro forzado**



**Figura 6.1.2.2 Torre de flujo a contracorriente y tiro inducido.**

Las torres de tiro inducido pueden ser de flujo a contracorriente o de flujo cruzado. El flujo a contracorriente significa que el aire se mueve verticalmente a través del relleno, de manera que los flujos de agua y de aire tienen la misma dirección pero sentido opuesto (Fig 6.1.2.2). La ventaja que tienen este tipo de torres es que el agua más fría se pone en contacto con el aire más seco, lográndose un máximo rendimiento. En éstas, el aire puede entrar a través de una o más paredes de la torre, con lo cual se consigue reducir en gran medida la altura de la entrada de aire. Además, la elevada velocidad con la que entra el aire hace que exista el riesgo de arrastre de suciedad y cuerpos extraños dentro de la torre. La resistencia del aire que asciende contra el agua que cae se traduce en una gran pérdida de presión estática y en un aumento de la potencia de ventilación en comparación con las torres de flujo cruzado.

En las torres de flujo cruzado, el aire circula en dirección perpendicular respecto al agua que desciende (Fig 6.1.2.3). Estas torres tienen una altura menor que las torres de flujo a contracorriente, ya que la altura total de la torre es prácticamente igual a la del relleno. El mantenimiento de estas torres es menos complicado que en el caso de las torres a contracorriente, debido a la facilidad con la que se pueden inspeccionar los distintos componentes internos de la torre. La principal desventaja de estas torres es que no son recomendables para aquellos casos en los que se requiera un gran salto térmico y un valor de acercamiento pequeño, puesto que ello significará más superficie transversal y más potencia de ventilación, que en el caso de una torre de flujo a contracorriente. <sup>(38)</sup>



**Fig 6.1.2.3 Torre de flujo cruzado (tiro inducido)**

## 6.2 Funcionamiento de las Torres de Enfriamiento

En las torres de enfriamiento se consigue disminuir la temperatura del agua caliente que proviene de un circuito de refrigeración mediante la transferencia de calor y materia al aire que circula por el interior de la torre. A fin de mejorar el contacto aire-agua, se utiliza un entramado denominado "relleno". El agua entra en la torre por la parte superior y se distribuye uniformemente sobre el relleno utilizando pulverizadores. De esta forma, se consigue un contacto óptimo entre el agua y el aire atmosférico.

El relleno sirve para aumentar el tiempo y la superficie de intercambio entre el agua y el aire. Una vez establecido el contacto entre el agua y el aire, tiene lugar una cesión de calor del agua hacia el aire. Ésta se produce debido a dos mecanismos: la transmisión de calor por convección y la transferencia de vapor desde el agua al aire, con el consiguiente enfriamiento del agua debido a la evaporación.

En la transmisión de calor por convección, se produce un flujo de calor en dirección al aire que rodea el agua a causa de la diferencia de temperaturas entre ambos fluidos.

La tasa de enfriamiento por evaporación es de gran magnitud en las torres de enfriamiento; alrededor del 90 % es debida al fenómeno difusivo. Al entrar en contacto el aire con el agua se forma una fina película de aire húmedo saturado sobre la lámina de agua que desciende por el relleno. Esto es debido a que la presión parcial de vapor de agua en la película de aire es superior a la del aire húmedo que circula por la torre, produciéndose una cesión de vapor de agua (evaporación). Esta masa de agua evaporada extrae el calor latente de vaporización del propio líquido. Este calor latente es cedido al aire, obteniéndose un enfriamiento del agua y un aumento de la temperatura del aire. La diferencia de temperaturas del agua a la salida y la temperatura húmeda del aire se llama «acercamiento» o «aproximación», ya que representa el límite termodinámico de enfriamiento al que puede llegar el agua. <sup>(39)</sup>

## 6.3 Principales Problemas en Torres de Enfriamiento

Los objetivos del tratamiento del agua de enfriamiento son: prevenir la formación de incrustaciones, prevenir y controlar la corrosión, prevenir y controlar el ensuciamiento que causan sobre todo los depósitos de algas y babazas. Para cumplir con tal objetivo en el tratamiento de aguas para torres de enfriamiento se utilizan de forma tradicional tres o más productos tales como: Ácidos, Bactericidas, Acondicionadores de lodos e Inhibidores de Corrosión. <sup>(39)</sup>

### **6.3.1 Problemas de Incrustación**

Para tratar el problema de incrustación, los tratamientos tradicionales de agua para sistemas de enfriamiento utilizan tratamientos que incluye programas con fosfonatos, copolímeros de poliacrilatos, ácido sulfúrico (que se agrega para reducir el pH y la alcalinidad), polifosfatos, etc.

El tratamiento con ácido (por lo general ácido sulfúrico que es barato) reduce en parte la alcalinidad total y la tendencia incrustante del agua de reemplazo, la aplicación de este tratamiento necesita un monitoreo cuidadoso y el control de la aplicación de ácido para evitar el efecto corrosivo de éste sobre los metales expuestos en el sistema, así como requiere el uso de ropa protectora. Es por eso que en la actualidad estos tratamientos requieren de un pretratamiento (suavización), como sustituto del tratamiento ácido. Requiriendo de un mayor número de controles para mantener eficiente el tratamiento. En este tipo de tratamientos los ciclos de concentración van de 3 a 4 dependiendo de la calidad del agua <sup>(39)</sup>

### **6.3.2 Problemas de Corrosión**

La inhibición de la corrosión es esencial para el agua de las torres de enfriamiento, ya que esta aireada, contiene altas concentraciones de sales y materiales en suspensión, por la formación de lodos de dureza y la contaminación en el aire y se mantienen temperaturas tibias. Todos estos factores contribuyen a un ambiente corrosivo.

Los inhibidores de corrosión conocidos comúnmente son: inhibidores anódicos (cromatos –contaminante-, nitritos, fosfonatos, ortofosfatos) e inhibidores catódicos (polifosfatos y el zinc). Los tratamientos generales, recomiendan mezclas complejas de inhibidores, que incluyen dispersantes. <sup>(39)</sup>

### **6.3.3 Problemas Biológicos**

La torre de enfriamiento es un incubador ideal para microorganismos, ya que funciona a temperaturas de 80 a 120 °F (27 a 49 °C) en presencia de luz solar, oxígeno y nutrientes. Los sistemas circulantes que permanezcan en condiciones de estancamiento estarán sujetos a problemas de crecimientos biológicos.

Hay tres clases de microorganismos que pueden existir en los sistemas recirculantes de enfriamiento: algas, hongos y bacterias. Las biopelículas que se acumulan en tuberías y equipos son un ambiente para la proliferación de microorganismos. La biopelícula reduce la rapidez de la transferencia de calor en los intercambiadores respectivos y provee un ambiente ideal para las bacterias reductoras de sulfato y aeróbicas del azufre y causar una severa

corrosión. Por lo que es necesario agregar biocidas para matar a los organismos e inhibir su crecimiento.<sup>(39)</sup>

Los tratamientos biocidas más comunes son los oxidantes (cloro, hipocloritos, bióxido de cloro, clorocianuro, bromo, etc.) y los no oxidantes (isotiazolanas, sales cuaternarias, sulfona, tionas, etc). Tratamientos que son costosos en la mayoría de veces.<sup>(39)</sup>

**Capítulo 7**  
**Estudio Técnico de las Tecnologías**  
**Seleccionadas**

En el presente trabajo, se proponen dos alternativas de acondicionamiento del agua municipal tratada para uso en torres de enfriamiento, el proceso de suavización por intercambio iónico y el tratamiento químico, las cuales se evalúan desde el punto de vista cualitativo y cuantitativo. Ambas tecnologías tienen la función de acondicionar el agua municipal tratada para poder ser reutilizada en los sistemas de enfriamiento por la industria química en la delegación azcapotzalco, es decir, se tiene un influente con las características que se muestran en la tabla 7.1.2.1, y mediante el uso del intercambio iónico o el tratamiento químico, se tendrán los parámetros requeridos para ser alimentados a una torre de enfriamiento, los cuales están desglosados en la tabla 7.1.3.1.

## 7.1 Bases de Diseño

Dadas las características del agua tratada proveniente de la planta El Rosario (ver anexo 2), no se requiere de un proceso complejo para el acondicionamiento del líquido para ser reutilizado por la industria química en sistemas de enfriamiento. Mediante la comparación de los parámetros del afluente de la planta y los requeridos en la industria para uso en torres de enfriamiento, se observa que mediante el uso de un proceso de suavización por intercambio iónico o un tratamiento químico del agua, esta tendrá las características requeridas por los sistemas de enfriamiento en la industria.

### Función del Proceso

Proveer a la industria química de agua para sistemas de enfriamiento.

### Tipo de Proceso

Proceso de tratamiento Terciario para la adaptación de agua residual municipal tratada para la utilización en Torres de Enfriamiento.

### Capacidad

La Capacidad del proceso manejado para la adaptación del agua se baso en las necesidades de la torre de enfriamiento de tiro inducido que utiliza la planta piloto de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, para lo cual se tomo en cuenta el repuesto, que consume aproximadamente  $9 \text{ m}^3/\text{día}^{(40)}$

Volumen Pileta.....	0.588 m <sup>3</sup>
Recirculación.....	1.514 l/s
Temp. Agua recirculación.....	120 °F
Temp. Salida.....	70 ° F
Diferencial.....	50 ° F
Evaporación.....	0.0757 l/s
Repuesto.....	0.0946 l/s
Horas de operación.....	16 Hrs/día
Volumen de purga.....	2 m <sup>3</sup> /día

### 7.1.2 Especificación de Alimentación

El agua llega por tubería de la planta de tratamiento de agua El Rosario ubicada en la delegación azcapotzalco con las características que muestra la tabla 7.1.2.1.

**Tabla 7.1.2.1 Calidad del influente**

Componente	Alimentación
Ph	7.44
Sílice	24.9 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Aluminio	0.358 mg/l
Hierro	0.121 mg/l
Magnesio	82.2 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Calcio	126.25 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Fosfato	14.92 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Bicarbonato	140.34 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Sulfatos	313.2 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Cloruros	109.3 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Dureza total	157.93 mg/l
Alcalinidad	171.15 mg/l
Sustancia activa al azul de metileno	0.16 mg/l
DQO	39.48 mg/l
SDT	595.47 mg/l
SST	7.91 mg/l

**FUENTE:** Planta de tratamiento de agua residual municipal El Rosario

### 7.1.3 Especificación de los Productos

Los valores mostrados en la tabla 7.1.3.1 son los parámetros típicos requeridos para un sistema de enfriamiento.

**Tabla 7.1.3.1 Parámetros típicos requeridos en un sistema de enfriamiento**

Componente	Efluente (mg/l)
Ph	5-8
Sílice	41.5 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Aluminio	0.1mg/l
Hierro	0.5 mg/l
Magnesio	2.05 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Calcio	125 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Fosfato	1.58 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Bicarbonato	19.68 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Sulfatos	208 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Cloruros	705 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Dureza total	650 mg/l
Alcalinidad	350 mg/l
Sustancia activa al azul de metileno	1 mg/l
DQO	75 mg/l
SDT	500 mg/l
SST	10 mg/l

**FUENTE:** (23)

Por convención en el área de tratamiento de agua, los valores de todos los componentes iónicos en el agua se expresan en términos de carbonato de

calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Esta misma convención se emplea comúnmente en toda la información técnica de capacidad establecida por las compañías fabricantes de resinas de intercambio iónico. En el anexo 3.

## **7.2 Análisis Cualitativo de los dos Procesos Elegidos para el Caso de Estudio**

### **7.2.1 Proceso de Suavización por Intercambio Iónico para el Acondicionamiento del Agua para Uso en Sistemas de Enfriamiento**

El proceso de suavización se realiza a través de un intercambio iónico en el que se remueven o extraen del agua, los iones de calcio y magnesio (dureza) causantes de la formación de incrustaciones en tuberías, equipos, calderas, válvulas, etc.

El procedimiento de intercambio iónico para suavizar agua se realiza con resina catiónica, la cual cambia iones de calcio y magnesio por iones de sodio.

El agua dura entra en el tanque mineral y los iones de calcio y de magnesio se mueven a los granos, substituyendo iones del sodio. Los iones del sodio entran el agua. Cuando los granos se saturan con calcio y el magnesio, la unidad comienza un ciclo trifásico de la regeneración. Primero, la fase de retrolavado invierte el flujo del agua para quitar la suciedad del tanque. En la fase de la recarga, la solución de sal concentrada y sodio-rica fluye del depósito de la salmuera al depósito mineral. El sodio recoge en los granos, substituyendo el calcio y el magnesio, que van abajo del dren. Cuando esta fase se termina, se elimina el exceso de la salmuera del depósito mineral y se rellena el depósito de la salmuera.

La mayoría de los ablandadores de agua populares tienen un sistema automático de la regeneración. El tipo más básico tiene un cronómetro eléctrico que limpie y recargue el sistema en un horario regular. Durante recargar, el agua suave no está disponible. El segundo tipo de control usa un computador que controla la cantidad de agua usada. Cuando bastante agua ha pasado a través del depósito mineral para haber agotado los granos de sodio, la computadora acciona la regeneración. Estos ablandadores tienen frecuentemente una capacidad de reserva de resina, para que agua ablandada sea disponible durante la recarga. Un tercer tipo de control usa una escala de medida mecánica para medir la cantidad de agua usada y para poner en acción la recarga. La ventaja de este sistema es que no hay componentes eléctricos, y el depósito mineral se recarga solo cuando es necesario. Cuando el esta equipado con dos depósitos de minerales, el agua suave está siempre disponible, aun cuando la unidad está recargando.<sup>(41)</sup>

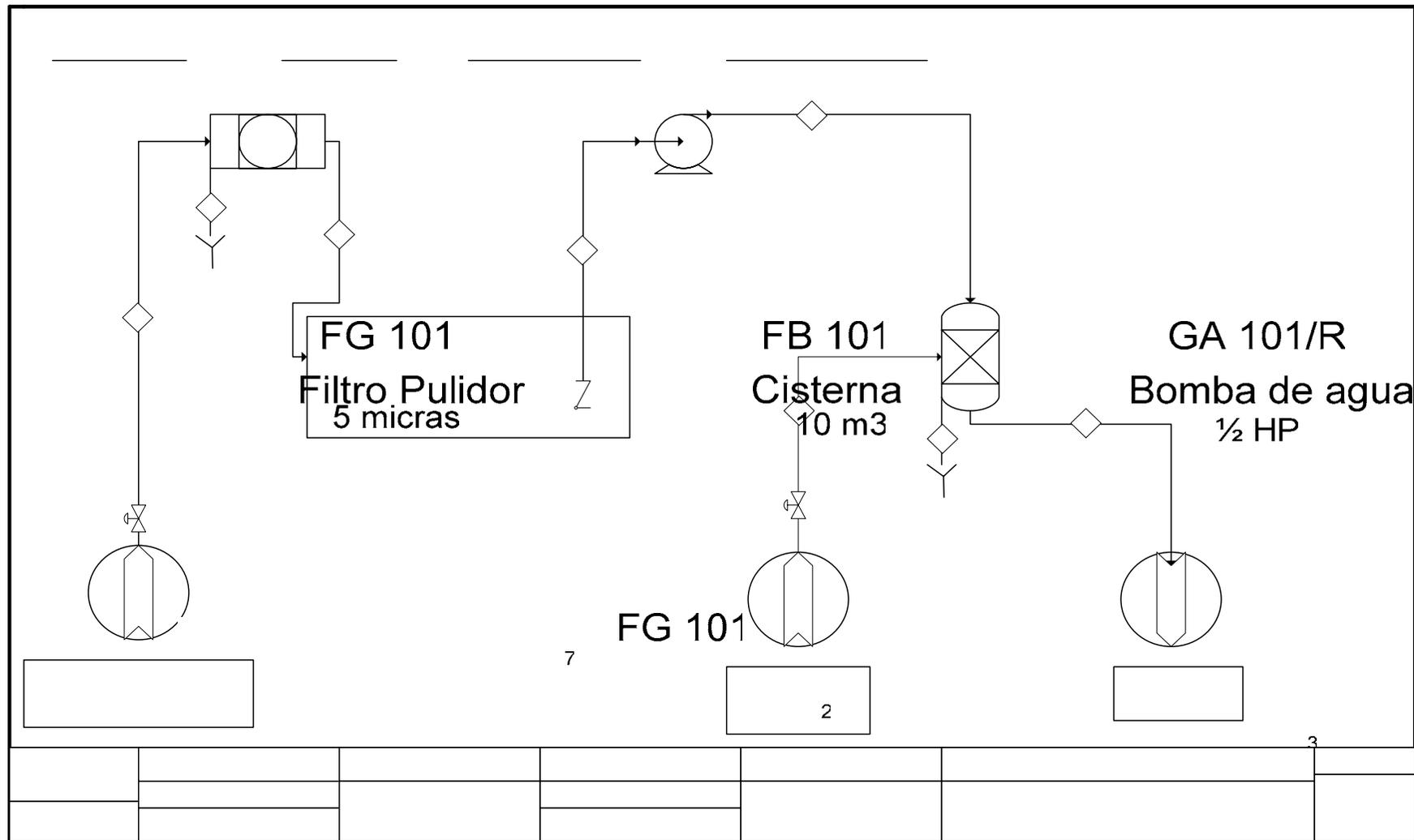
Para el caso de estudio, se utiliza un sistema de regeneración automático del segundo tipo.

#### **7.2.1.1. Descripción del Proceso de Suavización por Intercambio Iónico**

Se alimentan 9 m<sup>3</sup>/día de agua tratada proveniente de la planta de tratamiento El Rosario a una presión de 1 Kg/Cm<sup>2</sup> a un filtro pulidor FG-101 para la eliminación de sólidos suspendidos, posteriormente se almacena en una cisterna FB-101. El agua almacenada se bombea mediante el equipo GA-101 y se envía al equipo suavizador DA-101 en donde se reduce la dureza generada por iones calcio y magnesio, para su posterior alimentación a un sistema de enfriamiento con las condiciones necesarias para el repuesto de la torre.

El suavizador se regenera una vez al día después de cada jornada con siete kilogramos de sal. (Ver características y Capacidad de los equipos en el anexo 4)

7.2.1.2 Diagrama de Flujo del Proceso de Suavización por Intercambio Iónico



### 7.2.1.3 Balance de Masa del Proceso de Suavización por Intercambio Iónico

Tabla 7.2.1.3.1 Balance de masa del proceso de Suavización.

	1	2	3	4	5	6
<b>Q (m<sup>3</sup>/día)</b>	9	8.99	9	9	8.9716	7 kg/día
<b>T (°F)</b>	70	70	70	70	70	70
<b>P (psi)</b>	14.7	11.4	5	64	14.7	10
<b>X<sub>Mg</sub></b>	1.7 E -5	1.7 E -5	1.7 E -5	1.7 E -5	2 E -6	0
<b>X<sub>Ca</sub></b>	5.2 E -5	5.2 E -5	5.2 E -5	5.2 E -5	5 E -6	0
<b>X<sub>N-H</sub></b>	2.3 E -6	2 E -6	1.7 E -7	1.7 E -7	1.7 E -7	0
<b>X<sub>fos</sub></b>	9 E -6	8 E -6	8.7 E -7	8.7 E -7	8.7 E -7	0
<b>X<sub>SDT</sub></b>	5.9 E -4	3 E -5	3 E -5	3 E -5	3 E -5	0
<b>X<sub>Otros</sub></b>	1 E -3	9.3 E -4	9.3 E -4	9.3 E -4	9.3 E -4	0
<b>X<sub>NaCl</sub></b>	0	0	0	0	0	0.98
<b>X<sub>H2O</sub></b>	0.9984	0.999	0.999	0.999	0.9992	0.02

### 7.2.2 Proceso de Tratamiento Químico para el Acondicionamiento del Agua para Uso en Sistemas de Enfriamiento

El tratamiento químico es un proceso ampliamente utilizado en las industrias para la prevención de los principales problemas que se presentan en las torres de enfriamiento, el cual consiste en la adición de sustancias químicas que evitan la formación de algas e incrustaciones causadas por la evaporación continua del agua en los sistemas de enfriamiento. Se manejan polímeros que controlan la incrustación para mantener un buen funcionamiento en los sistemas de agua más demandantes.

Dado que la incrustación y la formación de algas son los principales problemas que se presentan en una torre de enfriamiento, y dadas características de nuestro influente, se ha propuesto la utilización de sustancias inhibidoras para evitar estos problemas en los sistemas de enfriamiento.

Los inhibidores son sustancias que ayudan a mantener la concentración propicia para evitar estos problemas. En esta división de productos se manejan polímeros que controlan la incrustación para mantener un buen funcionamiento en los sistemas de agua más demandantes.

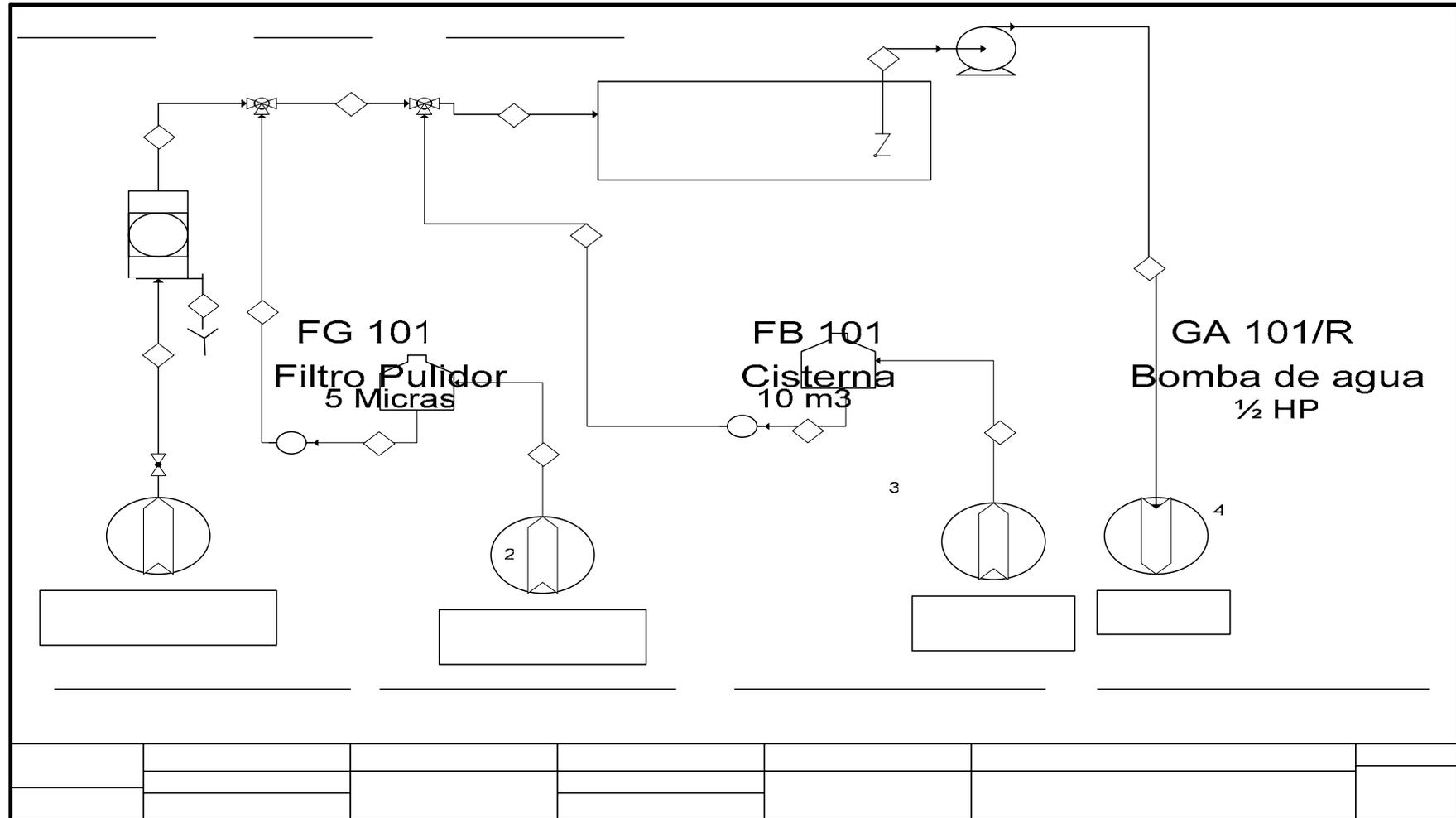
El inhibidor de incrustación que se utiliza en el presente trabajo mantiene los sólidos en suspensión y evita la corrosión del acero y del cobre así como sus aleaciones.

Para controlar el crecimiento de bacterias, hongos y algas en torres de enfriamiento se utiliza un Microbicida, el cual, es un líquido biodegradable y muy efectivo a bajas concentraciones. (Ver anexo 5)

#### **7.2.2.1 Descripción del Proceso de Tratamiento Químico**

Se alimentan 9 m<sup>3</sup>/día de agua tratada proveniente de la planta de tratamiento El Rosario a una presión de 1 Kg./Cm<sup>2</sup> a un filtro pulidor FG-101 para la eliminación de sólidos suspendidos, posteriormente se inyecta el inhibidor de corrosión y el microbicida, provenientes de los tanques FB-102 y FB-103 respectivamente, por medio de las bombas dosificadoras GA-102 y GA-103. El agua se almacena en la cisterna FB-101 para poder ser enviada al repuesto de la torre de enfriamiento por medio de la bomba GA-101.

7.2.2.2 Diagrama de Flujo para Acondicionamiento del Agua para Enfriamiento Usando el Tratamiento Químico



FG 101

### 7.2.2.3 Balance de Masa del Proceso de Tratamiento Químico

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Q (m3/día)	9	9	9.0086	9.0173	9	9	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
T (°F)	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
P (psi)	14.7	11.4	11.4	11.4	5	64	0	5	11.4	0	5	11.4
X <sub>Mg</sub>	1.7 E -5	0	0	0	0	0	0					
X <sub>Ca</sub>	5.2 E -5	0	0	0	0	0	0					
X <sub>N-H</sub>	2.3 E -6	0	0	0	0	0	0					
X <sub>fos</sub>	9 E -6	0	0	0	0	0	0					
X <sub>SDT</sub>	5.9 E -4	0	0	0	0	0	0					
X <sub>Otros</sub>	1 E -3	0	0	0	0	0	0					
X <sub>Inhibidor</sub>	0	0	5 E -5	5 E -5	5 E -5	5 E -5	1	1	1	0	0	0
X <sub>Biocida</sub>	0	0	0	5 E -5	5 E -5	5 E -5	0	0	0	1	1	1
X <sub>H2O</sub>	0.9984	0.9984	0.9983	0.9982	0.9982	0.9982	0	0	0	0	0	0

### 7.2.3 Comparación de los Procesos Utilizados

La Alternativa 2 es la más simple desde el punto de vista de supervisión y requisitos de mantenimiento de equipo con la desventaja de que el agua utilizada para el enfriamiento fue adaptada para los parámetros necesarios que requieren dos ciclos de concentración, lo cual se observa en la tabla 7.2.3.1. La opción 1 requiere un mantenimiento elevado por la variedad de productos químicos utilizados y depósitos de los mismos, además de requerir una mayor inspección, con la ventaja de que los productos químicos facilitan la opción de mayores ciclos de concentración.

**Tabla 7.2.3.1 Comparación cualitativa de las alternativas**

Parámetro	Tratamiento Químico (Alternativa 1)	Suavización (Alternativa 2)
Cantidad de Operaciones	2	2
Requisitos de Mantenimiento	Mayor Mantenimiento por el uso de químicos y sistemas de Almacenamiento	Representa el menor mantenimiento debido a la automatización del equipo suavizador
Diversidad de Equipos Mecánicos	Alto	Bajo
Supervisión Necesaria	Alta	Baja
Diversidad de Productos Químicos	Alta	Baja
Ciclos de Concentración	5	2

# **Capítulo 8**

## **Evaluación Económica**

## 8.1 Premisas de Cálculo

En la elaboración del estudio financiero se utilizaron dos métodos de costeo y escalamiento de equipos de Proceso.

### Método de Guthrie

Este método es utilizado para realizar un costeo de equipos mediante correlaciones desarrolladas por Kenneth M. Guthrie <sup>(42)</sup>

### Método de Factor de los Seis Decimos

El método de los Seis Decimos es utilizado para el escalamiento de equipos, a partir de un Costo y capacidad conocida como se muestra en la siguiente formula:

$$\frac{\text{Costo B}}{\text{Costo A}} = \left[ \frac{S_B}{S_A} \right]^{0.6}$$

Donde:

- Costo A, B. Son el valor de costo conocido y el desconocido respectivamente
- $S_A$  Capacidad del equipo conocido
- $S_B$  Capacidad del equipo a escalar

NOTA: Se deberá de tomar en cuenta el Factor de Escalamiento <sup>(43)</sup>

## 8.2 Inversión Total

Para el estudio financiero es de gran importancia tomar en cuenta la inversión, ya que a partir de esta se podrá saber el monto de la inversión que se tiene que gastar y por igual saber en que tiempo se recupera. En este estudio de Inversión se hace un aproximado por medio del método Guthrie.

### 8.2.1 Alternativa 1. Tratamiento Químico

Para el tratamiento químico es necesaria una inversión aproximada de \$3,116 USD por cuestión de los gastos de instalación del equipo, desglosado por equipo en la tabla 8.2.1.1.

**Tabla 8.2.1.1 Inversión por Equipo**

EQUIPO	NUMERO REQUER.	COSTO UNITARIO DE EQUIPO EN 2005 (44)	COSTO TOTAL DE LOS EQUIPOS EN EL 2005	
Filtro Pulidor	1	\$ 30	\$ 30	\$ 65
Cisterna	1	\$ 1,364	\$ 1,364	\$ 1,372
Tanque de Almacenamiento	2	\$ 10	\$ 20	\$ 43
Bombas Centrifugas	2	\$ 155	\$ 311	\$ 673
Bombas Dosificadoras	2	\$ 222	\$ 444	\$ 963
			<b>\$ 2,169</b>	<b>\$ 3,116</b>

Los factores utilizados <sup>(42)</sup> para el cálculo de la inversión total se muestran en la tabla 8.2.1.2.

**Tabla 8.2.1.2 Inversión a Detalle**

IDENTIFICACION		Cisterna	Tanque de Almacenamiento	Bomba Centrifuga	Bombas Dosificadoras	Filtro
Equipo	100.00%	1,364.00	20.00	310.50	444.00	30.00
Tubería	32.00%		6.40	99.36	142.08	9.60
Concreto	8.90%		1.78	27.63	39.52	2.67
Acero	1.70%		0.34	5.28	7.55	0.51
Instrumentos	7.30%		1.46	22.67	32.41	2.19
Eléctrico	8.30%		1.66	25.77	36.85	2.49
Pintura	0.60%	8.18	0.12	1.86	2.66	0.18
MANO OBRA	58.00%		11.60	180.09	257.52	17.40
<b>COSTO MODULAR TOTAL</b>		<b>\$1,372.18</b>	<b>\$ 43.36</b>	<b>\$ 673.16</b>	<b>\$ 962.59</b>	<b>\$ 65.04</b>
						<b>\$ 3,116.34</b>

## 8.2.2 Alternativa 2. Suavización con Ciclo Sodio

El proceso de Suavización necesita de una inversión aproximada de \$8,766 USD por cuestión de la instalación del equipo tabla 8.2.2.1.

**Tabla 8.2.2.1 Invasión por Equipo**

EQUIPO	NUMERO REQUER.	COSTO UNITARIO DE EQUIPO EN 2005 (44)	COSTO TOTAL DE LOS EQUIPOS EN EL 2005	
Filtro Pulidor	1	\$ 30	\$ 30	\$ 65
Cisterna	1	\$ 1,364	\$ 1,364	\$ 1,372
Bomba Centrifuga	2	\$ 311	\$ 622	\$ 1,348
Suavizador	1	\$ 815	\$ 815	\$ 1,767
			<b>\$ 2,831</b>	<b>\$ 4,553</b>

En este proceso de Suavización se consideran los mismos factores tabla 8.2.2.2.

**Tabla 8.2.2.2 Inversión**

IDENTIFICACION		Filtro Pulidor	Cisterna	Bomba Centrífuga	Suavizador
<b>Equipo</b>	100.00%	30.00	1,364.00	622.00	815.00
Tubería	32.00%	9.60		199.04	260.80
Concreto	8.90%	2.67		55.36	72.54
Acero	1.70%	0.51		10.57	13.86
Instrumentos	7.30%	2.19		45.41	59.50
Eléctrico	8.30%	2.49		51.63	67.65
Pintura	0.60%	0.18	8.18	3.73	4.89
MANO OBRA	58.00%	17.40		360.76	472.70
<b>COSTO MODULAR TOTAL</b>		<b>\$ 65.04</b>	<b>\$ 1,372.18</b>	<b>\$ 1,348.50</b>	<b>\$ 1,766.92</b>
					<b>\$ 4,552.64</b>

### 8.3 Estimado de Ingresos

El Precio del Agua es considerado en base al volumen consumido bimestralmente por la Industria Química, siendo el aproximado a \$2 USD<sup>(45)</sup>, base que se tomo para hacer el estudio financiero y las variantes que se muestran en la tabla 8.3.1 es para el análisis de sensibilidad.

**Tabla 8.3.1 Ingresos con Variantes**

<i>Precio de agua (USD/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Consumo de agua (m<sup>3</sup>/año)</i>	<i>Ingreso por año (USD/año)</i>
1.5	2592	3,888
2.0	2592	5,184
2.5	2592	6,480
3.0	2592	7,776
3.5	2592	9,072

### 8.4 Estimado de Egresos

En este estudio se considera los insumos necesarios para la operación de la planta. La venta del agua residual tratada varia según el proceso de tratamiento que se haya utilizado para el caso de estudio se tomo el de \$0.2 USD/m<sup>3</sup>.<sup>(37)</sup>

#### 8.4.1 Alternativa 1

En la tabla 8.4.1.1 se observa los parámetros utilizado para el cálculo de los egresos. El Mantenimiento (Manto) es considerado como un 3% de la inversión y para la mano de Obra de 6%. De Inhibidor se consume 200 PPM/día como dosis inicial (una semana) y 50 PPM/día como dosis de rutina. De Microbicida se consume 50 PPM/día como rutina, los químicos se detallan en el anexo 5

**Tabla 8.4.1.1 Egresos**

<i>Costos Variable</i>	<i>(pesos/año)</i>
Agua	\$ 518
Inhibidor	\$ 843.30
Microbicida	\$ 811.70
energía eléctrica	\$ 150
Manto	\$ 93
Mano de obra	\$ 187
Depreciación	\$ 217
<b>Total</b>	<b>\$ 2,821</b>

### Depreciación

Los equipos, tienen un tiempo de vida aproximado a 10 años, siendo un factor de egresos tabla 8.4.1.2.

**Tabla 8.4.1.2 Depreciación por Equipo**

<i>Tiempo de Vida 10 años</i>	<i>USD/ año</i>
Filtro	3.0
Cisterna	136.4
Tanque de Almacenamiento	2.0
Bomba Centrifuga	31.1
Bombas Dosificadoras	44.5
<b>total</b>	<b>\$ 217</b>

### Consumo de Energía

En la tabla 8.4.1.3 se muestra el consumo de energía para los equipos mecánicos, considerando el costo del consumo, según datos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) reportados para el primer trimestre del año 2005.

**Tabla 8.4.1.3 Consumo de Energía**

EQUIPO	MOTORES			CONSUMO	
	CANT.	POT. (KW)	OP'N	OP'N	TOTAL
Bomba de Alimentación agua para la torre	2	0.37	1.00	0.37	0.75
Bombas dosificadoras	2	0.08	2.00	0.15	0.15
<b>TOTALES</b>				<b>0.52</b>	<b>0.90</b>
FLUJO PLANTA :	<b>0.5625</b>	<b>m<sup>3</sup>/h</b>			
kW / h :	<b>0.52</b>	<b>kW./h</b>			
kW /m <sup>3</sup> :	<b>0.93</b>	<b>kW / m<sup>3</sup></b>			
COSTO DEL kW / h : (CFE)	<b>\$0.69</b>	<b>kW.h</b>			
PRECIO DEL kW / m <sup>3</sup> :	<b>\$0.64</b>	<b>m<sup>3</sup></b>			
	<b>\$0.36</b>	<b>hora</b>			
	<b>\$5.73</b>	<b>dia</b>			
	<b>\$ 1,650.84</b>	<b>año</b>			
	<b>\$ 150.08</b>	<b>USD/año</b>			

## 8.4.2 Alternativa 2

El costo de Agua es el mismo del proceso anterior, al igual que los porcentajes que se dio al Manto y a la Mano de Obra. La única variable es la Sal (NaCl) con un precio de 0.36 USD/Kg, necesitándose un consumo de 7Kg/día para la regeneración de la resina del suavizador. Mostrándose en la tabla 8.4.2.1.

**Tabla 8.4.2.1 Egresos**

<i>Costos Variable</i>	<i>(USD/año)</i>
Agua	\$ 518
Nac.	\$ 734
energía eléctrica	\$ 129
Manto	\$ 116
Mano de obra	\$ 233
Depreciación	\$ 252
<b>Total</b>	<b>\$ 1,982</b>

### Depreciación

Se considera el mismo tiempo de vida para los equipos tabla 8.4.2.2.

**Tabla 8.4.2.2 Depreciación por Equipo**

<i>Tiempo de Vida 10 años</i>	<i>USD/ año</i>
Filtro Pulidor	3.0
Cisterna	136.4
Suavizador	81.5
Bomba Centrifuga	31.1
<b>total</b>	<b>\$ 252</b>

### Consumo de Energía Eléctrica

En la tabla 8.4.2.3 se muestra el consumo de energía para los equipos mecánicos

**Tabla 8.4.2.3 Consumo de Energía**

EQUIPO	MOTORES			CONSUMO	
	CANT.	POT. (KW)	OP'N	OP'N	TOTAL
Bomba de Alimentación agua para la torre	2	0.37	1.00	0.37	0.75
Bomba Suavizador	1	0.08	1.00	0.08	0.08
<b>TOTALES</b>				<b>0.45</b>	<b>0.82</b>
FLUJO PLANTA :	<b>0.5625</b>	<b>m<sup>3</sup>/h</b>			
kW / h :	<b>0.45</b>	<b>kW.h</b>			
kW /m <sup>3</sup> :	<b>0.80</b>	<b>kW / m<sup>3</sup></b>			
COSTO DEL kW / h : (CFE)	<b>\$0.69</b>	<b>kW.h</b>			
PRECIO DEL kW / m <sup>3</sup> :	<b>\$0.55</b>	<b>m<sup>3</sup></b>			
	<b>\$0.31</b>	<b>hora</b>			
	<b>\$4.91</b>	<b>día</b>			
	<b>\$ 1,414.10</b>	<b>año</b>			
	<b>\$ 128.55</b>	<b>USD/año</b>			

## 8.5 Análisis Financiero

El Análisis Financiero es de importancia ya que arroja valores que nos permiten tomar decisiones de factibilidad. En este estudio se analizan dos procesos, obteniendo la Tasa Interna de Retorno (TIR), Valor Presente Neto (VPN) y Tiempo de Recuperación de Capital (TRC).

En este análisis financiero no se toman en cuenta los impuestos en ninguna de las dos alternativas, debido a que con la implementación del presente proyecto se contribuye al Desarrollo Sustentable de la ciudad de México.

### 8.5.1 Alternativa 1

En la tabla 8.5.1.1 se aprecia que el proceso Tratamiento Químico tiene una inversión de \$3,116 USD, teniendo ingresos de \$5,184 USD y con gastos de \$2,821 USD. De ellos podemos obtener la utilidad y elaborar el flujo de efectivo para 10 años.

**Tabla 8.5.1.1 Flujo de Efectivo**

Concepto	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Entrada	-	5,184	5,184	5,184	5,184	5,184	5,184	5,184	5,184	5,184	5,184
Salida	3,116	2,821	2,821	2,821	2,821	2,821	2,821	2,821	2,821	2,821	2,821
Utilidad	-3,116	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363

Nota: el año 0, se refiere al año 2005 hasta el año 2015

Después de analizar el flujo de efectivo (FE) se obtiene una TIR del 76% y un VPN para 10 años de \$12,050 USD con un TRC de 1 año 6 meses tabla 8.5.1.2.

**Tabla 8.5.1.2 Parámetros de Decisión**

Año	Flujo Efect	FE desc.	FED acum
0	-\$ 3,116	-\$ 3,116	-\$ 3,116
1	\$ 2,363	\$ 2,168	-\$ 948
2	\$ 2,363	\$ 1,989	\$ 1,041
3	\$ 2,363	\$ 1,825	\$ 2,866
4	\$ 2,363	\$ 1,674	\$ 4,540
5	\$ 2,363	\$ 1,536	\$ 6,076
6	\$ 2,363	\$ 1,409	\$ 7,485
7	\$ 2,363	\$ 1,293	\$ 8,778
8	\$ 2,363	\$ 1,186	\$ 9,964
9	\$ 2,363	\$ 1,088	\$ 11,052
10	\$ 2,363	\$ 998	\$ 12,050
	VPN	\$ 12,050	
	TIR	76%	

## 8.5.2 Alternativa 2

En la Tabla 8.5.2.1 se observa que el proceso de suavización tiene una inversión de \$3,877 USD, con los mismos ingresos del proceso de Tratamiento Químico y con gastos de \$1,982 USD por igual se obtienen la utilidad y el flujo de efectivo para 10 años.

**Tabla 8.5.2.1 Flujo de Efectivo**

Concepto	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Entrada	-	5,184	5,184	5,184	5,184	5,184	5,184	5,184	5,184	5,184	5,184
Salida	3,877	1,982	1,982	1,982	1,982	1,982	1,982	1,982	1,982	1,982	1,982
Utilidad	-3,877	3,202	3,202	3,202	3,202	3,202	3,202	3,202	3,202	3,202	3,202

Nota: el año 0, se refiere al año 2005 hasta el año 2015

En este proceso se obtiene una TIR del 82%, un VPN de \$16,673 USD con un TRC de 1 año 5 meses Tabla 8.5.2.2.

**Tabla 8.5.2.2. Parámetros de desicion**

Año	Flujo Efect	FE desc.	FED acum
0	-\$ 3,877	-\$ 3,877	-\$ 3,877
1	\$ 3,202	\$ 2,938	-\$ 940
2	\$ 3,202	\$ 2,695	\$ 1,756
3	\$ 3,202	\$ 2,473	\$ 4,228
4	\$ 3,202	\$ 2,268	\$ 6,497
5	\$ 3,202	\$ 2,081	\$ 8,578
6	\$ 3,202	\$ 1,909	\$ 10,487
7	\$ 3,202	\$ 1,752	\$ 12,239
8	\$ 3,202	\$ 1,607	\$ 13,846
9	\$ 3,202	\$ 1,474	\$ 15,320
10	\$ 3,202	\$ 1,353	\$ 16,673
	VPN	\$ 16,673	
	TIR	82%	

## 8.6 Comparación de las Alternativas

La Alternativa 2 Es el proyecto más rentable con base en la TIR y el VPN obtenidos en el análisis financiero Tabla 8.6.1.

**Tabla 8.6.1 Comparación Cuantitativa**

	Alternativa 1	Alternativa 2
<b>Inversión (USD)</b>	3,116	4,553
<b>Ingresos (USD/Año)</b>	5,184	5,184
<b>Egresos (USD/Año)</b>	2,821	1,982
<b>VPN (USD)</b>	12,050	16,673
<b>TIR (%)</b>	76	82
<b>TRC (Año, mes)</b>	(1,6)	(1,5)

## 8.7 Análisis de Sensibilidad

Las tendencias de Crecimiento de población harán que la disponibilidad de agua disminuya y por tanto el valor de esta tenderá a un aumento significativo. Por tal razón se consideró un porcentaje de aumento en las variables que se muestran en la tabla 8.7.1 podemos observar la sensibilidad del comportamiento de VPN y TIR, de los dos procesos estudiados.

Teniendo que si en caso remoto el costo del agua potable disminuya se tendrá una menor TIR y un TRC mas amplio, pero no afectando la rentabilidad. Al contrario si el costo del agua aumenta se tendrá mayores beneficios económicos.

**Tabla 8.7.1 Análisis de Sensibilidad**

Venta (USD/m3)	Tratamiento Químico			Suavización		
	TIR (%)	VPN (USD)	TRC (año, mes)	TIR (%)	VPN (USD)	TRC (año, mes)
1.5	32%	\$ 3,733	[3,7]	48%	\$ 8,356	[3,5]
2	76%	\$ 12,050	[1,6]	82%	\$ 16,673	[1,5]
2.5	117%	\$ 20,367	[1,0]	116%	\$ 24,990	[1,0]
3	159%	\$ 28,684	[0,9]	149%	\$ 33,308	[0,9]
3.5	201%	\$ 37,002	[0,7]	183%	\$ 41,625	[0,8]

**Nota:** Dentro de esta capítulo se planeaba hacer un estudio de costo–beneficio, pero por desgracia nos negaron los datos requeridos para este fin o no se ha realizado un estudio que nos arroje los datos de beneficio de utilización del agua para: a) Riego, b) Pesca, c) Ganado, otros. Ni mucho menos datos que representen la problemática de hundimiento de la ciudad por la sobre explotación de los mantos acuíferos, así como otros problemas relacionados con la utilización excesiva del agua.

## **Conclusiones y Recomendaciones**

A partir de los resultados obtenidos, podemos concluir que en el Distrito Federal, así como en otros estados de la República existe una gran escasez de agua potable, por lo tanto, se propone el reuso del agua municipal tratada en la industria química, con esta propuesta, podría abatirse el desabasto de agua potable en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, favoreciendo el desarrollo sustentable de la industria, además, de la generación de empleos y la contribución al aumento del PIB de la zona y del país. Esto se comprobó al obtener valores presentes positivos y tasas de rentabilidad atractivas.

Las tendencias de crecimiento de la población aumentarían en los próximos años, esto provocará una gran demanda de agua y escasez de la misma, lo cual puede ser solucionado mediante el uso del agua municipal tratada por los diferentes sectores de la población, dado que en la actualidad solo se trata del 30% de las aguas residuales municipales y además las plantas existentes no operan al 100% de su capacidad instalada debido a que no se paga el agua a un precio justo, es decir, el tratamiento y distribución de la misma es mucho más alto de lo que se paga por ella.

Se sugiere a las diferentes instituciones gubernamentales crear la infraestructura adecuada y necesaria para abastecer el agua municipal tratada a los sectores que como la industria no requieren de una alta pureza del líquido, además de evitar el problema del hundimiento de la Ciudad de México por medio de la recarga de los mantos acuíferos, ya que esto trae asociados grandes costos para la Ciudad.

Por otro lado, mediante el análisis cualitativo y cuantitativo de las dos alternativas de acondicionamiento del agua para sistemas de enfriamiento, 1) Tratamiento Químico y 2) Suavización por Intercambio Iónico, se concluye que el proceso de suavización requiere de una menor supervisión y no requiere compuestos químicos especiales, además de ser el más factible económicamente con una inversión de \$3,877 USD, una Tasa Interna de Retorno del 82%, un VPN de \$16,673 USD y un Tiempo de Recuperación de Capital de 1 año 5 meses. A diferencia del proceso de Tratamiento Químico con inversión de \$3,116 USD, una TIR del 76% y un VPN de \$12,050 USD con un TRC de 1 año 6 meses.

Se comprobó que a medida que la escasez de agua se haga presente su precio aumentara haciendo más rentable la implementación del proceso de Suavización en la Industria de la Delegación Azcapotzalco, donde se ubica la planta de Tratamiento el Rosario. Por lo anterior, ningún inversionista debería reusarse a implementar una planta de acondicionamiento como las aquí estudiadas y contribuir con el Desarrollo Sustentable.

Por todo lo anterior, podemos concluir, que se cumplieron todos los objetivos planteados en el inicio del presente trabajo, dado que se evaluaron ambos procesos propuestos, desde el punto de vista técnico y económico, para finalmente concluir que al implementarse un proyecto de este tipo, en el Distrito Federal se liberarían 3285 m<sup>3</sup>/año por cada industria que utilice agua municipal tratada en sus procesos de enfriamiento, la cual se utilizaría para consumo humano del 2% de la población del Distrito Federal que no recibe agua. Si el

total de industrias químicas en el Distrito Federal utilizaran el mismo caudal de agua municipal tratada, se liberaría 6671835 m<sup>3</sup>/año.

## **Bibliografía**

1. Castañeda S. Víctor, "Gestión integral de los recursos hidráulicos en la Cd. de México," , Tomo II, UAM, Porrúa, Eds. México 1997, pp.77,82.
2. Evaluación de los costos ecológicos del agua: bases para un desarrollo sustentable en la ciudad de México, disponible en: [www] <a href="http://www.memoria.com.mx/118/118mem02.htm">http://www.memoria.com.mx/118/118mem02.htm</a>
3. Rosario Iturbe A. "Necesidad de Recarga del Acuífero en el Valle de México", Instituto de Ingeniería-UNAM, México 1998. p.8.
4. Retos de la globalización, disponible en [www] <a href="http://www.rcci.net/globalizacion/2004/fg412.htm">http://www.rcci.net/globalizacion/2004/fg412.htm</a> , abril 2005
5. Universidad Tecnológica de México, Desarrollo Sustentable, México, 2003
6. CESPEDES (Comisión de Estudios del Sector Privado para el Desarrollo Sustentable).
7. Departamento del Distrito Federal. "Programa de Uso Eficiente del Agua", Memoria, D. F., agosto de 1990.
8. Situación De Los Recursos Hídricos y Su Gestión En El Continente Americano, disponible en: [www] <a href="http://www.pamas.colmex.mx/PAMAS/crisis/Publicacion/Publicacion.htm">http://www.pamas.colmex.mx/PAMAS/crisis/Publicacion/Publicacion.htm</a> , febrero 2005
9. Estadísticas de la Comisión Nacional del Agua, disponible en [www] <a href="http://www.cna.org.mx">http://www.cna.org.mx</a> abril 2005 2004
10. Estadísticas del agua, 2004. Aguas del valle de México y Sistema Cutzamala (Región XIII), editorial CNA, 2004
11. El desafío del agua en la zona metropolitana de la ciudad de México, disponible en: [www] <a href="http://www.cce.org.mx/cespedes/publicaciones/otras/DesafioAgua/agua00_3.PDF">http://www.cce.org.mx/cespedes/publicaciones/otras/DesafioAgua/agua00_3.PDF</a> , Febrero 2005
12. El Universal, Creciente Problema de Escasez en la Ciudad de México, marzo, 2004
13. Anuario estadístico, disponible en [www] <a href="http://www.inegi.gob.mx">http://www.inegi.gob.mx</a> enero 2005
14. Retos de sector salud, disponible en [www] <a href="http://www.cofepris.salud.gob.mx">http://www.cofepris.salud.gob.mx</a> , mayo 2005
15. Cresenciano Echavarrieta Albitar, Evaluación y diseño de una Planta de Tratamiento de Agua Municipal para Alimentación a Calderas en el Esquema de desarrollo Sustentable, Facultad de Química, 2005 Tesis de Maestría.
16. Rosario Iturbide at al, Revision Bibliografiita sobre contaminación de suelos y

acuíferos, ingeniería hidráulica en México, sep-dic 1989
17. Teran Cruz Erick, Agua Residual Tratada para reuso en sistemas de enfriamiento y generación de vapor, tesis UNAM, 1998.
18. El reuso del agua residual tratada en México, Escalante, V., Cardoso, L., Ramírez, E. Moeller. 2003
19. Censos Económicos 1999. (Biblioteca del Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática)
20. utilización del agua en la industria, disponible en [www] <a href="http://www.us.es/ciberico/archivos_acrobat/zaracomun4estevanmart.pdf">http://www.us.es/ciberico/archivos_acrobat/zaracomun4estevanmart.pdf</a> , abril, 2005
21. Manual de Aguas para Usos Industriales, ASTM, ed. Limusa, México, 2000
22. Alternativas de tratamiento de aguas residuales, IMTA, 1997
23. Blanca E. Jiménez, Reúso Posible del Agua Residual en México, editorial Instituto de Ingeniería, UNAM
24. Farías, U. 1993. Derecho mexicano de aguas nacionales. Editorial Porrúa, S.A.
25. Norma Oficial Mexicana, NOM-003-SEMARNAT1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios públicos. SEMARNAT. Diario Oficial de la Federación. Lunes 21 de septiembre de 1998.
26. Legislación ambiental en materia de aguas, disponible en [www] <a href="http://www.paot.org.mx/">http://www.paot.org.mx/</a> , junio 2005
27. Tratamiento de aguas negras, disponible en [www] <a href="http://www.manualcontaminacion.org.mx/">http://www.manualcontaminacion.org.mx/</a> , mayo 2005
28. Metcalf & Eddy. 1996. Ingeniería, tratamiento y disposición de aguas residuales. Editorial Mc Graw Hill. México.
29. Lagunas de Aireación, disponible en [www] <a href="http://www.depuord.com/indexurb.htm">http://www.depuord.com/indexurb.htm</a> , junio 2005
30. SEDUE. 1985. Introducción al control de la contaminación del agua. Programa de capacitación para operadores de plantas de tratamiento.
31. Manual DE Tratamiento de Agua LIPESA. Primera Edición. Producción Editorial: Gráficas Chemar, C.A. Caracas, 1989. Pág. 89 – 91.

32. Water Treatment Handbook, Degremont, Sixth Edicion, 1991
33. technology for waster wather, disponible en [www] <a href="http://www.techglassprod.com/services.htm">http://www.techglassprod.com/services.htm</a> febrero 2005
34. ley federal de derechos en materia de agua, disponible en [www] <a href="http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/22/consider.html">http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/22/consider.html</a> , Abril 2005
35. De precio y tarifas, disponible en [www] <a href="http://www.jornada.unam.mx/2004/ago04/040816/006n1sec.html">http://www.jornada.unam.mx/2004/ago04/040816/006n1sec.html</a> , mayo 2005
36. Eficiencia y Uso Sustentable del Agua en México: Participación del Sector Privado, disponible en [www] <a href="http://www.us.es/ciberico/archivos_acrobat/zaracomun4estevanmart.pdf">http://www.us.es/ciberico/archivos_acrobat/zaracomun4estevanmart.pdf</a>
37. Congreso Achemmamerica, Word Trade Center, Ciudad de México, abril 2005
38. Cooling Tower Test Report, Drift And PM-10 Tests T89-50, T89-51, And T89-52, Midwest Research Institute, Kansas City, MO, February 1990.
39. Cooling Tower Test Report, Typical Drift Test, Midwest Research Institute, Kansas City, MO, January 1990.
40. Laboratorio y Taller de Proyectos, Sexto Semestre “Análisis de una Torre de Enfriamiento”, 2004
41. Compraing dealkalinization methods David M. Bauman Water Technology July 2000 Pp 68-71
42. Kenneth M. Guthrie articulo Chemical Enginnering, marzo, 1969, p.114.
43. Max S. Peters, Klaus D. Timmerthaus, Plant Design and Economics for Chemical Engineers, Advisory Board
44. Cotización directa de proveedores de productos químicos.
45. Visita a Electropura Los Reyes La Paz, Edo de Mex. 22 de abril, 2005
46. Historia del desagua del valle de México, Enzo Levi Alter, Ingeniería Hidráulica, Sep-Dic 1988, México

## **Anexo 1**

### **Historia del Desagüe en la Ciudad de México**

## **Resumen de la historia del desagüe de la Ciudad de México.**

Por ser la cuenca cerrada la del valle de México, sin salidas naturales para evacuar las aguas que influyen en ella, los primeros habitantes del valle, y en particular los de la Ciudad de México, entablaron una lucha permanente para evitar que el incremento en los niveles de los lagos, en épocas de lluvias, ocasionara daños físicos y materiales. Fue así como se abocaron a construir domos y diques (1450), sin crear ningún sistema para su desalojo; solo pensaron en contener las aguas.

En 1555, se construyó el albarrón de San Lázaro y en 1607 se inició la construcción de un túnel en la zona de Nochistongo, el noreste del valle de México. De esta manera, el valle dejó de ser una cuenca cerrada, para contar con su primera salida artificial de agua. Sin embargo, por falta de revestimiento, el túnel quedó inutilizado y se decidió sustituirlo por un tajo. Esta primera salida artificial alteró la ecología del valle, debido a que el nivel de los lagos ya no crecía como antes y la ciudad se extendió al crear los diques áreas seguras, con lo que la población se concentró en las orillas de los antiguos lagos.

A mediados del siglo XIX, el nivel de las inundaciones alcanzaba hasta 3 m de altura y se pensó en la realización de un proyecto de desagua de la ciudad, el cual condujo a la construcción del Gran Canal Desagüe y el primer túnel de Tequisquiac, segunda salida artificial, obras que fueron inauguradas en 1900: La primera red de drenaje por gravedad, consistente en un sistema de tuberías que descargaba al Gran Canal, fue terminada en 1930, pero a consecuencia del crecimiento demográfico y de la expansión urbana, este sistema se volvió insuficiente. Este agravó el problema por el hundimiento cada vez más acelerado del suelo, provocado por la explotación de los acuíferos, lo que trajo como consecuencia el deterioro de la red de drenaje y la disminución de su capacidad para desalojar las aguas del Valle; esto propició la ampliación del Gran Canal y la construcción del segundo Túnel de Tequisquiac (1950), constituyendo la tercera salida artificial independiente de que la red de drenaje proyectada para trabajar por gravedad requería de bombeo para elevar las aguas hasta el nivel del Gran Canal, con el incremento consecuente en los costos de operación y mantenimiento.

Con objeto de recibir y desalojar las aguas de oeste de la cuenca y descargarlas a través del Tajo de Nochistongo, en 1960 se construyeron el interceptor y el emisor del poniente.

Para 1970, nuevamente el desmesurado crecimiento de la Ciudad de México, así como el incremento de su hundimiento, tornaron insuficientes las capacidades del drenaje del Gran Canal y del Emisor del Poniente.

Escribía Fray Toribio de Benavente, también llamado Motolinía, en sus memoriales; y proseguía diciendo: De estas montañas bajan arroyos y ríos, y en las laderas y bajos salen muchas y muy grandes fuentes. Toda esta agua, mas la llovediza, hace una gran laguna, y México esta situado parte dentro de ella y parte a la orilla. A la parte de occidente, por la mitad del agua va una

calzada que la divide: una parte es de muy pestífera agua y la otra dulce, y esta dulce entra en la salada, que más alta, y aquella calzada tiene cuatro o cinco ojos con sus fuentes, por donde sale del agua dulce.

El lago era muy grande, tanto que pudiéramos llamarle también un pequeño mar, y curioso: Hay una cosa en esta laguna se embravecen y alborota en cierto lugar sin hacer viento; y hierve el agua allí y echa espuma, anotaba más tarde Fray Diego Duran.

La Ciudad de México, rodeada por la laguna, corría el riesgo de anegarse en ocasión de las grandes avenidas de los ríos tributarios. La primera gran inundación de que tenemos noticia fue la 1949; a los nueve años del reinado de Moctezuma –escribe Fray de Torquemada- crecieron tanto las aguas que esta laguna mexicana se anego toda la ciudad, y andaban los moradores de ella en canoas y barquillos, sin saber que remedio dar ni como defenderse de tan grande inundación. Envió el rey sus mensajeros a Texcoco, que sabia ser un hombre de mucha razón y buena inventiva para cualquier cosa que se ofrecía, pidiéndole que acudiese a dar alguna traza para que la ciudad no se acabase de anegar..... Nezahualcoyotl vino con presteza a México y trato con Moctezuma que el mejor y mas eficaz remedio del reparo era hacer una cerca de madera y piedras que detuviese la fuerza de las aguas, para que no llegara a la ciudad. Con los vecinos, todos juntos comenzaron la obra de la albarrada vieja, que cierto fue echo muy heroico y de corazones valerosos intentarlo, porque iba metido casi tres cuartos de legua el agua adentro, y en partes muy honda, y tenia de ancho mas de cuatro brazos y de largo mas de tres leguas. Estancaron la toda muy espesamente..... Y lo que más espanta es la brevedad con que se hizo, que parece que ni fue oída ni vista la obra, siendo las piedras con se hizo todo de guijas muy grandes y pesados y trayéndolas de mas de tres y leguas de allí; Conque quedo la ciudad por entonces reparada, porque estorbo que el golpe de las aguas salobres no se encontrase con otras dulces, sobre la que estaba fundada la ciudad. Mostrase en esta obra Nezahualcoyotl obra valerosa, y no menos esforzado Moctezuma, por ellos eran los primeros que ponían mano en esta obra, animando con su ejemplo a todos lo demás señores y macegales que en ella entendían.

Los conquistadores no habían presenciado aluviones, no respetaron el albarradon de Nezahualcoyolt que, según parece, iba del Tepeyac a la sierra de Santa Catalina. Durante el asedio a la ciudad, le abrieron varios boquetes para dejar libre el paso de los bergantines construidos en el otro lado. Posteriormente aprovecharon sus materiales en la reconstrucción de Tecnochtitlan. Fue 24 años después de la conquista cuando se notaron las consecuencias.

Nuevamente Torquemada: sucedió el año 1553 que, habiendo sido el año seco y de pocas aguas, llovió un día tanto y con tan espeso efecto que no solo hincho la laguna... sino también la ciudad, y tanto exceso que no se pudieron andar las calles tres o cuatro días si no era en canoas. Como el caso no se había visto entre los castellanos que la habitan.... fue mucho el temor y miedo de anegarse que puso en sus corazones. Con este temor y miedo, buscaron el remedio, y parecióle al virrey Don Luis que lo seria cercar la ciudad con un

fuerte muro que hizo (que llaman albarrada), para la cual obra concurrió gente de la tierra que, como entonces era tanta, fue mucha la que vino, y así pudo acabarse en pocos días. Fue este el celebre Albarradon de San Lázaro, mas corto y más pegado a la ciudad que el de Nezahualcoytl. Aprovechando la presencia de las calzadas de Guadalupe al norte y de Ixtapalapa al sur, juntaba sus extremos en un arco alrededor de la población.

Al Ocurrir en 1550 una segunda inundación, el virrey, Martín Enríquez de Almansa, convocó a notables ingenieros. En esta junta se resolvió que se hiciera un desagüe a las lagunas que rodeaban a la ciudad de México, y se señaló como un propósito los bajos de Huehetoca; pero, habiendo cesado las lluvias y las aguas vueltas a su nivel, no se volvió a hablar del proyecto. En 1604 todo peligro parecía haber desaparecido.

Pero en 1605, he aquí la sorpresa: esto se escribió en 1604 y luego el siguiente, de cinco, vino tanta agua sobre esta ciudad que casi todo el suelo de ella se anegó, sino fue en algunas pocas calles que estaban mas altas de otras. Fue la inundación y acometimiento del agua muy grande ... y hubo calles que se pasaron en canoas, por haber subido mucho el agua en ellas, que turbo la ciudad y la puso en aprieto...., y aunque el año siguiente por no ser muchas se fue secando, volvió luego de dos años a crecer el agua. Había una razón que hallar para esto. Podría ser un castigo particular con que Dios esta amenazado esta ciudad – comento Fray Juan-.

Esta verdad se verifica en todas estas llenadas de esta laguna. que se han ido llenado con la flor de la tierra que baja de las labores, y descubierto el tepetate y tasca que estaban debajo, sin tierra, y esfuerza confesar que la tierra que ahí falta, pues no se ha comprimido que ha ido a otra parte.

El Virrey Marques de Montes claros manda elevar las calzadas, reparar diques y colocar en varias partes compuertas para poder, con abrirlas o cerrarlas, controlar el flujo de las aguas. Remedios como siempre de última hora, que a la larga habrían dejado todo igual para la próxima inundación, que se esperaba tardara unos 20 años al menos. Pero la cosa no iba a ser así, ya que no pasaron tres años que las aguas volvieron a subir.

Era la segunda vez que Luis Velasco, hijo del virrey había mandado construir el Albarradon de San Lázaro, se hacia cargo del gobierno de la Nueva España; he aquí que, a menos de dos meses de la toma de posesión, la inundación se repite. Comenzado las lluvias por el mes de junio –anoto Enrico Martínez- fueron creciendo las aguas con tanta abundancia que la laguna se lleno mas que en ningún tiempo lo estuvo, y los ríos salieron de madre, llenando las acequias, y vertieron sobre la ciudad sus aguas, sin que se pudieran remediar tan grave daño, ni lo pudieron impedir ni resistir las albarradas y calzadas y otros reparos que se habían hecho: y estuvo la ciudad en tanto peligro que se temió haberla de desovar dejándola pérdida y con ella tantos y tantos nobles edificios, templos, monasterios y haciendas, que causaba gran confusión y lastima.

El 3 de septiembre el cabildo se reúne de urgencia, y acuerda, primero, implorar la intercesión de Nuestra Señora de los Remedios y San Gregorio Taumaturgo y segundo pedir al virrey que respecto de que ya los yacimientos no pueden entrar las acequias principales de la ciudad y calzada, y en muchas calles no pueden salir de la casa los vecinos si no es en canoas, que S.E. se servia que los naguatlatos hagan algunas canoas de los pueblos comarcanos de la laguna, para que se repartan por la ciudad.

Hacia falta pues proceder al desagüe de las lagunas, ¿pero, como, siendo la cuenca de México cerrada? Cada quien tenía una idea. Unos –escribía Joaquín Velásquez de León- proponían su desagua por la parte de oriente y sur, creyendo hacerla parte hacia comunicarla con alguno de los ríos que llevan sus corrientes al mar Pacífico; otros pensaban encaminarla por Acolan y Tecomoc: y otros, en fin llevarla hacia el rumbo del norte por Zumpango, Huehuetoca y Nochistongo, a comunicarla con el río de Tula que va a desembocar al seno mexicano. Cada uno persuadía su proyecto con mapas y medidas, y la posibilidad de los demás, con las mejores razones que encontraba; sin embargo era muy sensible entre todos la mayor probabilidad del de Huehuetoca, y nadie se atrevía a disputarle que, fuese física o moralmente imposible verificar por esta vía el desagüe general de la laguna, era muy hacedero echar por allí la de Zumpango, y sobre todo el río de Cuatlitlán, que justamente se había tenido por el mayor enemigo.

El Virrey envía regidores e ingenieros a medir la distancia entre el pueblo de Huehuetoca, el río Cuahutitlan y la laguna de Zumpango y Citlatepec. Y luego en viernes vino S.E. a Cuautitlan, y en el camino paro en el puente de Huhuetoca, y allí platicó Enrique Martínez del desagüe que dijo parecer el mejor, encaminándolo por allí desde la laguna de Citlatepec: y dijo que desde el principio hasta el fin del desagüe hay 14,850 varas de longitud, y que las ochocientas están abiertas por una cequia antigua, y que de profundidad por lo mas no tiene mas de 37 varas: y con esto llego S.E. a Cuautitlan y otro día a México.

Este Enrique – o mejor dicho Enrico- Martínez parecía ser de hecho el individuo mejor preparado y más experto. Justamente el año anterior había salido a la venta su tratado Repertorio de los tiempos e historia natural de la Nueva España que hasta le había valido el título de cosmógrafo real. No es que la solución que él preconizaba, de un túnel que saliese de Nochistongo hacia el norte, fuese nueva; ya le habían sugerido Francisco Gudiel en ocasión de la inundación de 1553 y Claudio Arciniegas luego de ocurrida la siguiente: pero ahora Martines la corrobora con un conjunto de datos precisos y mediciones razonablemente precisos.

El virrey nombra pues a Martínez, y con él al padre jesuita Juan Sánchez, como superintendentes de la obra; y el 28 de noviembre de la primera azadonada. La obra consistía en un tajo a cielo abierto de unos 6200 m de Zumpango a Huehuetoca y 4.20 m de alto, que sería excavado por tramos, bajando por lumbreras, y finalmente otro canal de 8600 m, que llevaba las aguas desde la salida hasta el río Tula. Siguiendo la tradición Azteca de movilizar en masa a la

gente para las obras publicas, parece que se emplearon en esta uno s quince mil peones, a los cuales no sólo hubo de proveer palas y azadones, sino para pagar salario, incluyendo los días de ida y vuelta de sus pueblos, y abastecer de carne, maíz y cal, Chile y sal, y rajas de leña para cocinar, De echo el personal obrero cambiaba continuamente porque existen testimonios de que en los primeros 6 meses habían servido en la obra 471, 514 hombres, m as 1664 cocineras.

Enrico tuvo bastantes dificultades, y esto desde el comienzo. ¿se recuerda que también el padre Sánchez había sido encargado de la superintendencia?, ahora bien en el discurso de la obra – anota Torquemada- se desavinieron los dos maestros, Sánchez y Martínez, contradiciéndose uno o otros; Porque, como somos hijos de diferentes madres, cada uno sigue su parecer, pareciéndonos que el nuestro es mas acertado.

Las criticas a Martínez no faltaron, porque desde 1609 el túnel se vio obstruido por derrumbes, y se dijo que, a pesar de tanto dinero gastado, se había vuelto a la situación anterior. Fue todo un escándalo, que llego hasta España, y el rey Felipe III ordeno al nuevo virrey, que era el arzobispo García Guerra, investigar cuanto tiempo requeriría y cuanto costaría perfeccionar el desagüe. Hubo informes, en particular del armero mayor Alfonso de Arias, condenando como inútil a la obra de Enrico, solo había servido para vaciar la laguna de Zumpango, pero estaba a u nivel demasiado elevado para desaguar las demás lagunas; las nivelaciones de Enrico habían sido equivocadas. Enrico por su parte, sostenía que la obra si había funcionado bien durante un año y que no sería muy claro volverla a activar y conservarla con buen mantenimiento. Además según él, era capaz de desaguar todo el valle si la canalización se prolongaba hasta la laguna de México.

Grandes Expertos en diques y drenajes eran lo holandeses; el rey, desorientado por tantas opiniones opuestas, decide contratar a Adrián Boot, conocido ingeniero holandés, y este llega a México con cedula real en septiembre de 1614. Tras una inspección decide sin mas que el desagüe no sirve para su objeto. Al oír esto Martínez insiste que, con 110 mil pesos y 4,300 peones que se le den en un plazo de 2 años y 3 meses el desagüe viejo funcionar perfectamente. Se le piden 12,000 pesos de fianza que el no tiene, y por lo tanto no puede dar, y se defiende: ¿cómo podría haber cumplido con el mantenimiento de la obra si no se le dio la gente? El arzobispo-virrey, que no quiere saber de lógica, ordena que lo aprisionen, y Enrico no puede salir de la cárcel sino después de haber dado en garantía parte de su salario.

Por su lado, Boot no quiere apartarse de las técnicas holandesas; cercar la ciudad con diques y sacar por encima de ellos el agua, por medio de bombas; obras que implicaban un costo y una duración mayores que las propuestas por Enrico. Una comisión de diez personas, entre ellos Alonso de Arias, cuyo juicio prevalece, desecha ambas propuestas.

Esta vez curioso y trágico –comenta Jorge Gurria- observar como la burocracia retrasaba y hacia nulos los esfuerzos para resolver el problema del desagüe.

En 1621 llega a Nueva España un nuevo virrey, don Diego Carrillo de Mendoza y Pimentel, marques de Gelves. Además del desagüe, dos eran los principales problemas de la colonia: el bandolerismo y la corrupción de la justicia. Gelves era hombre pragmático, energético y testarudo, sin duda habría de comprender, sin duda habría de comprender todo. Y en efecto, supo arreglar los dos últimos, pero el primero lo dejó peor de cómo estaba.

Decidió ocuparse del desagüe después de más de un año de su llegada; visitó las obras con el acostumbrado cortejo de técnicos, entre los cuales naturalmente estaban Boot y Martínez, y les pidió sus pareceres. Frente a las opiniones encontradas pidió ver los planos, luego concluyó que todo era confuso, que faltaban datos para asegurarse de sí el desagüe era o no necesario y que lo mejor era regresar a la situación inicial y ver lo que ocurría.

Gelves ordena que la obra del desagüe cese, Boot que en un principio no estaba en descontento con la medida, clavó estacas en la laguna, y en octubre fue con Enrico a medir cuánto habían subido las aguas; en efecto se habían elevado bastante, aun siendo el año benigno y Enrico solicitó volver a abrir el desagüe y concluir lo que faltaba. El virrey no decidió nada, pero el poco tiempo tuvo que salir huyendo de México por un alboroto popular.

Pasan los años; Martínez y Boot, compañeros de penas, se limitan a medir los niveles que la laguna va alcanzando en sus subidas y bajadas. En octubre de 1627 vuelven a inundarse los barrios de la ciudad. El cabildo se acuerda de la cédula de 1616 en que el virrey ordenaba continuar con el desagüe hasta que quede perfecto y acabado de todo punto, y pide el nuevo virrey, marques de Cerralvo, su cumplimiento. Así Martínez puede, en 1628, dejar la obra en condición de funcionar correctamente. Sin embargo, a mediados del año siguiente, al perecer para detener una caída de lajas, tapa la boca del túnel, las aguas del río Cuautitlán penetran a la laguna de Zumpango, esta desagua a la de San Cristóbal, y esta a la ciudad de México, agravando la inundación de la ciudad. Por colmo de males, el 21 de septiembre cae un verdadero diluvio por 36 horas sin interrupción, y la ciudad queda toda debajo del agua; y así estará inundada durante cinco años. Enrico Martínez es encarcelado, y luego puesto en libertad por necesitarse sus servicios, lo que uno de sus más venenosos enemigos, el arquitecto fray Andrés de San Miguel, comenta diciendo: "Cosa de admirar y en que se ve claro ser Enrico el Azote con que dios azota esta ciudad, pues habiendo cometido tantos y tan pesados yerros uno solo no bastaba para que otro hubiera perdido el reino o la vida.

Viejo, enfermo y descorazonado Martínez muere en 1632. Mientras tanto se continuó la obra con poco dinero, reemplazando paulatinamente el túnel por tajo abierto.

Una escritura de 1637 consideraba tres puntos: primero si para preservar a México de inundaciones, sería útil mantener el túnel de Huehuetoca, si, haciéndolo abierto y de mayor profundidad y anchura sería suficiente para desaguar la laguna de México; y si así fuera, sería posible conservarlo. El segundo punto era: si, no lográndose por Huehuetoca o por otro camino la

salida total de las aguas, se hubiese podido conservar México con diques. El tercero si, siendo posible lo uno y lo otro, seria necesario mudar la ciudad a otro sitio que se proponía estuviese en los llanos entre Tacuba y Tacubaya.

Las dudas acerca de la utilidad de la obra de Enrico Martínez nacían esencialmente del informe técnico presentado en contra del por Alfonso de Arias, el cual se apoyaba en un viejo criterio de Vitruvio. Considerado todavía como máxima autoridad en arquitectura, según el cual, para que corra el agua en un canal, haría falta una pendiente mínima de medio pie para cada cien pies. Pero esto no es así. Y Martínez tenía razón considerando poder desaguar por su túnel hasta el lago de Meció. Lo afirmaría en 1774 Joaquín Velásquez de León, luego de haber realizado unas nivelaciones que, entre otras cosas, confirmaron la bondad de aquellas realizadas en su debido tiempo por Martínez.

El Nivel del túnel de Nochistongo era pues suficiente para desaguar todo el valle. Quedaba la otra crítica que se le hacía tradicionalmente a Martínez, de haber preferido el túnel a un tajo abierto. De hecho el defecto estaba simplemente en la escasa capacidad del túnel y en no haberlo revestido. En su Ensayo político de 1808, Humboldt escribe: El proyecto de Enrico Martínez fue sabiamente concebido y se ejecuto con la rapidez maravillosa, la naturaleza del terreno y la forma del valle hacían necesario un horadamiento...

El problema hubiera sido resuelto de un modo completo y durable: primero, si se hubiese dado principio en un punto mas bajo, es decir, tal que correspondiese al nivel de lago inferior (lo que comprueba que Humboldt no se había fijado en la nivelación de Velásquez): y segundo si la galería se hubiese dado el corte elíptico, con bóveda también elíptica. El pasó subterráneo hecho por Martínez no tenía sino 15 m<sup>2</sup> de sección.

Martínez estaba Vindicado. Sin embargo, su solución no fue la definitiva. Velásquez había dejado esta interesante anotación: Habiendo leído en los documentos de la antigüedad que algunos proyectos del desagüe general entonces propuestos proponían conducir el agua de México al río Tequisquiác, y pareciendo a la vista suficiente el descenso, y más derecho y como el canal, determinamos nivelar también ese terreno.

La nivelación confirma la factibilidad del desagüe por Tequisquiác, y Velásquez lo recomienda: Aunque este cañón y las 25 lumbreras que le corresponden se fortificase todo interiormente de buena mampostería, no demandaría por eso mas costo de que la excavación y ampliación del canal de Huehuetoca.. Y por otra parte parece que esta obra se ejecutaría en más breve tiempo, y seria de más segura construcción y conservación.

Esto fue escrito en 1774. Hay que esperar hasta 1856 para que alguien proponga un proyecto que contemple un gran canal de desagüe y su salida por el túnel de Tequisquiapan: es Francisco Garay, que gana con el concurso abierto por el ministerio de Fomento con el objeto de resolver definitivamente el problema. Pasa otros diez años antes que, luego de las inundaciones de 1865, Maximiliano nombra a Garay director exclusivo y responsable, e

inspector de todos los trabajos en relación con la cuestión de aguas en el Valle de México. Conformada la viabilidad del proyecto Tequisquiac, Maximiliano ordena la iniciación inmediata del trabajo, y envía a Europa a Miguel Iglesias para comprar la maquinaria, un excavador para obrar en los tajos, unos locomóviles para desagües y extracción en las lumbreras, una maquina fija especialmente e para desagüe, y unas dragas para desazolve o excavación de lagos y canales.

La obra comprendía el gran canal, de 30.5 km de largo, entre el lago de Texcoco y el inicio del túnel cerca del extremo noroeste del lago de Zumpango, el túnel, de casi 10 km, que se atacaría por 24 lumbreras a unos 400 m de distancia una de otra, y el tajo de Tequiequiac, en la barranca que lleva el río de este nombre a juntarse con el de Tula. El centro de todas las operaciones fue el pueblo de Zumpango, donde se instalaron oficinas generales, almacenes y talleres. En el periodo de unos ocho meses y talleres. En el periodo de unos ocho meses se perforo como media profundidad de las lumbreras y se excavaron unos 70,000 m<sup>3</sup> de tierra en el tajo.

Las luchas para restaurar la República causaron una suspensión de un año a las obras, que luego se reanudaron con otro director, pero han de transcurrir mas de veinte años para que se prosiga en serio, bajo la dirección de Luis Espinosa, que se hace cargo personalmente de las partes más difíciles que las empresas constructoras extranjeras contratadas por el gobierno no logran completar.

Porfirio Díaz inaugura oficialmente, en 1900, esta obra que parece resolver por fin todo problema. Sin embargo, descargando al gran canal el drenaje urbano, notable obra de Robert Gayol, el funcionamiento correcto del sistema se ve comprometido por un lado por el hundimiento progresivo de la ciudad, y por otro el crecimiento, inicialmente normal, luego desorbitado de su población. La primera complicación hizo que la salida de las aguas servidas requería un sistema permanente de bombeo, la segunda volvía siempre más inadecuada la capacidad del desagüe: lo que finalmente ha dado solución al singular problema es la gran obra del drenaje profundo. <sup>(37)</sup>

## **Anexo 2**

### **Plantas de Tratamiento de Agua Residual Municipal a Nivel Nacional y para el Distrito Federal**

## Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales a Nivel Nacional

Entidad Federativa	No. de plantas en operación	Capacidad instalada (m <sup>3</sup> /s)	Caudal tratado (m <sup>3</sup> /s)
Aguascalientes	86	2.72	2.23
Baja California	15	4.44	3.90
Baja California Sur	15	1.08	0.76
Campeche	12	0.13	0.05
Coahuila	6	1.28	1.16
Colima	40	0.57	0.45
Chiapas	5	0.17	0.11
Chihuahua	56	5.13	3.77
Distrito Federal	28	7.03	3.65
Durango	87	3.43	2.34
Guanajuato	18	3.94	2.87
Guerrero	25	2.86	1.65
Hidalgo	11	0.10	0.07
Jalisco	73	2.77	2.22
México	52	6.62	4.55
Michoacán	13	1.14	0.66
Morelos	18	1.26	1.05
Nayarit	49	1.66	1.09
Nuevo León	55	12.25	8.64
Oaxaca	37	0.78	0.60
Puebla	28	3.10	2.32
Querétaro	48	0.91	0.62
Quintana Roo	14	1.54	1.02
San Luis Potosí	5	0.80	0.55
Sinaloa	47	3.00	2.38
Sonora	61	3.32	2.36
Tabasco	35	1.00	0.78
Tamaulipas	15	2.58	2.37
Tlaxcala	31	0.92	0.60
Veracruz	71	2.88	1.02
Yucatán	10	0.14	0.14
Zacatecas	11	0.18	0.16
<b>Total Nacional</b>	<b>1 077</b>	<b>79.73</b>	<b>56.14</b>

FUENTE: (9)

### Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en el Distrito Federal.

No.	Delegación	Nombre de planta	Proceso de tratamiento	CI (L/s)	CT (L/S)	Reuso	Organismo que opera
1	Alvaro Obregón	Santa Fe	Lodos Activado	280.0	0.0	ND	No opera
2	Azcapotzalco	U. H. El Rosario	Lodos Activado	25.0	16.0	Riego áreas verdes, llenado del lago, parque Tezozomoc	SACM operando
3	Coyoacán	Ciudad Universitaria	Lodos Activado	60.0	50.0	Áreas verdes	Ciudad Universitaria
4	Coyoacán	Coyoacán	Lodos Activado	400.0	250.0	Áreas verdes	SACM operando
5	Cuauhtémoc	U. H. Nonoalco Tlatelolco	Lodos Activado	22.0	15.0	Áreas verdes	SACM operando
6	Gustavo A. Madero	Acueducto de Guadalupe	Lodos Activado Convencional	87.0	76.0	Zona Ind. Vallejo, áreas verdes	Concesionada
7	Gustavo A. Madero	San Juan de Aragón	Lodos Activado Convencional	500.0	250.0	Áreas verdes, llenada de lago	SACM operando
8	Iztacalco	Ciudad Deportiva	Lodos Activado Convencional	230.0	130.0	Áreas verdes/reuso industrial	Concesionada
9	Iztacalco	U. H. Picos Iztacalco	Lodos Activado	13.0	10.0	Unidad Infonavit Iztacalco	SACM operando
10	Iztapalapa	Cerro de la Estrella	Lodos Activado	4000.0	2100.0	Áreas verdes, Zona Ind., Zona agrícola y chinampera de Xoxhimilco y Tláhuac	SACM operando
11	Iztapalapa	Santa Catarina	Espumación, filtración adsorción y desinfección	20.0	18.0	ND	ND
12	Miguel Hidalgo	Bosques de las Lomas	Lodos Activado	55.0	25.0	Áreas verdes	SACM operando
13	Miguel Hidalgo	Campo Militar No.1	Lodos Activado Convencional	30.0	25.0	Áreas verdes	Sedena operando
14	Miguel Hidalgo	Lomas de chapultepec	Lodos Activado Convencional	160.0	110.0	Áreas verdes, llenado de lago	SACM operando
15	Milpa Alta	San Pedro Atocpan	Físico-Químico, filtración	60.0	35.0	Riego agrícola	SACM operando

			rápida, tratamiento de lodos				
16	Tláhuac	La Lupita	Lodos Activado Convencional	15.0	14.0	Zona agrícola	SACM operando
17	Tláhuac	Paraje el Llano	Tipo modular pretratamiento fisicoquímico, biológico facultativo, filtración y desinfección rayos UV.	250.0	80.0	Riego agrícola y recarga de acuíferos	No opera
18	Tláhuac	San Andrés Mixquic	Físico- Químico, filtración rápida, tratamiento de lodos	30.0	30.0	Riego de hortalizas	SACM operando
19	Tláhuac	San Lorenzo	Aereación a contra corriente, filtración, tratamiento de lodos	225.0	50.0	Llenado de canales y recarga de acuífero	SACM operando
20	Tláhuac	San Nicolás Tetelco	Lodos Activado Convencional	15.0	1.0	Zona agrícola	SACM operando
21	Tlalpan	Abasolo	Lodos Activado Convencional	15.0	3.0	Áreas verdes	SACM operando
22	Tlalpan	H. Colegio Militar	Lodos Activado Convencional	30.0	ND	Áreas verdes	SACM operando
23	Tlalpan	Parres	Lodos Activado Convencional	7.5	7.5	Áreas verdes	SACM operando
24	Tlalpan	San Miguel Xicalco	Lodos Activado Convencional	7.5	7.5	Áreas verdes	SACM operando
25	Tlalpan	U. H. Pemex Picacho	Lodos Activado Convencional	13.0	9.0	Áreas verdes	SACM operando
26	Xochimilco	Milpa Alta rastros	Reactor anaerobico de flujo ascendente	30.0	0.0	ND	SACM operando
27	Xochimilco	Reclusorio Sur	Lodos Activado Convencional	30.0	19.0	Riego deportivo Xochimilco, Dativo. Cruz Azul	SACM operando
28	Xochimilco	San Luis Tlaxialtemalco	Lodos Activado Convencional con tratamiento de lodos	150.0	99.0	Canales zona turística chinampera	SACM operando
Subtotal				6760.0	3460.0		

FUENTE: (9)

### **Anexo 3**

## **Factores de Conversión de Diversas Sustancias a CaCO<sub>3</sub> y viceversa**

Sustancia	Formula	Peso atómico o peso molecular	Peso equivalente	conversión a CaCO <sub>3</sub>	de CaCO <sub>3</sub> a sustancia
Amoniaco	NH <sub>3</sub>	17	17	2.94	0.94
Hidróxido de amonio	NH <sub>4</sub> OH	35.1	35.1	1.42	0.7
Cloruro de amonio	NH <sub>4</sub> Cl	53.5	53.5	0.93	1.07
Bario	Ba	137.4	68.7	0.73	1.3
Calcio	Ca	40.1	20	2.5	0.4
Magnesio	Mg	24.3	12.2	4.1	0.24
Potasio	K	39.1	39.1	1.28	0.78
Dióxido de silicio	SiO <sub>2</sub>	60.1	30	0.83	1.2
Sodio	Na	23	23	2.18	0.46
Radicales ácidos					
Bicarbonato	HCO <sub>3</sub>	61	61	0.82	1.22
Carbonato	CO <sub>3</sub>	60	30	0.83	1.2
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	44	44	1.14	0.88
Cloruro	Cl	35.5	35.5	1.41	0.71
Ioduro	I	126.9	126.9	0.39	2.54
Nitrato	NO <sub>3</sub>	62	62	0.81	1.24
Hidróxido	OH	17	17	2.94	0.34
Fosfato	PO <sub>4</sub>	95	31.7	1.58	0.63
Sulfato	SO <sub>4</sub>	96.1	48	1.04	0.96
Ácidos					
Ácido acético	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	60.1	60.1	0.83	1.2
Ácido carbónico	H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	62	31	0.81	1.24
Ácido clorhídrico	HCl	36.5	36.5	1.37	0.73
Ácido nítrico	HNO <sub>3</sub>	63	63	0.79	1.26
Ácido fosfórico	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	98	32.7	1.53	0.65
Ácido sulfúrico	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	98.1	49	1.02	0.98
Ácido sulfhídrico	H <sub>2</sub> S	34.1	17	2.93	0.34

**Anexo 4**  
**Especificaciones de los Equipos**

- FG 101 Filtro pulidor de 5 micras y 10".incluye base y cartucho de 05 micras.
- FB 101 Cisterna almacén de agua residual tratada, material de concreto capacidad para 10 m<sup>3</sup>
- FB 102/103 Tanque almacén de químicos, capacidad de 0.2 m<sup>3</sup>
- DA 101 Suavizador compuesto por cama soporte, resina cationica, ciclo Na, tanque de salmuera con flotador con capacidad de intercambio de 30,000 granos, operación automática.
- GA 101 Bomba Centrifuga transportadora de agua, potencia de ½ HP
- GA 102/103 Bomba Dosificadora de químicos, actuada por selenoide potencia de 0.1 HP

**Anexo 5**  
**Insumos Químicos y Dosificación**

## **INHIBIDOR DE INCRUSTACION Y CORROSION MULTIFUNCIONAL KE - 3205**

El KE- 3205 es una formulación de una avanzada tecnología con inhibidores de incrustación y corrosión multifuncional formulado con agentes copoliméricos que ayuda a mantener los sólidos en suspensión y evita la corrosión del acero y del cobre así como sus aleaciones. No contiene metales pesados, por lo que no tiene problema de contaminación.

### **VENTAJAS**

- Es un producto orgánico, biodegradable y no contaminante
- No contiene cromatos
- Ofrece las mismas ventajas del cromato
- Trabaja a un rango amplio de pH
- Fácil de alimentar
- Es compatible con otros productos químicos
- Mantiene dispersos los sólidos en suspensión
- Evita la incrustación del carbonato de calcio
- Protege a los metales ferrosos y no ferrosos
- No contiene metales pesados

### **METODO DE ALIMENTACION**

El inhibidor KE-3205 debe ser dosificado en forma continua al agua de enfriamiento, en algún punto de flujo turbulento tal como la succión de la bomba de recirculación de agua. Puede ser alimentado por medio de una bomba dosificadora o directamente del recipiente.

### **CONTROL**

La alimentación del KE-3205 es controlada por análisis químicos, manteniendo un residual de 80 a 100 ppm en el agua de recirculación.

## **MICROBICIDA KM-4060**

El microbicida KM-4060 es un líquido, orgánico de amplio espectro, basado en la comprobada funcionalidad de las Isotiazolonas. Son biodegradables y muy efectivo a bajas concentraciones, para el control de bacterias, hongos y algas.

### **USO**

KM-4060 se emplea para controlar el crecimiento de bacterias, hongos y algas en torres de enfriamiento. Es particularmente efectivo cuando los depósitos son causados por bacterias de limo.

## VENTAJAS

- No se oxida y no es volátil.
- No corroe el metal del sistema.
- No es flamable.
- Compatible con otros tratamientos
- Tolera valores altos de pH y de sólidos en el agua.

## DOSIFICACION

Dosis inicial: si el sistema esta notablemente sucio, aplíquense choques semanales de 80 a 100 ppm y repítase esta dosificación hasta lograr el control.

Dosis subsecuentes: una vez alcanzado el control de bacterias, hongos y algas en el sistema aplíquese de 25 a 50 ppm por semana o lo necesario para mantener el control.

El Microbicida KM-4060 tiene propiedades biocidas en un amplio espectro de bacterias, hongos y algas de modo que prácticamente no tienen vacíos en su actividad biológica.

En forma enunciativa, más no limitativa listamos los microorganismos mas usuales que son efectivamente controlados por el Microbicida KM-4060:

Hongos:

<i>Aspergillius foetidus</i>	<i>Aspergillius niger</i>
<i>Aspergillius oryzae</i>	<i>Candida albicans</i>
<i>Chaetonium globusum</i>	<i>Cladosporium resinae</i>
<i>Giocladium fimbriatum</i>	<i>Lentinus lepideus</i>
<i>Gleophyllum trabeum</i>	<i>Mucor rouxii</i>
<i>Penicillum funiculosum</i>	<i>Penicillum variabile</i>
<i>Phoma herbarum</i>	<i>Aerobasidium pullulans</i>
<i>Rhizopus stolonifer</i>	<i>Rhodotorula rubra</i>
<i>Saccharomyces cervisiae</i>	<i>Trichophyton mentagrophytes</i>

Bacterias:

<i>Achromobacter parvulus</i>	<i>Alcaligenes faecalis</i>
<i>Azotobacter vinelandii</i>	<i>Bacillus cereus</i>
<i>Bacillus subtilis</i>	<i>Brevibacterium ammoniagenes</i>
<i>Cellulomonas sp</i>	<i>Enterobacter earogenes</i>
<i>Escherichia coli</i>	<i>Flavobacterium suaveolens</i>
<i>Nitrobacter agilis</i>	<i>Proteus vulgaris</i>
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	<i>Pseudomonas cepacia</i>
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	<i>Pseudomonas oleoverans</i>
<i>Salmonella typhosa</i>	<i>Shigella sonnei</i>
<i>Sarcina lutea</i>	<i>Staphylococcus epidermidis</i>

Staphylococcus albus
----------------------

Algas:

Anabaena flos-aquae	Chlorella pyrenoidosa
Chlorella oleofaciens	Calothrix parienta
Microeystis aeruginosa	Nostoc commune
Oscillatoria prolifera	Phormidium luridum
Scenedesmus quadicauda	Selenastrum capricornulum
Synechococcus leopoliensis	Schizothriz calcicola
Seytonema hofinanni	Ulothrix acuminata

## **Memoria de Cálculo**

## CALCULO DE SUAVIZADOR

Reunir la siguiente información:

- Flujo de Agua (expresado en galones)
- Horas de Operación
- Dureza Total del Agua (expresados en ppm o mg/l)

Divida la dureza del agua entre el factor de conversión 17.7 y obtendrá los Granos de resina que se necesitan para suavizar un galón de agua (GPG = Granos Por Galón).

Dureza total (ppm) ÷ 17.1 = GPG (Granos por galón)

Multiplique los GPG por el consumo de agua diario (gpd), para obtener cuantos granos son necesarios para suavizar toda el agua que se consume en un día

GPG x Galones por día = Granos necesarios en un día

Para obtener la cantidad de resina, es necesario definir cuanta sal requerimos para regenerar. Si la regeneración se hace con 15 lbs de sal por cada pie cúbico (ft<sup>3</sup>) de resina, entonces se obtendrá mayor capacidad de resina, pero un mayor consumo de sal. Por lo contrario, si se regenera con 5 lbs de sal por cada pie cúbico (ft<sup>3</sup>) de resina se obtendrá menor capacidad de resina pero un ahorro de sal.

1 ft<sup>3</sup> = 30,000 granos por 15 lbs. de sal

1 ft<sup>3</sup> = 25,000 granos por 10 lbs. de sal

1 ft<sup>3</sup> = 30,000 granos por 5 lbs. de sal

EJEMPLO: ¿Qué Suavizador necesitamos para un flujo de 24 (gpm) galones por minuto, con 16 horas. de operación y una dureza total de 334 partes por millón (ppm o mg/l)?

334 ppm / 17.1 = 19.53 granos por galón      24 gpm x 60 min x 16 hrs =  
23,040 galones por día

19.53 granos x 23,040 galones = 449,971 granos por día

449,971 / 30,000 granos = 14.99 ft<sup>3</sup>

15 pies<sup>3</sup> de resina = Modelos ES451, ES452, H450P

## NOTAS:

Los equipos siempre se diseñan con una regeneración a 15 lbs por ft<sup>3</sup>, lo que hace que el equipo sea el mas pequeño disponible. Recuperación de inversión rápida, alto consumo de sal.

Cuando se tiene grandes consumos de resina, los suavizadores se regeneran con 5 lbs de sal, esto es un 50% menor capacidad en la resina y un consumo de solo 33% de sal. Ahorro a largo plazo y retorno de inversión lenta.

## EQUIVALENCIAS:

Una 2parte por millón (ppm) es igual a un miligramo por litro (mg/l).

Un grano por galón ingles (GPG) equivale a 17.1 ppm.

## DEDUCCIÓN DE LOS CICLOS DE CONCENTRACIÓN

El Balance de agua en la torre de enfriamiento es:

$$Q_m = Q_b + Q_d + Q_s$$

Donde:

$Q_m$  = agua con calidad para torre para torre de enfriamiento (agua tipo) (l/min)

$Q_b$  = purga (l/min)

$Q_d$  = arrastre de agua (l/min)

$Q_e$  = perdida por evaporación (l/min)

$Q_d$  es lo suficientemente pequeña por lo que puede ser ignorada (0.05%).

De manera similar, el balance de sales en la torre es:

$$Q_m C_m = Q_b C_b + Q_d C_d + Q_e C_e$$

Donde:

$C_m$  = concentración de sal en el agua tipo (mg/l)

$C_b$  = concentración de sal en la purga (mg/l)

$C_d$  = concentración de sal en el arrastre (mg/l)

$C_e$  = concentración de sal en la evaporación (mg/l)

Ya que  $Q_d$  es apreciable, el término  $Q_d C_d$  puede ser omitido sin gran error; la concentración de sal en el agua evaporada también es despreciable, por lo que la expresión puede ser reducida con muy buena aproximación a:

$$Q_m C_m = Q_b C_b$$

La magnitud de la purga (y por lo tanto el flujo de agua tipo de repuesto), depende de la concentración de los precipitados potenciales en el agua de recirculación. La razón de la concentración de las sales en la purga " $C_b$ " a su concentración en el agua tipo " $C_m$ " es conocida como "ciclos de concentración".

Ciclos de Concentración =  $C_b/C_m = Q_m/Q_b = 9\text{m}^3/\text{día} / 2\text{m}^3/\text{día} = 4.5$  Ciclos de Concentración

Por lo que se puede apreciar en la última expresión que los ciclos de concentración son iguales a la razón del flujo de agua de alimentación (tipo) entre el agua perdida en la purga.