



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

E EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DEL
TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES
MUNICIPALES EN MÉXICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A
VICENTE FUENTES GURIDI

300082



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



VERDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/042/01

Señor
VICENTE FUENTES GURIDI
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora M.I. ALBA B. VAZQUEZ GONZÁLEZ, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DEL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES EN MEXICO"

- INTRODUCCIÓN**
- I. SITUACIÓN ACTUAL NACIONAL EN EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS MUNICIPALES
 - II. ACTIVIDADES DE INGENIERÍA BÁSICA DEL PROYECTO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO
 - III. OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES Y EVALUACIÓN DE SU EFICIENCIA EN LA REMOCIÓN DE SUS CONTAMINANTES
 - IV. EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES
 - V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 19 de marzo de 2001.
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GERF/GMP/mstg

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Esta dedicatoria y agradecimientos los escribo a todos aquellos que han estado cerca de mi durante periodos importantes de mi vida y por los que tengo un especial afecto por el simple hecho de ser como son.

Les dedico este trabajo y agradezco a mis padres quienes siempre me han apoyado en todo lo que hago. A mi Mama, por ser una amiga incondicional, por escucharme y aconsejarme cuando tanto lo he necesitado. A mi Papa por ser un ejemplo de rectitud y dedicación y quien me ha llevado de la mano por la vida.

A Ivy, por ser una gran compañera de barco, con quien he atravesado y superado infinidad de circunstancias tristes y bellas y quien además es un gran ejemplo de fortaleza.

A mi primo Xavier por ser un gran ejemplo de personalidad y por las pláticas tan enriquecedoras que siempre comparte conmigo. A Gildita, por ser mi prima consentida.

A mis amigos Carlos, Eduardo, Juan Carlos, Mario, Miguel y Roberto (mencionados por orden alfabético) quienes más que amigos los considero como hermanos y sin quienes mis pasos en este mundo serían insípidos.

A mi compañero y amigo Alberto, sin quien mi recorrido por la facultad hubiera sido difícil y aburrido.

Un especial agradecimiento a Alba por su dedicación y guía en la elaboración de éste trabajo.

A Wattsito por ser un gran compañero, siempre tan alegre y suavecito.

Por último quisiera agradecer a todas aquellas personas que aunque lejanas en tiempo y en espacio a mí, de alguna forma han influenciado en mi forma de pensar sentir o de actuar.

EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DEL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES EN MÉXICO

INDICE

Introducción	1
1. Situación actual nacional en el tratamiento de las aguas residuales municipales.	
1.1. Situación actual en el tratamiento de las aguas residuales.	3
1.2. Planes y programas de desarrollo gubernamentales en materia de tratamiento...7	
1.3. Legislación en materia de control y prevención de la contaminación del del agua	10
1.3.1. Ley de Aguas Nacionales	11
1.3.2. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.	11
1.3.3. Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996	12
1.3.4. Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996	13
1.3.5. Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997	13
1.4. Necesidad de reúso de las aguas residuales.....	14
2. Actividades de ingeniería básica del proyecto de plantas de tratamiento.	
2.1. Ingeniería básica.	17
2.1.1. Propuesta de operaciones y procesos unitarios para el tratamiento.....	17
2.1.1.1. Factores importantes en la elección de un proceso.....	17
2.1.1.2. Análisis cinético.....	19
2.1.1.3. Efecto de la variación de caudales y de las cargas de contaminantes sobre los procesos.	21
2.1.1.4. Cumplimiento de las normas vigentes.....	22
2.1.2. Muestreo, aforo y pruebas de tratabilidad.	24
2.1.3. Diagramas de flujo de los procesos de tratamiento.....	29
2.1.4. Datos básicos del proyecto y selección de criterios de diseño.....	30
2.1.4.1. Periodo de diseño	30
2.1.4.2. Caudales de diseño	31
2.1.4.3. Cargas de diseño	31
2.1.5. Balance de sólidos.....	33
2.1.6. Perfil hidráulico.....	33
2.1.7. Selección del sitio para la ubicación de la planta de tratamiento	34

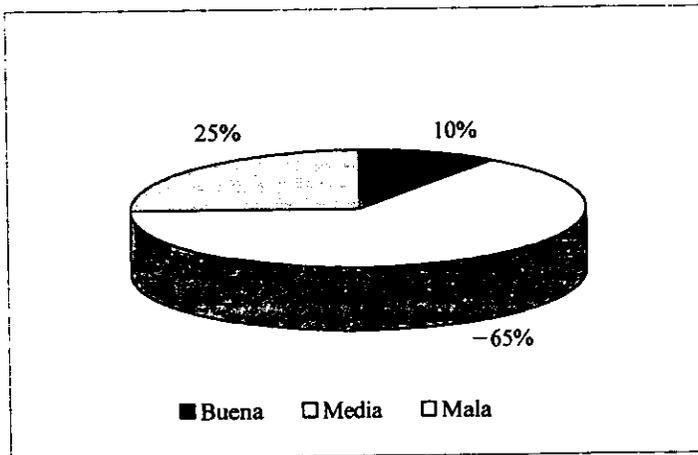
3. Operaciones y procesos unitarios utilizados en el tratamiento de las aguas residuales municipales y evaluación de su eficiencia en la remoción de sus contaminantes.	
3.1. Descripción y evaluación de eficiencia en remoción de contaminantes de las operaciones y de los procesos convencionales de tratamiento.....	35
3.1.1. Pretratamiento.....	35
3.1.1.1. Rejillas o cribas.....	35
3.1.1.2. Desarenadores.....	36
3.1.2. Tratamiento primario.....	38
3.1.2.1. Tanques Imhoff.....	38
3.1.2.2. Sedimentación primaria	38
3.1.3. Tratamiento secundario.....	40
3.1.3.1. Lagunas de estabilización.....	45
3.1.3.2. Lodos activados.....	48
3.1.3.3. Filtros percoladores.....	52
3.1.3.4. Discos biológicos rotatorios.....	54
3.1.3.5. Procesos anaerobios.....	56
3.1.4. Desinfección.....	58
3.2. Comparación y evaluación técnica de los procesos convencionales de tratamiento.....	59
3.2.1. Clasificación de los procesos de tratamiento.....	59
3.2.2. Comparación y evaluación técnica	59
4. Evaluación económica del tratamiento de aguas residuales municipales.	
4.1. Descripción de la integración de los costos de inversión.....	63
4.1.1. Obra civil.....	64
4.1.2. Equipo electromecánico.....	64
4.1.3. Terreno.....	64
4.2. Descripción de la integración de los costos de operación y mantenimiento.....	65
4.2.1. Personal.....	66
4.2.2. Manejo de lodos.....	66
4.2.3. Energía	66
4.2.4. Insumos	67
4.2.5. Mantenimiento	67
4.2.6. Costos adicionales	67
4.3. Evaluación económica: caso estudio.....	68
4.3.1. Costos de inversión	68
4.3.2. Costos de operación y mantenimiento	71
4.4. Comparación y evaluación económica de algunos procesos de tratamiento....	71
5. Conclusiones y recomendaciones.....	77
Referencias	83

INTRODUCCIÓN

La mayoría de los cuerpos de agua superficiales del país reciben descargas de aguas residuales sin tratamiento, ya sea de tipo doméstico, industrial, agrícola o pecuario, lo que ha ocasionado grados variables de contaminación que limitan el uso directo del agua.

De acuerdo con resultados de evaluaciones de calidad del agua, realizados por la Comisión Nacional del Agua, para el periodo 1974-1995, las cuencas con mayor grado de contaminación son las de Lerma, Alto Balsas, Alto Pánuco y porciones del Bajo Bravo. Se concluyó que prácticamente todos los cuerpos de agua importantes tienen grandes zonas contaminadas.

La información del índice de calidad del agua de la CNA de 1998 indica que a nivel nacional las aguas superficiales presentan buena calidad en el 10% de los casos, calidad media en el 65% y mala en el 25%.



Fuente: CNA, "El agua en México: Retos y avances"

Figura I.1
Calidad de las aguas superficiales en México

El crecimiento explosivo de las grandes ciudades, ha obligado al uso mayoritario de las aguas superficiales en el abastecimiento público y en la generación de energía eléctrica, como consecuencia, el sector agrario ha recurrido al uso de las aguas residuales para el riego. La literatura al respecto registra la existencia de 350 000 ha en México regadas directamente con agua residual cruda. Esto es sólo la punta del iceberg; una cantidad superior es irrigada con aguas que superan ampliamente el máximo permisible recomendado de coliformes fecales por la Organización Mundial de la Salud (1 000 CF/100 ml).

Las situaciones endémicas de diarreas, parasitismo, fiebre tifoidea, salmonellosis y el cólera, son la evidencia de la existencia de patógenos transportados por los ríos y lagos contaminados con aguas residuales. Es necesario tomar conciencia y corregir esta

situación, producto de la poca atención que hemos brindado al reúso del agua sin riesgos para la salud.

No existe una percepción cabal de los riesgos para la salud originados por la disposición de las aguas residuales sin tratamiento previo. Sin embargo, cuanto mayores son los niveles de contaminación bacteriológica, mayores son los niveles de exposición de la población y los riesgos para la salud; consecuentemente, mayor es el impacto económico derivado de la contaminación.

De acuerdo con la información del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, las enfermedades infecciosas intestinales ocuparon en 1996 el décimo lugar entre las causas de muerte en el país.

Debido a esto, es necesario que en nuestro país se implanten acciones urgentes para mejorar la calidad del agua.

Una gran problemática es la falta de recursos económicos en México, por lo que es necesario construir proyectos viables de plantas de tratamiento, en los cuales se escojan cuidadosamente las operaciones y procesos más adecuados para las condiciones actuales del país.

Actualmente existe una gran diversidad de procesos de tratamiento de agua residual, que varían tanto en la calidad del efluente, como en sus costos de construcción, operación y mantenimiento. También algunos de ellos son fáciles de operar, mientras que otros requieren de personal altamente calificado.

El objetivo general de éste trabajo es hacer una comparación de las operaciones y procesos unitarios de tratamiento de aguas residuales municipales más comunes, para poder concluir cuales de ellos se adecuan mejor a las condiciones actuales de nuestro país.

El capítulo 1 se describe las condiciones actuales en el tratamiento de las aguas residuales municipales en México, las leyes y normas de calidad de del agua y los planes y programas que se tiene para atacar el problema.

El capítulo 2 contiene la información básica necesaria para la elaboración de un proyecto de una planta de tratamiento de agua residual.

El capítulo 3 presenta las ventajas y desventajas técnicas de cada proceso. Además incluye una comparación donde se destacan las cualidades de los distintos procesos para remover materia orgánica, sólidos suspendidos y patógenos presentes en los influentes. El propósito de ésta evaluación es establecer en que medida los procesos unitarios cumplen con la eliminación de contaminantes presentes en el agua residual de tipo municipal.

Por último, el capítulo 4 incluye algunos ejemplos de costos de construcción, operación y mantenimiento de reactores UASB, discos biológicos rotatorios, aereación extendida y filtro percolador-reactor UASB, los cuales han sido utilizados en nuestro país. Además se describe detalladamente como se integran dichos costos.

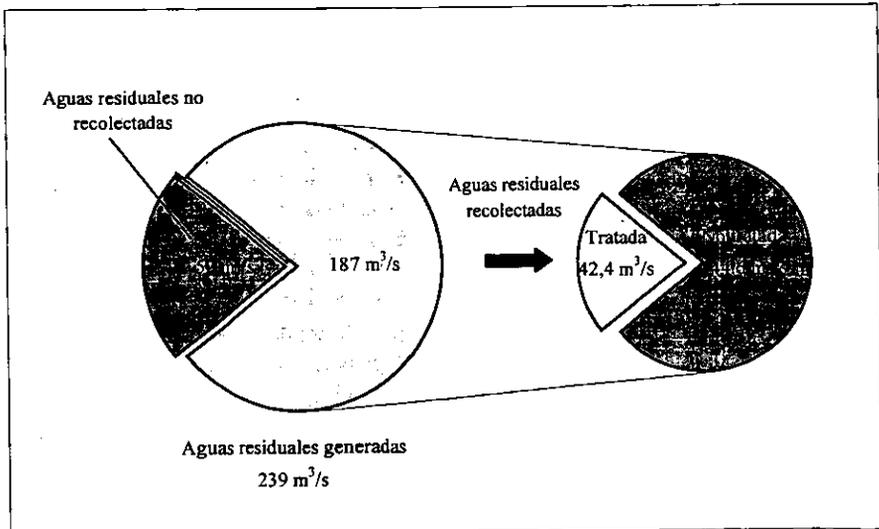
1. SITUACIÓN ACTUAL NACIONAL EN EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES.

1.1. Situación actual en el tratamiento de las aguas residuales.

Durante varios años, el país ha soportado la degradación de sus cuerpos de agua, la deforestación de sus campos y la acumulación de desechos sólidos y gaseosos en sus centros urbanos, entre los fenómenos propios de un crecimiento económico poco respetuoso de la naturaleza y de sus recursos. El rápido crecimiento de la población, aunando a lo limitado de los recursos económicos ha provocado que servicios básicos como el abastecimiento de agua potable y la evacuación de las aguas de desecho no sean suministrados al ritmo requerido. En México, la infraestructura para la recolección, el tratamiento y la evacuación de las aguas residuales domésticas se encuentra muy rezagada, sobre todo si se compara con lo realizado para el suministro de agua potable.

A principios de 1989, el tratamiento de aguas residuales presentaba un gran rezago ya que tan sólo se contaba con 256 plantas de tratamiento con una capacidad conjunta de $14.3 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondiente al 12% del total de aguas residuales.

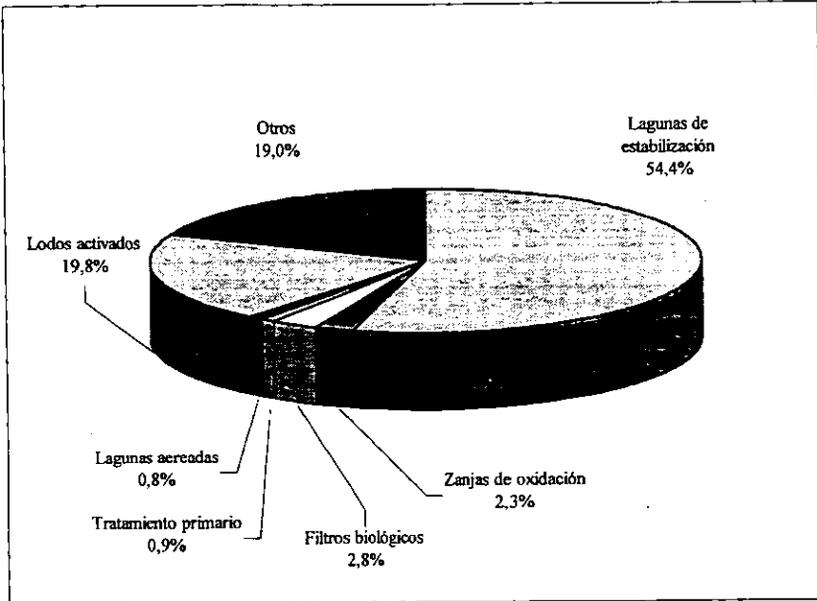
Como cifras de referencia, la Comisión Nacional del Agua estimó que la generación de aguas residuales de origen municipal en 1997 fue de $230 \text{ m}^3/\text{s}$. En este año se contaba con 808 plantas municipales de tratamiento con una capacidad total de $55 \text{ m}^3/\text{s}$, lo cual equivale a un 24% del total generado. Sin embargo, esta capacidad instalada no estaba toda en operación y durante ese año solo se trataron $32 \text{ m}^3/\text{s}$, lo cual equivale a un 58% de la capacidad instalada y un 14% del caudal total generado.



Fuente: Revista Ciencia y Tecnología abril / junio 2000

Figura 1.1
Aguas residuales municipales generadas en México en 1999

A diciembre de 1999, se tienen en inventario 1000 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales las cuales suman una capacidad instalada de $67.5 \text{ m}^3/\text{s}$, de las cuales 777 se encuentran en operación con gasto tratado de $42.4 \text{ m}^3/\text{s}$, se recolectan en alcantarillado $187.0 \text{ m}^3/\text{s}$, por lo que 21.8% del total de aguas residuales procedentes de localidades urbanas a nivel nacional reciben tratamiento. Cabe señalar que de los $42.4 \text{ m}^3/\text{s}$ de aguas residuales tratadas, solo el 29.0% (12% del caudal generado, que es de $239 \text{ m}^3/\text{s}$) cumplen con la norma oficial mexicana NOM-001-ECOL-1996. La figura 1.1 muestra la situación de las aguas residuales municipales generadas en 1999 en nuestro país.



Fuente: CNA, "El agua en México: Retos y avances"

Figura 1.2

Procesos de tratamiento utilizados para efluentes municipales

Los procesos utilizados para el tratamiento de efluentes municipales son diversos, los porcentajes de los procesos utilizados para la de remoción de contaminantes en las 1000 plantas de tratamiento reportadas hasta diciembre de 1999 son los mostrados en la figura 1.2, en la cual se puede observar que en nuestro país predominan como procesos de tratamiento las lagunas de estabilización y los lodos activados.

La mayoría de los cuerpos de agua superficiales del país reciben descargas de aguas residuales sin tratamiento, tanto domésticas, industriales, agrícolas y pecuarias. Esto ha ocasionado diversos grados de contaminación en los cuerpos receptores que limitan el uso directo del agua.

En México existen 314 cuencas de ríos superficiales, de las cuales se han estudiado 228, que cubren el 80 % del territorio nacional, donde se asienta el 95 % de la

población, el 75 % de la producción industrial y el 98 % de la superficie de riego. En 20 cuencas se genera más del 80 % de la carga orgánica total del país, medida en términos de demanda bioquímica de oxígeno. Dentro de estas cuencas se encuentran las del Valle de México, Lerma, San Juan y Pánuco, que reciben más del 50 % de las descargas de aguas residuales.

La gravedad de la situación exige una solución a corto plazo, por su parte, el Gobierno Federal esta tomando las siguientes medidas para prevenir la contaminación de los acuíferos:

- Saneamiento y reglamentación de acuíferos.
- Establecimiento de normas que regulan y controlan el vertimiento de aguas residuales a los diferentes cuerpos receptores de la Nación.
- Programas de saneamiento de cuencas, entre los que sobresale el Programa de Agua Limpia y el Programa de Saneamiento de la Frontera Norte.
- Está en proyecto la NOM-008-CNA-1997 para disposición de aguas residuales a suelos y subsuelos.
- La CNA estudia y prioriza las cuencas hidrológicas por el grado de contaminación en sus cuerpos de agua, para instrumentar las estrategias del sector hidráulico.
- Se construyen colectores marginales para el saneamiento de cauces y barrancas.

Con respecto a los recursos financieros, se estima que para la próxima década, las adquisiciones de tecnologías excederán los 30 millones de dólares; además, el abastecimiento del agua al ritmo de la demanda creciente en las regiones, donde se localiza el mayor volumen de extracción y mayor dinámica por la actividad económica y creciente poblacional, cada vez es más caro y complejo, los costos promedio de extracción, suministro, potabilización y tratamiento se incrementan obviamente en los sitios de escasez relativa y donde existe contaminación. Se estima que la inversión requerida para agregar un metro cúbico de suministro anual durante el periodo 1976-1996, fue en promedio 2.5 veces mayor que la que se necesitó en el periodo de 1950 a 1975, a precios constantes de 1996.

Tecnologías y Formación de Capacidades

En México se han emprendido diversas investigaciones relacionadas con el manejo del agua y sus correspondientes tecnologías en virtud de las desigualdades hidrológicas que existen entre las diferentes regiones, por la sobreexplotación superficial y subterránea, así como por la contaminación del vital líquido.

La investigación y el desarrollo tecnológico producen impactos significativos en la definición de políticas, la operación de infraestructura y la administración del agua. Existen diversas instituciones tanto a nivel nacional como regional que abordan los temas relativos al agua, siendo la principal fuente de financiamiento el sector gubernamental. Un ejemplo de una de éstas instituciones es el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, el cual provee del apoyo tecnológico al sector hidráulico y desarrolla y transfiere tecnología en áreas como el tratamiento y calidad del agua.

Además, las instituciones de investigación y de educación superior del país llevan a cabo investigaciones sobre la degradación de sustancias tóxicas de efluentes

industriales y se han estudiado distintas técnicas como la biomasa fija, el carbón activado, los reactores anaerobios, las membranas, las plantas acuáticas, la desorción, las lagunas de estabilización y la fotocatalisis. También, se han desarrollado diversas investigaciones para la modelación de sistemas de lodos activados, el transporte de contaminantes, los riesgos de intoxicación asociados a cultivos irrigados con aguas residuales, así como el desarrollo de nuevos métodos de separación y análisis de contaminantes y calidad del agua.

Financiamiento

La política establecida en materia de agua considera como uno de los puntos centrales la suficiencia financiera para la construcción, operación y conservación de la infraestructura.

La estrategia financiera del sector se ha desarrollado en las siguientes vertientes:

- Integrar los recursos de la federación, los estados y municipios para realizar programas específicos establecidos de común acuerdo.
- Fortalecer las finanzas de los organismos operadores y asociaciones de usuarios, como un instrumento de la política fundamental para eliminar progresivamente los subsidios innecesarios.
- Diversificar las fuentes de financiamiento, incluyendo la participación del sector privado, con objeto de lograr mayor concurrencia de recursos hacia los programas de desarrollo hidráulico.

En virtud de que los recursos fiscales no son suficientes para atender las necesidades del sector, se han obtenido recursos de fuentes de financiamiento que le permiten a la Comisión Nacional del Agua financiar sus programas de inversión, aprovechando líneas de crédito preferencialmente con tasas de interés competitivas y largos periodos de amortización.

Participación del sector privado

Debido a la necesidad de recursos financieros para atender las demandas de saneamiento del agua, se plantea la posibilidad de complementar la inversión del Estado con una amplia participación del sector privado.

En los últimos años el sector privado ha incursionado en el diseño y construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales, principalmente bajo la modalidad de construir, operar y transferir (BOT) con esquemas en los que el Gobierno Federal, ha apoyado con recursos adicionales al capital de inversionistas, y como subsidio en aquellos casos en los que los ingresos de la población han sido insuficientes para impactar la tarifa en su totalidad.

En la década de los noventas se licitaron un total de 50 plantas de tratamiento de aguas residuales bajo esquemas tipo BOT, programa que resulto ser demasiado ambicioso, ya que se vio afectado por aspectos de orden financiero, jurídico-regulatorio y contractual. De estas licitaciones, actualmente existen 12 plantas de tratamiento en operación, 6 en construcción, 12 se encuentran en proceso de renegociación de contratos y 20 proyectos han sido cancelados.

Un estudio hecho por la Comisión Nacional del Agua, estableció que los principales requisitos para una participación exitosa del sector privado en el país consiste en:

- 1) Un marco legal y regulatorio que permita una relación equitativa, confiable, permanente y estable, tanto para el prestador de servicios como para las autoridades y la comunidad.
- 2) Es necesario establecer esquemas que permitan la actualización continua y oportuna de las tarifas, evitando su desvinculación con las decisiones de orden político, ya que de ésta forma se garantizará la fuente de repago de la inversiones.

1.2. Planes y programas de desarrollo gubernamentales en materia de tratamiento.

En nuestro país se tiene un plan de saneamiento, en el cual se describen las obras que se deben realizar para cumplir con los objetivos de los programas nacionales, estatales y locales tomando en cuenta la urbanización actual y futura de las distintas comunidades. Existen diversos factores que dificultan la elaboración de un plan de saneamiento integral, y entre los más comunes se encuentran la aparición de ciudades perdidas y modificaciones en los proyectos de ocupación del suelo, lo cual provoca que la infraestructura se ejecute atendiendo a las necesidades urgentes, sin prever las condiciones en el futuro. En los últimos años, los proyectos de saneamiento han estado enfocados totalmente a incrementar la cobertura de distribución de agua. La principal causa del fracaso de los programas de saneamiento se debe a no haber tomado en cuenta las necesidades de los usuarios, provocando esto, que los proyectos se han realizado con base en demandas hipotéticas, estimadas a partir de proyecciones de crecimiento poblacional y desarrollo económico. Esta situación ha arrojado proyectos diseñados con estándares tecnológicos y soluciones de países desarrollados, los cuales no suelen ser viables en nuestro país.

Actualmente existen alrededor de 154 mil localidades con población menor de 2,500 personas, 108 mil de estas localidades tienen menos de 1,000 habitantes y en ellas más 5 millones de mexicanos que viven en condiciones de marginación alta y muy alta. Aunque la dispersión de comunidades hace necesario efectuar inversiones cuantiosas, solo justificables en términos de beneficio social, es menester dotar de agua potable a la población rural. El Programa de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, contribuye al cuidado de la salud, al mejoramiento de calidad de vida de la población y al control del deterioro en los cuerpos de agua. Dentro de este Programa se cubre al medio rural, en comunidades de menos de 2500 habitantes, en donde se concentra el 75% de la población nacional que vive en pobreza extrema

El Programa Hidráulico 1995-2000, establece varias metas para cubrir el abastecimiento y saneamiento de agua, dentro de éstas, en materia de saneamiento del agua sobresalen las siguientes:

- Atender el rezago de servicios en las zonas rurales y poblaciones marginadas, con apoyo gubernamental, federal, estatal y municipal, así como la participación de los sectores de la población.

- Apoyar para elevar el saneamiento de 5.5 millones de habitantes en 1995 a 15.1 millones de habitantes para el año 2000.
- Incrementar el tratamiento de aguas residuales de origen urbano de 0.54 km³/año (41.2 m³/s) a 2.6 km³/año (82.4 m³/s), incluyendo los costos de rehabilitación de infraestructura existente y la construcción de nuevos sistemas.
- Apoyar a los gobiernos estatales y municipales para que traten las aguas residuales, domésticas e industriales en las 22 ciudades de la frontera norte.

También con la colaboración de la CNA, se han desarrollado programas específicos, de los cuales en materia de saneamiento sobresalen los siguientes:

Programa Sectorial de Agua Potable y Saneamiento II. Su propósito es apoyar la ejecución de los programas de agua potable y saneamiento, desarrollo institucional, apoyo a organismos operadores e implantación de políticas orientadas a incrementar los ingresos.

Programa para la Sostenibilidad de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento en Comunidades Rurales. Su finalidad es apoyar el proceso de desarrollo del subsector agua y saneamiento en comunidades rurales, mediante la aplicación de normas que garanticen la calidad de los servicios.

Programa de Saneamiento del Valle de México. El objetivo del programa es desalojar en forma eficiente las aguas negras de la Zona Metropolitana del Valle de México, así como darles tratamiento antes de su incorporación a los distritos de riego que actualmente utilizan aguas negras.

Programa de Agua Potable y Saneamiento en Baja California. Su objetivo es ampliar y mejorar los sistemas de agua potable y saneamiento en las ciudades de Tijuana, Ensenada y Mexicali.

Con lo que respecta a los resultados obtenidos de los programas, la Comisión Nacional del Agua publicó en el informe Compendio Básico del Agua en México que para diciembre de 1999 la capacidad instalada era de 67.5 m³/s pero el gasto tratado alcanzaba tan solo 42.4 m³/s, mientras que la meta deseada era de 82.4 m³/s. De acuerdo a éstas cifras, podemos observar que a pesar de la implantación del Programa de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, no se pudieron cumplir las metas deseadas.

A pesar de los esfuerzos realizados en los últimos años y de los notables avances, los recursos financieros de las fuentes convencionales son insuficientes y probablemente serán cada día más escasos. Queda por resolver una problemática compleja, en la que destaca en el aspecto social, un rezago en coberturas de agua potable y saneamiento, sobre todo en comunidades rurales y en el aspecto ambiental, la contaminación de las aguas superficiales, la degradación de las aguas superficiales y en general, el deterioro de las cuencas.

Sin embargo las acciones realizadas permitieron logros significativos como son la construcción de infraestructura en el campo del saneamiento del agua, especialmente en áreas rurales.

Un grave error en los planes de saneamiento ha sido que generalmente la adquisición de infraestructura se hace con base en los costos. Se propone que además se ponderen los aspectos técnicos, ecológicos y económicos más apropiados para cada contexto, para evitar las consecuencias desfavorables que comúnmente padecemos al término de los proyectos.

El horizonte al año 2006

Actualmente se está desarrollando el Plan Nacional Hidráulico 2001-2005. Debido a los fracasos observados en los planes anteriores, en materia de tratamiento, se debe contemplar en éste Plan la factibilidad y viabilidad del proyecto en forma integral y durante el tiempo proyectado, para que redunde en verdaderos beneficios para la población y no solo en cifras estadísticas para justificar el gasto público o el financiamiento externo.

En el caso del agua potable, alcantarillado y saneamiento, para cubrir los rezagos en el medio rural, los recursos financieros federales estarán dedicados esencialmente a proporcionar los servicios a 3.9 millones de nuevos usuarios durante éste sexenio. Simultáneamente, se instrumentarán programas de fortalecimiento de autoridades locales para incrementar su presencia en la ejecución de los proyectos rurales con el apoyo operativo que sea necesario a fin de asegurar la sustentabilidad.

En las zonas urbanas, las líneas de acción incluirán programas de capacitación intensivos para el personal de los organismos operadores con el propósito de incrementar sustancialmente la eficiencia del sector, actividad en la cual el Centro Mexicano de Capacitación en Agua y Saneamiento desempeña un papel esencial. Simultáneamente se acelerará la adecuación de la estructura legal y administrativa de los gobiernos estatales, en relación con los servicios de agua potable y saneamiento, para fomentar la participación del sector privado en aquellos casos en los que se considere conveniente, especialmente en ciudades de más de 50 000 habitantes.

Las metas para el año 2006 son duplicar el porcentaje de tratamiento de aguas residuales municipales, así como cubrir con la tarifa al costo de la operación, mantenimiento y parcialmente la amortización de las inversiones.

Una visión del futuro.

La Comisión Nacional del Agua ha efectuado estudios, en los que evalúan diferentes escenarios de las tendencias futuras en las que se encontrará el agua en nuestro país. Se analizaron escenarios de oferta-demanda a lo largo del periodo 2000-2025 para determinar la infraestructura necesaria. El crecimiento de la demanda se basa en la hipótesis sobre el crecimiento demográfico y económico del país.

Entre los escenarios estudiados, dos contrastan en los patrones del uso del agua. En el primero de ellos (escenario tendencial) se considera que se cumple con las fechas establecidas en la Norma Oficial Mexicana NOM-ECOL-001-1996 para las descargas de aguas residuales municipales; en el segundo (escenario deseado) se establecen características de mejor eficiencia, en la cual se considera que prácticamente toda la población tendrá acceso a los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 1.1.

Tabla 1.1

ESCENARIOS DEL SANEAMIENTO DEL AGUA MUNICIPAL EN MEXICO			
Parámetro	Valor base (1998)	Escenario futuro (2025)	
		Tendencial	Deseable
Cobertura Saneamiento Municipal	21.8 %	60.0 %	90.0 %

Fuente: CNA, "El agua en México: Retos y avances"

1.3. Legislación en materia de control y prevención de la contaminación del agua.

El marco legal y regulatorio para el manejo, desarrollo y saneamiento del recurso agua es el siguiente:

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Art. 27 párrafo V. Define los cuerpos de agua que son propiedad de la Nación y aquellos que tienen un propietario distinto.

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA). Publicada en 1988; con fecha 13 de diciembre de 1996 se publicó el Decreto por el que se reforma la LGEEPA

Ley de Aguas Nacionales. Aprobada en 1992, con el fin de estructurar la administración del recurso y responder a las políticas y redefiniciones del papel del Estado en torno al aprovechamiento y administración del agua. Asimismo, se elaboró un anteproyecto de reformas al **Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales (1994)**, para incorporar la figura de Consejos de Cuenca, señalar la caducidad del derecho de aprovechamiento de aguas nacionales y la transmisión de los derechos para su uso y aprovechamiento.

Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 1997. Aprobada para la instrumentación de criterios económicos en la administración de los usos del agua. En ella se establece el pago de derechos por el uso o aprovechamiento de bienes del dominio público. Incluye dos principios:

- El agua tiene un valor económico en función de su disponibilidad
- La sociedad adopta como principio fundamental : "el que contamina debe pagar los costos de la descontaminación".

Ley General de Salud. Art. 122. Se ocupa de la calidad del agua, aunque desde una perspectiva circunscrita a la salud humana, estableciendo que queda prohibida la descarga de aguas residuales o de contaminantes, en cualquier cuerpo de agua superficial o subterráneo, cuyas aguas se destinan para uso o consumo humano. También establece que los usuarios que utilicen aguas que posteriormente serán utilizadas para uso o consumo de la población, están obligadas a darles el tratamiento correspondiente a fin de evitar riesgos para la salud humana.

1.3.1. Ley de Aguas Nacionales

La Ley de Aguas Nacionales tiene como fin la modernización, planeación y programación de la administración y del uso eficiente y racional del agua en nuestro país. El marco legislativo tiene su fundamento en el Artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Esta ley tiene como objetivo regular la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad.

El Título Séptimo de la Ley de Aguas Nacionales "Prevención y control de la contaminación de las aguas", estipula un sistema obligatorio de permisos de descargas para aquellos que las canalizan hacia los cuerpos de aguas nacionales. Los derechos y obligaciones adquiridos por los concesionarios, asignatarios y permisionarios de aguas nacionales y bienes asociados se establecen en títulos emitidos por la Comisión Nacional del Agua (CNA). La CNA se consolida como autoridad única en materia de agua y fortalece sus funciones normativas a nivel federal y regional, de apoyo técnico especializado y promotora del desarrollo hidráulico.

Dentro de esta ley, se mencionan los Consejos de Cuenca, los cuales son instrumentos de coordinación y concertación para dar agilidad y ordenar la atención de la agenda del agua en cada cuenca. Los Consejos, como lo señala el Programa Nacional Hidráulico 1995-2000 y las estrategias del sector hidráulico y el Programa de Modernización del Manejo del Agua (PROMMA), apoyan la administración del agua, el fomento a su uso eficiente, la programación hidráulica regional, el saneamiento de las aguas superficiales, y en su sentido más amplio la gestión del agua por cuenca hidráulica.

1.3.2. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.

En esta Ley, en el título cuarto, dedica el capítulo III a la prevención y control de la contaminación del agua y de los ecosistemas acuáticos.

El capítulo tiene como objetivo fijar los lineamientos a seguir para mantener el equilibrio de los ecosistemas acuáticos, entre ellos, señala que las aguas residuales de origen urbano deben recibir tratamiento previo a su descarga en ríos, cuencas, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua, incluyendo las aguas del subsuelo.

Dentro de los aspectos de interés para esta tesis, resalta el artículo 119 de la LEGEEPA, el cual señala que La Secretaría expedirá las Normas Oficiales Mexicanas que se requieran para prevenir y controlar la contaminación de las aguas nacionales, conforme a lo dispuesto en ésta Ley, en la Ley de Aguas Nacionales, su Reglamento y las demás disposiciones que resulten aplicables. Por su parte el artículo 121 establece que no podrán descargarse o infiltrarse en cualquier cuerpo o corriente de agua o en el suelo o subsuelo, aguas residuales que contengan contaminantes, sin previo tratamiento y el permiso o autorización de la autoridad federal, o de la autoridad local en los casos de descargas en aguas de jurisdicción local o a los sistemas de drenaje y alcantarillado de los centros de población.

También la LEGEPA encarga de fijar las responsabilidades para el tratamiento de las aguas residuales así como de la vigilancia del cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas.

1.3.3. Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996.

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta Norma Oficial Mexicana no se aplica a las descargas de aguas provenientes de drenajes separados de aguas pluviales.

Los límites máximos permisibles de contaminantes, se clasifican en básicos, tóxicos y microbiológicos. Los básicos incluyen: temperatura, grasas y aceites, materia flotante, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno total y fósforo total. Los contaminantes tóxicos incluyen: arsénico, cadmio, cianuro, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo y zinc. Los límites máximos permisibles se establecen en función del cuerpo receptor (ríos, embalses naturales y artificiales, aguas costeras, suelo y humedales naturales) y del uso (público urbano, agrícola, protección a la vida acuática).

En cuanto a los límites máximos permisibles para contaminantes patógenos se considera como indicador a los coliformes fecales. El límite máximo permisible para las descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales, es de 1,000 y 2,000 número más probable (NMP) de coliformes fecales por cada 100 ml para el promedio mensual y diario, respectivamente. Para el uso en riego agrícola se utiliza como indicador a los huevos de helminto. El límite máximo permisible para las descargas vertidas a suelo (uso en riego agrícola), es de un huevo de helminto por litro para riego no restringido, y de cinco huevos por litro para riego restringido.

La NOM-001-ECOL-1996 considera que su cumplimiento será gradual y progresivo. Para el caso de aguas residuales municipales las fechas de cumplimiento se presentan en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2

FECHAS DE CUMPLIMIENTO PARA DESCARGAS MUNICIPALES EN LA NOM-001-ECOL-1996	
Fecha de cumplimiento a partir de:	Rango de población
1° de enero de 1999	mayor de 50,000 habitantes
1° de enero de 2005	De 20,001 a 50,000 habitantes
1° de enero de 2010	de 2,501 a 20,000 habitantes

Fuente: NOM-001-ECOL-1996

1.3.4. Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996.

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal con el fin de prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como proteger la infraestructura de dichos sistemas, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta norma no se aplica a la descarga de las aguas residuales domésticas, pluviales, ni a las generadas por la industria, que sean distintas a las aguas residuales de proceso y conducidas por drenaje separado.

Al igual que en la NOM-001-ECOL-1996, esta norma establece los límites permisibles máximos para contaminantes básicos, además se indica que la materia flotante debe estar ausente en las descargas de aguas residuales, fija también límites máximos permisibles de contaminantes tóxicos, tales como: arsénico, cadmio, cianuro, cobre y mercurio. Y por último también se establece que no se deben descargar o depositar en los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, materiales o residuos considerados peligrosos, conforme a la regulación vigente en la materia.

Las fechas establecidas para el cumplimiento de ésta Norma, dependiendo de la población se muestran en el la Tabla 1.3.

Tabla 1.3

FECHAS DE CUMPLIMIENTO DE LA NOM-002-ECOL-1996	
Fecha de cumplimiento a partir de:	Rango de población
1° de enero de 1999	mayor de 50,000 habitantes
1° de enero de 2004	De 20,001 a 50,000 habitantes
1° de enero de 2009	de 2,501 a 20,000 habitantes

Fuente: NOM-002-ECOL-1996

1.3.5. Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997.

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen 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 reúso.

En lo que corresponde a ésta Norma Oficial Mexicana sólo se consideran los compuestos o parámetros que pueden ser removidos o estabilizados mediante procesos convencionales, los cuales son: grasas y aceites, materia flotante, demanda bioquímica de oxígeno, y sólidos suspendidos totales. Los contaminantes por patógenos o parásitos que ésta Norma Oficial Mexicana considera son los coliformes fecales y los huevos de helminto. Los límites máximos permisibles se muestran la Tabla 1.4.

Tabla 1.4

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA AGUAS RESIDUALES QUE SE REUSEN					
Tipo de reúso	Promedio mensual				
	Coliformes Fecales NMP/100 ml	Huevos de Helminto (h/l)	Grasas y Aceites mg/l	DBO ₅ mg/l	SST mg/l
Servicios al público con contacto directo	240	≤ 1	15	20	0
Servicios al público son contacto indirecto u ocasional	1,000	≤ 5	15	30	30

Fuente: NOM-003-ECOL-1997

También se establece que el agua residual tratada reusada en servicios al público no deberá contener materia flotante ni concentraciones de metales pesados y cianuros mayores a los límites máximos permisibles establecidos en la columna que corresponde a embalses naturales y artificiales con uso en riego agrícola de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996.

1.4. Necesidad de reúso de las aguas residuales.

México tiene problemas tanto de escasez como de exceso de agua. El 82.0% del volumen de almacenamiento está bajo la cota de 500 msnm, y el 76.0% de la población vive arriba de la misma, por lo que la población y la actividad económica se distribuyen en relación inversa con la disponibilidad del agua. Menos de una tercera parte del escurrimiento superficial ocurre en el 75.0% del territorio, donde se concentran los mayores núcleos de población, las industrias y las tierras de riego. Esto provoca insuficiencia en las aguas superficiales y subterráneas para el abastecimiento y la sobreexplotación de acuíferos, ocasionando la salinización gradual de éstos y obligando a la transferencia de agua entre cuencas. Debido a esto, se ha establecido una política que cubre los aspectos de: saneamiento de las principales cuencas hidrológicas; promoción de uso eficiente del agua con una política de precios justa; y el establecimiento de consejos de cuencas hidrológicas.

A nivel nacional, los recursos hídricos disponibles representan un volumen anual per cápita de aproximadamente 5,100 m³/habitante/año, pero existe un déficit de agua en casi la mitad del país, principalmente en los estados de Baja California, Sonora, Coahuila, Chihuahua, Nuevo León y San Luis Potosí (1,100 m³/habitante/año), y en algunas zonas del área metropolitana de la Ciudad de México y de la Cuenca Lerma - Chapala..

Por lo anterior, se debe de pensar en otras fuentes para la obtención de agua, el uso de las aguas residuales tratadas para satisfacer las necesidades de los servicios municipales es una práctica que se ha desarrollado en los últimos años en diversas partes del mundo donde se presenta una marcada escasez de aguas de otras fuentes.

La reutilización del agua se constituye como una alternativa de gran relevancia en los estados áridos y semiáridos del país. Actualmente son aprovechadas en el riego agrícola las aguas crudas de origen municipal en los Valles del Yaqui, Mayo y Guaymas, Chiconautla, Tula, Tulancingo, Valle de Juárez y Valsequillo entre otros. De igual forma, el uso del agua residual en la industria tiene dos vertientes: una es de la toma del agua residual tratada municipal y la otra se refiere a la reutilización del agua generada por la propia industria.

El aprovechamiento de las aguas residuales, en forma ordenada y de acuerdo a la normatividad, puede permitir satisfacer requerimientos de agua en usos que no exijan calidad potable, tal es el caso del uso agrícola para el riego de cultivos como el maíz, frijol, alfalfa, ajonjolí, algodón y cebada; el uso industrial en enfriamiento; y el uso público para el riego de áreas verdes y llenado de lagos recreativos. Actualmente se reutilizan aguas residuales con o sin tratamiento de la forma siguiente: 2.4 km³/año (76.1 m³/s) en riego agrícola, 0.2 km³/año (6.34 m³/s) por la industria y 0.3 (9.5 m³/s) en uso público. Esto implica que en total se utilizan 91.9 m³/s de aguas residuales y tan solo se tratan 42.4 m³/s, por lo que gran cantidad de agua residual utilizada no recibe el tratamiento adecuado, lo cual provoca una fuente de propagación de enfermedades. La Tabla 1.5 muestra el reúso del agua residual en México.

Tabla 1.5

REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES EN MEXICO		
Uso	Volumen total (km³)	Porcentajes (%)
Agrícola	2.43	82.88
Industrial	0.29	9.89
Público	0.21	7.23
Total	2.93	100.0

Fuente: CNA, "El agua en México: Retos y avances"

Los principales beneficios que arroja el uso de aguas residuales tratadas son los siguientes:

- Reducción de costos para la industria, pues la tarifa del agua tratada es considerablemente menor a la del agua potable.
- Disminución del volumen de agua extraído en los acuíferos locales y liberación de agua para consumo humano, sin tener que recurrir a fuentes lejanas de abastecimiento.
- Al no realizar mayores inversiones para extraer y distribuir más agua, se minimiza el impacto en la tarifa a la población.
- Se evita la contaminación y propagación de enfermedades entre a población.

2. ACTIVIDADES DE INGENIERIA BASICA DEL PROYECTO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO.

2.1. Ingeniería básica.

El proyecto de una planta de tratamiento se integra por la ingeniería básica y la ingeniería de detalle. Entre las principales actividades a desarrollar como parte de la ingeniería básica se incluyen la propuesta del diagrama de flujo de los procesos de tratamiento, la determinación de los datos básicos de diseño, el balance de sólidos, el cálculo de la línea piezométrica y la implantación de la planta. Por su parte la ingeniería de detalle comprende el diseño hidráulico, estructural, eléctrico, mecánico, etc. cuyas especificaciones se presentan en los planos correspondientes.

A continuación se describen las actividades de ingeniería básica que deben ser tomadas en cuenta para el diseño de las plantas de tratamiento.

2.1.1. Propuesta de operaciones y procesos unitarios para el tratamiento.

La elección de los procesos de tratamiento se hace a partir de diversas evaluaciones que deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Factores importantes en la elección de un proceso
- Análisis cinético
- Efecto de la variación de caudales y de las cargas de contaminantes sobre los procesos
- Cumplimiento de las normas vigentes

2.1.1.1. Factores importantes en la elección de un proceso.

Existe una serie de factores importantes en la valoración y selección de los procesos y operaciones unitarias, la tabla 2.1 muestra algunos de los más importantes.

Tabla 2.1

FACTORES IMPORTANTES QUE SE DEBEN TENER EN CONSIDERACIÓN EN LA SELECCIÓN DE LA OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS	
Factor	Comentario
Potencial de aplicación del proceso	Este se evalúa con base en a las experiencias anteriores, datos de plantas escala industrial y datos obtenidos en plantas piloto.
Intervalo de caudal aplicable	Los procesos se deben diseñar con el intervalo de caudales esperados.
Variación del caudal aplicable.	Si la variación del caudal es muy grande, debe ser necesaria la regulación.
Características del agua a tratar.	Estas afectan a los tipos de procesos a utilizar y las exigencias para su adecuada explotación.
Constituyentes inhibidores.	Se debe de considerar aquellos contaminantes tóxicos que pueden inhibir los procesos. (especialmente los biológicos).
Limitaciones climáticas.	La temperatura afecta la velocidad de reacción en la mayoría de los procesos tanto químicos como biológicos
Cinética de reacción y selección del reactor.	El dimensionamiento de los reactores se basa en la cinética de reacción que gobierna el proceso.
Eficacia.	Se mide en función de la calidad del efluente y debe de cumplir con las exigencias respecto al vertido de efluentes.
Residuos de tratamiento.	Es necesario estimar los tipos y cantidades de residuos que van a ser generados.
Tratamiento de lodos.	Se debe de estudiar si existe alguna limitación que convierta el tratamiento de los lodos en un procesos excesivamente caro o inviable o si afecta al rendimiento de la unidades de proceso del líquido las cargas del caudal de recirculación.
Limitaciones ambientales.	La presencia de vientos, direcciones predominantes del viento, o la proximidad a núcleos poblacionales, pueden implicar restricciones sobre la aplicabilidad de determinados procesos.
Necesidades químicas.	Se debe estudiar que tipo de productos químicos van a ser necesarios para el desarrollo satisfactorio de la planta y las características de los residuos y los costos debido a ellos.
Necesidades de otros recursos.	Se debe de analizar qué recursos adicionales se pueden necesitar para el desarrollo de la planta.
Necesidades de personal.	Se debe de analizar el número de empleados y el grado de preparación necesaria para la operación de la planta.
Necesidades de mantenimiento.	Se deben analizar los costos, la disponibilidad de refacciones para la operación de la planta.
Procesos auxiliares.	Se deben de tener en cuenta los proceso auxiliares que pueden ser necesarios.
Fiabilidad.	Se debe de considerar cual es la fiabilidad a largo plazo de los procesos en cuestión.
Complejidad.	Se debe de tomar en cuenta el grado de complejidad que presenta la explotación de los procesos tanto en condiciones rutinarias como en emergencias.
Compatibilidad	Se debe de tener en cuenta si se pueden emplear de manera satisfactoria las operaciones y procesos unitarios en conjunción con las instalaciones existentes y si se puede ampliar la planta en un futuro.
Disponibilidad de espacio.	Se debe de tomar en cuenta la disponibilidad de espacio que requieren los distintos procesos que se están estudiando y también los requerimientos de instalaciones futuras.

Fuente: Metcalf & Eddy "Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización, Tomo I"

2.1.1.2. Análisis cinético.

Se entiende por análisis cinético al estudio de la dinámica de los cambios que ocurren dentro de un reactor. El estudio de la cinética del tratamiento biológico conduce a determinar la velocidad a la cual los microorganismos degradan un residuo específico y por tanto suministran la información básica necesaria para desarrollar el tamaño de los reactores. Debido a esto, un análisis cinético es de suma importancia en la elección de los procesos de tratamiento.

Debido a que el tratamiento del agua residual se efectúa en diferentes tipos de reactores, a continuación se describirán brevemente los más comúnmente utilizados.

Reactor de flujo discontinuo. El flujo no entra ni sale del reactor. El contenido del líquido está completamente mezclado.

Reactor de flujo pistón. Las partículas del fluido pasan a través del tanque y salen con la misma frecuencia con la que entran. Las partículas permanecen en el interior del tanque por un tiempo igual al tiempo teórico de retención. Por lo general se lleva a cabo en tanques con una relación longitud/ancho elevada.

Reactor de mezcla completa. Las partículas que entran en el tanque se dispersan de manera inmediata por todo el volumen del mismo. Las partículas salen del tanque en proporción a su población estadística.

Reactor de flujo arbitrario. Es cualquier grado de mezcla parcial comprendido entre flujo pistón y mezcla completa.

Reactor de lecho fijo. Son reactores que se llenan con algún medio de soporte para que se adhieran los microorganismos. Los reactores pueden estar completamente llenos (filtro anaerobio) o dosificados intermitentemente (filtro percolador).

Reactor de lecho fluidificado. Es similar al de lecho fijo en muchos aspectos, pero el medio de soporte se mueve a través del lecho.

Dentro de un sistema, ocurren muchas transformaciones, las que más nos interesan son las relacionadas con el crecimiento de los microorganismos, la degradación de la materia orgánica y el consumo de oxígeno. A continuación se efectuará el análisis cinético asociado a la degradación de la materia orgánica, por sencillez el análisis se explicará para un reactor discontinuo o también llamado sistema cerrado bien mezclado.

Cinética de la degradación de la materia orgánica

Las hipótesis planteadas para poder llevar a cabo el análisis del balance de masas son:

1. El líquido contenido en el reactor no se evapora.
2. El líquido contenido en el reactor está completamente mezclado.
3. En el reactor se está produciendo una reacción química en la que la concentración de materia orgánica es un reactivo.

Debido a que la materia orgánica es una sustancia no conservativa, su degradación sigue una relación de primero orden de la forma:

$$r_c = -kX \quad (2.1)$$

donde: r_c = tasa de la variación de la concentración
 k = constante de degradación
 X = concentración de materia orgánica

Haciendo un balance de masa tenemos:

$$A = E - S + T \quad (2.2)$$

donde: A = Acumulación
 E = Entradas
 S = Salidas
 T = Transformaciones

Como el análisis lo estamos haciendo para un sistema con flujo discontinuo donde no se presentan entradas ni salidas, la ecuación (2.2) se reduce a:

$$A = T \quad (2.3)$$

Podemos escribir la expresión (2.3) en función del tiempo y expresar la concentración de materia orgánica en función de la masa contenida dentro de un volumen determinado. Entonces tenemos:

$$V \frac{dX}{dt} = -VkX \quad (2.4)$$

Si separamos variables e integramos de ambos lados de la ecuación considerando que para el tiempo $t = 0$ la concentración inicial es X_0 tenemos:

$$X = X_0 e^{-kt} \quad (2.5)$$

La ecuación (2.5) nos indica la variación de la concentración de la materia orgánica en función del tiempo dentro de un sistema cerrado bien mezclado. En los sistemas de tratamiento no se utilizan los sistemas cerrados, por lo que esta ecuación no es representativa de lo que ocurre en un reactor convencional, sin embargo es una expresión muy ilustrativa del proceso de degradación del material orgánico. Cabe mencionar que esta ecuación se emplea en los laboratorios para determinar la DBO₅ del agua residual.

Para poder continuar con el análisis cinético se puede hacer el mismo desarrollo elaborado anteriormente para los distintos tipos de reactores existentes. Este análisis se efectuará en el capítulo 3 de éste trabajo para los reactores utilizados en los distintos procesos unitarios.

2.1.1.3. Efecto de la variación de caudales y de las cargas de contaminantes sobre los procesos.

En la práctica, tanto los caudales como las cargas contaminantes influentes a una planta de tratamiento no son constantes, debido a esto es necesario establecer a priori los márgenes de variación y en que medida pueden afectar los diferentes procesos y operaciones unitarias consideradas. La tabla 2.2 identifica los factores críticos de dimensionamiento para distintas operaciones y procesos unitarios de tratamiento.

Tabla 2.2

EFECTO DE LOS CAUDALES Y CARGAS CONTAMINANTES SOBRE LA SELECCIÓN DE LAS OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO			
Proceso u operación unitaria	Factores de diseño críticos	Criterios de dimensionamiento	Efectos de los criterios de diseño sobre el funcionamiento de la planta.
Bombeo y conducciones	Caudal máximo horario.	Caudal	Posibilidad de inundación del pozo de bombeo, sobrecarga de la red de alcantarillado o desbordamiento de las unidades de tratamiento si se supera el caudal punta.
Desbaste	Caudal máximo horario	Caudal	Las pérdidas de carga en la circulación a través de las rejillas aumentan para caudales elevados.
	Caudal mínimo	Velocidad de aproximación	A caudales bajos, puede producirse la deposición de sólidos en el canal.
Desarenado	Caudal máximo horario	Carga de superficie	A caudales elevados, el rendimiento de los desarenadores disminuye, provocando problemas en el resto de la planta.
Sedimentación primaria	Caudal máximo horario	Carga de superficie	La eficacia de la eliminación de sólidos se reduce para cargas de superficie altas; se incrementa la carga en los procesos de tratamiento secundario.
	Caudal mínimo horario	Tiempo de retención.	A caudales bajos, el aumento del tiempo de retención puede hacer que el agua devenga séptica.
Lodos activados	Caudal máximo horario	Tiempo de residencia hidráulica.	Arrastre de sólidos a caudales elevados; puede hacer necesaria la recirculación del lodo effluente a caudales bajos.
	Carga orgánica máxima diaria	Relación alimento/microorganismos	Una DBO alta puede exceder la capacidad de aireación y provocar bajos rendimientos del proceso.
Filtros percoladores	Caudal máximo horario	Carga hidráulica	El arrastre de sólidos a caudales elevados puede provocar bajos rendimientos del proceso.
	Caudal mínimo horario	Carga hidráulica y carga orgánica	A caudales bajos, puede ser necesario aumentar la recirculación para mantener el proceso.
	Carga orgánica máxima diaria	Carga contaminante/volumen del medio	La presencia de cantidades inadecuadas de oxígeno en las fases de carga punta puede reducir la eficacia del proceso y generar olores.
Sedimentación secundaria	Caudal máximo horario	Carga de superficie o tiempo de retención	Menor eficacia en la eliminación de sólidos para caudales elevados o tiempos de retención cortos.
	Caudal mínimo horario	Tiempo de retención	Posibilidad de lodo ascendente para tiempos largos de retención.
	Carga orgánica máxima diaria	Carga de sólidos	La carga de sólidos aplicada en un tanque sedimentador puede ser un factor limitante.
Tiempo de cloración	Caudal máximo horario	Tiempo de retención	Para tiempo de retención cortos, la eliminación de bacterias puede ser insuficiente.

Fuente: Metcalf & Eddy "Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización, Tomo I"

2.1.1.4. Cumplimiento de las normas vigentes.

El cumplimiento de las normas vigentes existentes es un aspecto importante en la elección del proceso o de los procesos que integrarán la planta de tratamiento. Tomando en cuenta este aspecto, es necesario asegurar que el diseño de la planta produzca concentraciones del efluente menores o iguales a los límites máximos permitidos.

La tabla 2.3 muestra una guía para definir los procesos que pueden ser aplicados para cumplir los diversos niveles que establece la NOM-001-ECOL-1996, cuando el agua residual es de tipo doméstico. Su selección final dependerá de los resultados que se obtengan en las pruebas de tratabilidad.

Los diversos tipos de cuerpos receptores fueron clasificados en A, B y C, de acuerdo con la calidad que deben tener sus aguas; para cuerpos receptores tipo C, los límites fijados para descargas de aguas residuales son más estrictos.

Tabla 2.3

GUÍA PARA DEFINIR LOS PROCESOS PARA CUMPLIR CON LA NOM-001-ECOL-1996		
Descarga	Proceso	Comentario
Ríos	<ul style="list-style-type: none"> •Lodos activados. •Tratamiento primario avanzado. •Lagunas de estabilización. •Reactores anaerobios de biomasa floculada o adherida. •Flotación con aire disuelto. •Humedales. 	Combinados con filtración si se requiere cumplir con 1 huevo de helminto/l o sin filtración para 5 HH.
	<ul style="list-style-type: none"> •Lodos activados y sus variantes con excepción de alta tasa. •Filtro percolador. •Discos biológicos rotatorios. 	Combinados con filtración si se requiere cumplir con 1 huevo de helminto/L o sin filtración para 5 HH. En cuanto al contenido de materia orgánica medida como DBO pueden lograr niveles superiores a los establecidos por la norma, generalmente a un costo mucho mayor que los procesos señalados en el renglón anterior.
	<ul style="list-style-type: none"> •Lodos activados y sus variantes con excepción de alta tasa. •Filtro percolador. •Discos biológicos rotatorios. 	Pueden lograr niveles superiores a los establecidos en la norma en cuanto a contenido de materia orgánica medida como DBO.
	<ul style="list-style-type: none"> •Tratamiento primario avanzado. •Lagunas de estabilización. •Reactores anaerobios de biomasa floculada o adherida. •Flotación con aire disuelto. •Humedales. 	Combinados con una etapa de afinación de calidad de agua para eliminar la materia orgánica remanente.
Protección de vida acuática (C). DBO de 30 mg/l, SST de 40 mg/l, NT de 15	<ul style="list-style-type: none"> •Lodos activados y sus variantes con excepción de alta tasa. •Filtro percolador. •Discos biológicos rotatorios. 	Es probable que requieran ser acompañados de proceso específicos para la remoción de nitrógeno y fósforo. No se recomienda usar cloro como desinfectante.

	mg/l y P de 5 mg/l.	<ul style="list-style-type: none"> • Tratamiento primario avanzado, con biológicos y etapa de desnitrificación. • Series de lagunas incluyendo etapa de maduración y filtros. 	No se recomienda usar cloro como desinfectante.
Embalses naturales y artificiales	Uso de riego agrícola (B) SST y DBO de 75 mg/l	<ul style="list-style-type: none"> • Lodos activados y sus variantes con excepción de alta tasa. • Filtro percolador. • Discos biológicos rotatorios. 	Pueden lograr niveles superiores a los establecidos en la norma en cuanto a contenido de materia orgánica medida como DBO.
		<ul style="list-style-type: none"> • Tratamiento primario avanzado, con biológicos y etapa de desnitrificación. • Series de lagunas incluyendo etapa de maduración y filtros. 	No se recomienda usar cloro como desinfectante.
	Uso público urbano DBO de 30, SST de 40, NT de 15 y PT de 5 mg/l.	<ul style="list-style-type: none"> • Lodos activados. • Filtro percolador. • Discos biológicos rotatorios. • Filtros sumergidos. • Lechos fluidificados. 	Es probable que requieran ser acompañados de proceso específicos para la remoción de nitrógeno y fósforo.
Aguas costeras	Explotación pesquera, navegación y otros usos. (A) SST y DBO de 150 mg/l; y PT no aplican.	<ul style="list-style-type: none"> • Lodos activados de alta tasa. • Tratamiento primario avanzado. • Lagunas de estabilización. • Reactores anaerobios de biomasa floculada o adherida. 	Para explotación pesquera se recomienda no usar cloro como desinfectante.
		<ul style="list-style-type: none"> • Lodos activados y sus variantes con excepción de alta tasa. • Filtro percolador. • Discos biológicos rotatorios. • Filtros sumergidos. • Lechos fluidificados. 	Pueden lograr niveles superiores a los establecidos en la norma en cuanto a contenido de materia orgánica medida como DBO.
Suelos, uso en riego agrícola (A)	DBO, SST, PT y NT no aplica.	<ul style="list-style-type: none"> • Tratamiento primario avanzado. • Lagunas de estabilización. • Reactores anaerobios 	Combinados con procesos de desnitrificación.
		<ul style="list-style-type: none"> • Lodos activados. • Filtro percolador. • Discos biológicos rotatorios. 	Para todos los parámetros que no se aplican estos procesos, se pueden lograr niveles superiores a los establecidos además de cumplir con lo señalado por la NOM requiriendo siempre estar acompañados de un filtro para los sistemas de biomasa suspendida. Combinados con proceso de desinfección.
Humedales naturales (B)	DBO y SST de 75 mg/l.	<ul style="list-style-type: none"> • Lodos activados. • Filtro percolador. • Discos biológicos rotatorios. 	Pueden lograr niveles superiores a los establecidos en la norma en cuanto a contenido de materia orgánica medida como DBO. No se recomienda usar cloro como desinfectante.

Fuente: Subdirección de Hidráulica y Ambiental, Instituto de Ingeniería, UNAM.

2.1.2. Muestreo, aforo y pruebas de tratabilidad.

Muestreo.

Para poder iniciar con un proyecto de una planta de tratamiento de agua residual, es necesario saber las características del agua a tratar, para ello, se deben hacer muestreos confiables y representativos de la misma. Un buen muestreo arrojará datos acerca de las características físicas, químicas y biológicas del agua residual.

No existe un procedimiento universal de muestreo, pero se recomienda lo siguiente para garantizar una muestra representativa:

- a) Que los puntos de muestreo se sitúen en donde las características del flujo favorezcan la mezcla de las aguas.
- b) Que la velocidad del flujo en el punto de muestreo sea suficientemente alta para garantizar que no se depositen los sólidos.
- c) Que no se formen turbulencias excesivas que puedan liberar gases disueltos.
- d) Tomar varias muestras en intervalos de tiempo cortos y frecuentes para estimar la concentración media durante el periodo de muestreo.
- e) Emplear los métodos usuales de preservación de muestras para el análisis de aquellas propiedades que puedan verse afectadas, esto en el caso de que el análisis de la muestra demore mucho tiempo. Se recomienda que el análisis se haga con la mayor prontitud posible.

Existen dos tipos de muestras:

Muestra simple. Es aquella que nos da la característica del agua residual en el momento en que la muestra es tomada. Estas muestras se usan cuando el caudal y su composición son relativamente constantes. Se recomienda que el volumen mínimo de una muestra simple sea entre 1 y 2 litros dependiendo del número y tipo de análisis a determinar.

Muestra compuesta. Es aquella formada por muestras individuales tomadas en diferentes momentos. La cantidad de cada muestra individual con la que se integra la mezcla compuesta debe ser proporcional al caudal en el momento en que la muestra es tomada. La frecuencia de muestreo depende de la variabilidad del caudal y la carga contaminante, para grandes variaciones se recomienda muestrear cada 15 minutos.

Características de las aguas residuales.

El muestreo arrojará datos importantes acerca de las características físicas, químicas y biológicas del agua a tratar, lo cual es una de las bases para definir el tipo de proceso y algunos parámetros de diseño. Los contaminantes más comunes y la razón de la importancia de su remoción se describen en la tabla 2.4.

Tabla 2.4

CONTAMINANTES DE IMPORTANCIA EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL	
Contaminantes	Razón de la importancia
Sólidos en suspensión	Pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de lodo y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático.
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos, grasas animales, la materia orgánica biodegradable se mide en función de la DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y de la DQO (demanda química de oxígeno). Si se descargan en el entorno sin tratar su estabilización biológica puede llevar al agotamiento del oxígeno disuelto y al desarrollo de condiciones sépticas.
Patógenos	Se pueden encontrar bacterias, virus, protozoos y helmintos que pueden transmitir enfermedades..
Nutrientes	Tanto el nitrógeno como el fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento de los seres vivos. Cuando se vierten al entorno acuático favorecen el crecimiento de vida acuática no deseada. Cuando se vierten al terreno en cantidades excesivas, pueden provocar la contaminación del agua subterránea.
Contaminantes prioritarios	Son compuestos orgánicos o inorgánicos determinados en base de su carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad.
Materia orgánica refractaria	Dentro de estos se encuentran los agentes tensoactivos, los fenoles y los pesticidas agrícolas. Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento.
Metales pesados	Los metales pesados deben eliminarse si se pretende reutilizar el agua residual.
Sólidos inorgánicos disueltos	Dentro de estos se encuentran el calcio, el sodio y los sulfatos, los cuales deben de eliminarse si se desea reutilizar el agua residual.

Fuente: Metcalf & Eddy "Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización, Tomo I"

Los valores típicos de los contaminantes encontrados en el agua residual municipal cruda, son los mostrados en la tabla 2.5, los cuales corresponden a las concentraciones típicas de contaminantes. Para el diseño de unidades de tratamiento es indispensable realizar muestreos y análisis de calidad del agua para cada caso particular.

Tabla 2.5

COMPOSICIÓN TÍPICA DEL AGUA RESIDUAL MUNICIPAL CRUDA				
Contaminante	Unidades	Concentración		
		Baja	Media	Alta
Sólidos Totales	mg/l	350	720	1200
Disueltos totales	mg/l	250	500	850
Fijos	mg/l	145	300	525
Volátiles	mg/l	105	200	325
Sólidos en suspensión	mg/l	100	220	350
Fijos	mg/l	20	55	75
Volátiles	mg/l	80	165	275
Sólidos sedimentables	mg/l	5	10	20
DBO ₅ , 20 °C	mg/l	110	220	400
Carbono Orgánico Total	mg/l	80	160	290
DQO	mg/l	250	500	1000
Nitrógeno total	mg/l	20	40	85
Orgánico	mg/l	8	15	35
Amoníaco libre	mg/l	12	25	50
Nitritos	mg/l	0	0	0
Nitratos	mg/l	0	0	0
Fósforo total	mg/l	4	8	15
Orgánico	mg/l	1	3	5
Inorgánico	mg/l	3	5	10
Cloruros	mg/l	30	50	100
Sulfatos	mg/l	20	30	50
Alcalinidad	mg/l	50	100	200
Grasa	mg/l	50	100	150
Coliformes totales	N.º/100 ml	10 ⁶ -10 ⁷	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁷ -10 ⁹
Compuestos orgánicos volátiles	µg/l	< 100	100 - 400	> 400

Fuente: Metcalf & Eddy "Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización, Tomo I"

En ocasiones las aguas residuales de tipo municipal contienen contaminantes tóxicos, provenientes de descargas industriales, que pueden inhibir los procesos biológicos. En estos casos, la elección de los procesos debe de asegurar que las condiciones y procesos de tratamiento sean adecuados para que se garantice el cumplimiento de la calidad de la descarga. En la tabla 2.6 se muestran las concentraciones críticas de contaminantes que resultan tóxicos para los tratamientos biológicos.

Tabla 2.6

CONCENTRACIONES CRITICAS DE CONTAMINANTES QUE RESULTAN TOXICOS PARA LOS TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS	
Contaminante	Concentración, mg/l
Aluminio	15 - 26
Amoniaco	480
Arsénico	0.1
Borato	0.05 - 100
Cadmio	10 - 100
Calcio	2500
Cromo (hexavalente)	1 - 10
Cromo (trivalente)	50
Cobre	1.0
Cianuro	0.1 - 5
Fierro	1000
Manganeso	10
Mercurio	0.1 - 5
Níquel	100 - 2.5
Plata	5.0
Zinc	0.8 - 10
Fenol	200

Fuente: Revista Ciencia y tecnología, abril / junio 2000.

Aforo.

Las mediciones de caudales en las corrientes de aguas residuales pueden llevarse a cabo por una gran variedad de métodos. Existen varios aparatos disponibles para la medición de los caudales tanto en canales como en conducciones a presión. Se ha visto que la forma más sencilla y confiable para determinar el caudal de diseño, es mediante la utilización de dispositivos de aforo, como son el canal Parshall (Figura 2.1) o los vertedores de pared delgada.

Se recomienda que los aforos se realicen en forma tal que se identifiquen las variaciones horarias (en un día = 24 hrs.) y las variaciones diarias (en una semana = 7 días), por lo general se realizan aforos cada 4 horas y en días representativos de una semana.

La elección de los aparatos de medición de caudales se lleva a cabo analizando factores como el tipo de aplicación, el dimensionamiento correcto, la composición del fluido, la precisión, las pérdidas de carga que produce, las necesidades de instalación, el entorno en el que debe funcionar y la facilidad de mantenimiento.

Debido a que no siempre es posible medir directamente los caudales de aguas residuales, se pueden estimar los datos a partir de series históricas obtenidas en aforos por medición directa en las zonas dotadas de red de alcantarillado.

Cuando no es posible medir directamente los caudales y no se dispone de series históricas, se deben utilizar los datos sobre el abastecimiento de agua potable a la comunidad en estudio. Generalmente entre el 60 y el 80 por ciento de la dotación de

agua potable se convierte en agua residual, dependiendo de cada comunidad. Se deben tomar en cuenta factores como el clima, tamaño de la comunidad, densidad de población, nivel económico y la economía del agua para realizar una buena estimación del caudal a tratar.

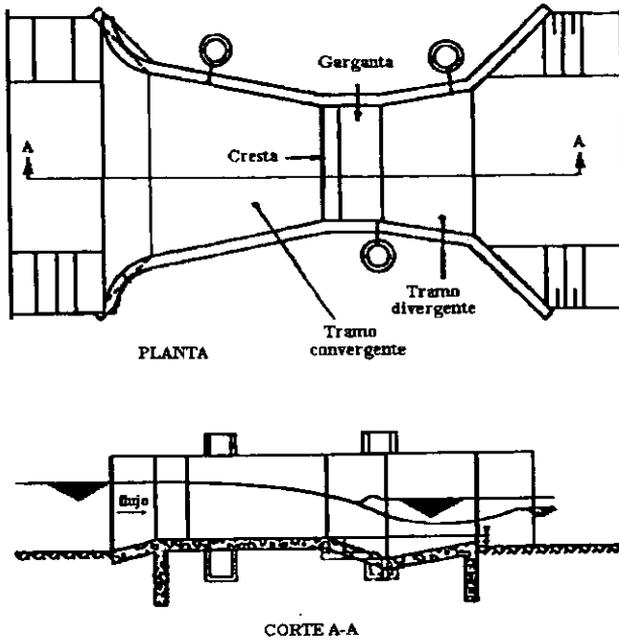


Figura 2.1
Canal Pashall

Es recomendable contar con al menos dos años de registros, tanto de caudales aforados como de análisis de calidad, con el propósito de determinar su variabilidad. No debemos de pasar por alto que la actividad de la población marca "picos" en la generación de aguas residuales, con una tendencia a menores fluctuaciones en la medida que las ciudades crecen.

Pruebas de tratabilidad.

En los casos en los que no se conozca o no se pueda determinar la aplicabilidad de un proceso en ciertas condiciones, deben llevarse a cabo estudios en plantas piloto para determinar los rendimientos alcanzables y para obtener datos de proyecto a partir de los cuales se pueda abordar el proyecto a escala real.

Las pruebas de tratabilidad consisten en investigaciones llevadas a cabo en un laboratorio, con el fin de determinar el proceso más adecuado de tratamiento para un agua residual específica.

Las pruebas de tratabilidad se llevan a cabo en unidades de biooxidación, las cuales están formadas de una cámara de aproximadamente de 8 litros acompañada de una cámara de clarificación de aproximadamente 2 litros. El agua residual a estudiar se puede suministrar por gravedad o mediante una bomba y también se introduce aire con una compresora. La figura 2.2 muestra un sistema completo a nivel escala para simular el proceso de lodos activados convencional. De igual forma se pueden hacer pruebas de laboratorio para simular otros procesos.

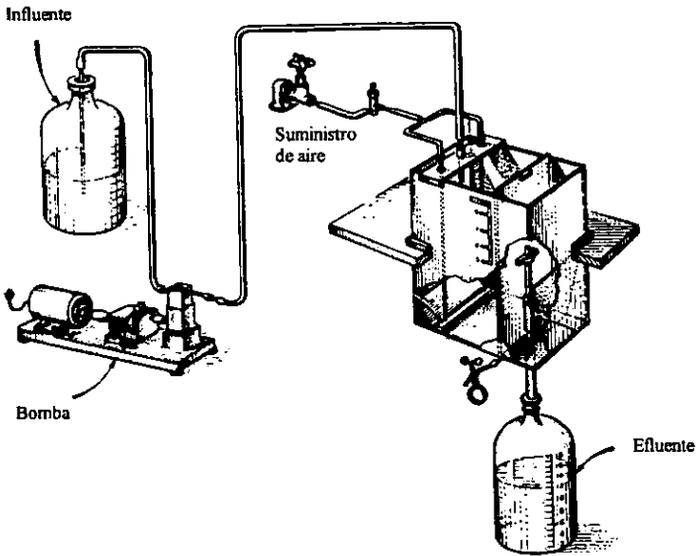


Figura 2.2
Unidad de Biooxidación utilizada para pruebas de tratabilidad

2.1.3. Diagramas de flujo de los procesos de tratamiento.

Son representaciones gráficas de las diferentes combinaciones de operaciones y procesos unitarios, se suelen hacer en función de los constituyentes que se deseen eliminar. La configuración exacta de las unidades de procesos depende de factores tales como:

1. La experiencia del proyectista.
2. Políticas de los organismos y agencias de control
3. Disponibilidad del equipo necesario para los métodos específicos de tratamiento.
4. Rendimiento máximo que se puede obtener de las instalaciones existentes.
5. Costos iniciales de construcción.
6. Costos futuros de operación y mantenimiento.

La figura 2.3 muestra un diagrama de flujo típico de tratamiento de agua residual municipal para lograr niveles de calidad de tratamiento secundario.

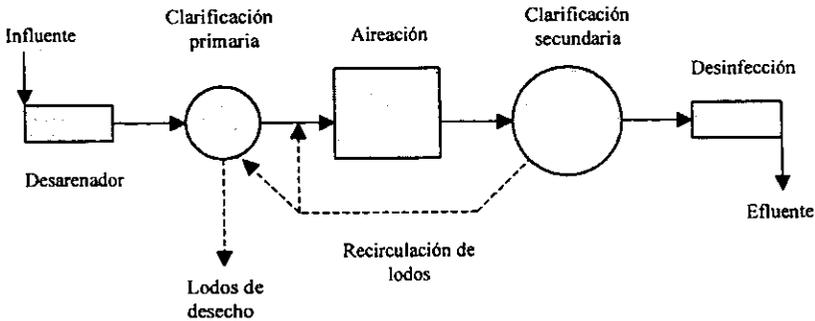


Figura 2.3
Diagrama de flujo típico para una planta de tratamiento

2.1.4. Datos básicos del proyecto y selección de criterios de diseño.

Las plantas de tratamiento de agua residual deben ser proyectadas para satisfacer las demandas de caudal, las características del agua residual a tratar y la combinación de ambas. Además, es importante considerar en el proyecto ciertas condiciones singulares como son los caudales y las cargas pico y bajas ya que las unidades de proceso deben tener la capacidad suficiente como para absorber y amortiguar estas variaciones de manera satisfactoria.

2.1.4.1. Periodo de diseño

Las plantas de tratamiento están pensadas para su funcionamiento durante un largo periodo de tiempo, que por lo general van de 10 a 25 años, debido a esto, los criterios de proyecto deben establecerse, tanto para el momento de puesta en marcha de la planta como para el final de su vida útil. Para ello es necesario estimar la población futura y los estudios de costo y efectividad para diversos periodos de proyecto.

El periodo de diseño depende de las características de crecimiento de la población a servir, de las condiciones ambientales y de la disponibilidad y origen de los recursos económicos para la construcción de las instalaciones. Para el caso de plantas de tratamiento, en México, la Comisión Nacional del Agua dentro de los lineamientos técnicos para la elaboración de estudios y proyectos de agua potable y alcantarillado sanitario publicada en 1994, recomienda periodos de diseño entre 5 y 10 años.

2.1.4.2. Caudales de diseño

El diseño hidráulico de las instalaciones de tratamiento se debe de hacer con un análisis de los datos de las características y variaciones de los caudales de aguas residuales. La capacidad de una planta suele calcularse para el caudal medio diario, el cual debe de estar basado en la población actual y en las predicciones de la población futura. Aunque el caudal medio diario es el utilizado para el diseño de la planta, se deben tener en cuenta las variaciones de caudales, debido a esto a continuación se describirán los parámetros mas importantes que se deben de obtener en el análisis del caudal y se enunciará su importancia en el diseño de las instalaciones.

Caudal medio diario. Es el caudal medio en 24 horas, obtenido a partir de los datos de todo el año. Los caudales medios se emplean para la determinación de la capacidad de la planta de tratamiento y para obtener el resto de los caudales de diseño.

Caudal máximo diario. Es el máximo caudal obtenido en 24 horas. Se utiliza para dimensionar elementos que contemplen un cierto tiempo de retención, como puede ser el del tanque de homogenización.

Caudal mínimo diario. Es el caudal mínimo obtenido en 24 horas. Se utiliza para el diseño de conducciones donde se puedan presentar sedimentaciones.

2.1.4.3. Cargas de diseño

Debido a la variabilidad de las cargas de contaminantes que se pueden presentar en una planta de tratamiento, los procesos deben de estar diseñados de tal forma que puedan soportar condiciones extremas ocasionados por valores punta. Por lo general, las puntas de caudales y cargas de DBO y sólidos suspendidos no se dan simultáneamente por lo que un proyecto no se diseña considerando que se presenten las condiciones extremas juntas.

Por lo general, las concentraciones de agua residual municipal no varían a lo largo del año, pero cuando la red de alcantarillado recibe aportaciones de aguas pluviales las concentraciones medias suelen ser menores, factor que debe ser tomado en cuenta en el diseño de la planta.

La figura 2.4 ilustra la variación a lo largo de un día de las curvas correspondientes a cargas de DBO y sólidos suspendidos, así como al caudal influente a un planta de tratamiento. Cabe señalar que las cargas contaminantes suelen expresarse en kg/día.

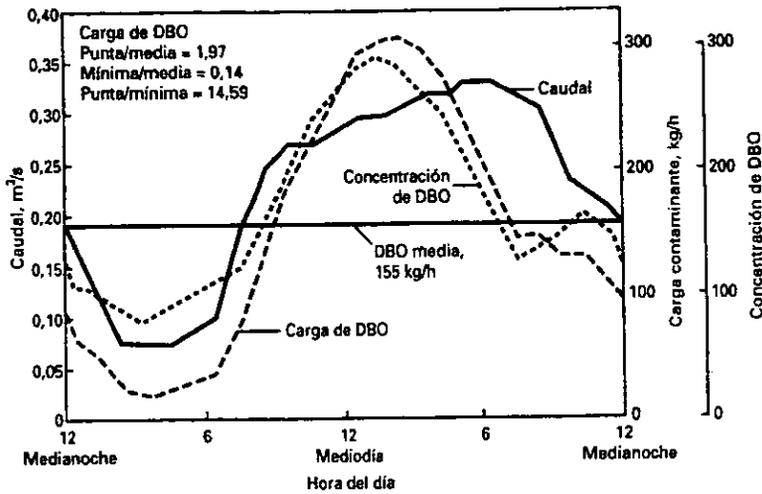


Figura 2.4
Variaciones diarias de concentraciones de DBO

Cargas contaminantes medias. La carga contaminante media se emplea para obtener una medida más representativa de la concentración de los diferentes constituyentes del agua residual municipal. Su valor se obtiene mediante la aplicación de la expresión (2.6), la cual es una media integrada proporcionalmente al caudal.

$$x_m = \frac{\sum_{i=1}^n x_i q_i}{\sum_{i=1}^n q_i} \tag{2.6}$$

donde: x_m = concentración-media proporcional al caudal.

n = numero de observaciones.

x_i = concentración media del constituyente durante el i -ésimo periodo de tiempo.

q_i = caudal medio durante el i -ésimo periodo de tiempo.

2.1.5. Balance de sólidos.

Se determina a partir del principio de conservación de la masa y nos permite expresar lo que ocurre en el interior de las instalaciones de tratamiento en función del tiempo.

Ley de conservación de la masa.

$$\text{Almacenamiento} = \text{Entradas} - \text{Salidas} + \text{Transformaciones} \quad (2.7)$$

El balance de sólidos se debe de hacer para cada diagrama de flujo de los procesos considerados. Estos análisis deben realizarse con las cargas medias de DBO y sólidos suspendidos, aunque para ciertas instalaciones como son los tanques de almacenamiento de lodos y conducciones de la planta, es también importante elaborar un balance de sólidos para la máxima concentración de DBO y sólidos suspendidos prevista para el agua residual a tratar.

El balance de sólidos resulta indispensable para elaborar el dimensionamiento de los tanques de almacenamiento y espesado de lodos, digestores de lodos, instalaciones de deshidratación y secado de lodos, tuberías y equipos para el bombeo de lodos.

2.1.6. Perfil hidráulico.

Una vez determinado el diagrama de flujo de la planta de tratamiento, se deberán hacer los cálculos hidráulicos correspondientes y determinar la línea piezométrica para poder establecer las pérdidas de carga que se producen en los elementos que conforman la planta, y para poder hacer el dimensionamiento de los conductos y canales de conexión.

Los valores típicos de las pérdidas de carga que se producen en las instalaciones de plantas de tratamiento se muestran en la tabla 2.7.

Tabla 2.7

VALORES TÍPICOS DE PERDIDAS DE CARGA	
Unidad de tratamiento	Perdida de carga (m)
Reja de barras	0.15 - 0.30
Desarenador	
Aireado	0.45 - 1.20
De velocidad controlada	0.45 - 0.90
Sedimentador primario	0.45 - 0.90
Tanque de aireación	0.20 - 0.60
Filtro percolador	
Medio pétreo	1.80 - 4.80
Medio sintético	4.80 - 12.0
Sedimentador secundario	0.45 - 0.90
Filtración	3.00 - 6.00
Absorción de carbón	3.00 - 6.00
Tanque de cloración	0.20 - 1.80

Fuente: Metcalf & Eddy "Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización, Tomo I"

Es necesario calcular la línea piezométrica para los caudales medio y para los caudales punta para así:

- a) Asegurar que el gradiente hidráulico sea el adecuado para que el flujo sea por gravedad en las unidades de la planta.
- b) Establecer las alturas de impulsión de los equipos de bombeo en los casos que sea necesario.
- c) Asegurar que no se inunden o se produzca retorno de flujo en las instalaciones cuando se presenten los caudales punta.

2.1.7. Selección del sitio para la ubicación de la planta de tratamiento.

La localización del terreno y sus características, son algunos de los factores que mayor influencia tienen en la selección y diseño de un sistema de tratamiento.

Conociendo la tendencia del crecimiento de la población, los planes de desarrollo gubernamentales en materia de saneamiento, los sitios actuales y en proyecto para el vertido de las aguas tratadas, el drenaje natural del terreno y el uso actual o potencial de las aguas residuales, se estará en posibilidad de definir la mejor zona para localizar la planta de tratamiento.

Existen diferentes tipos de procesos de tratamiento que requieren de superficies muy distintas. Por ejemplo, los reactores anaerobios requieren de pequeñas superficies de hasta 200 m², mientras que el proceso de lagunas de estabilización llega a requerir de varias hectáreas.

Los aspectos que definen las ventajas y desventajas de un terreno en el que se ubicará la planta de tratamiento son las siguientes:

- Localización; necesidades de conducción de las aguas residuales; colectores y estaciones de bombeo.
- Régimen de uso de suelo, factibilidad de adquisición y costo del terreno.
- Topografía; superficie, configuración y desniveles o accidentes que limiten o proporcionen el óptimo aprovechamiento de la superficie.
- Geotecnia; capacidad de carga del terreno para desplante y cimentación de estructuras, nivel freático, permeabilidad, posibilidad de aprovechar los materiales del subsuelo.

3. OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES Y EVALUACIÓN DE SU EFICIENCIA EN LA REMOCIÓN DE SUS CONTAMINANTES.

3.1. Descripción y evaluación de eficiencia en remoción de contaminantes de las operaciones y de los procesos convencionales de tratamiento.

3.1.1. Pretratamiento.

Se designa con este nombre al conjunto de unidades que tienen como finalidad la eliminación de materiales que perjudican al sistema de conducción, bombeo o etapas subsecuentes del tratamiento. Entre los materiales más comunes que se pueden encontrar en las aguas residuales municipales se incluyen materia flotante como bolsas, madera, latas, botes, y ramas. También encontramos sólidos suspendidos como son las arenas, los limos y las arcillas.

Cabe mencionar, que los dispositivos utilizados para el pretratamiento se suelen designar como una sola unidad, indispensable para cualquier planta de tratamiento municipal y se deben localizar antes de la primera estación de bombeo o a la entrada de la planta.

Los dispositivos empleados en el pretratamiento son:

3.1.1.1. Rejillas o cribas.

Tienen como objetivo la remoción de los materiales voluminosos flotantes o en suspensión, los cuales pueden removerse mecánica o manualmente. Los materiales gruesos pueden ocasionar obstrucciones en canales, tuberías y conducciones, lo cual disminuye la eficiencia de los tratamientos posteriores.

Existen varios tipos de rejillas, pero las más comunes están formadas por barras separadas con claros libres entre 1 y 5 cm, colocadas en ángulo de 30 a 60 grados con respecto a la vertical. En el dimensionamiento de las rejillas, dos son los parámetros fundamentales que rigen el proceso: la velocidad y la pérdida de carga. Sea cual sea el tipo seleccionado, interesa la colocación de rejillas bien calculadas, con lo que se evitan perturbaciones posteriores, que restan eficacia a todo el sistema.

Para el diseño de las rejillas se recomienda que la separación libre entre barras en el desbaste grueso se encuentre comprendida entre 50 y 100 mm, a su vez la separación libre entre barras en el desbaste medio este comprendida entre 20 y 30 mm. Las separaciones óptimas de desbaste grueso y medio serán aquellas que logren una recogida de residuos sólidos del 50% del total en cada una de ellas.

3.1.1.2. Desarenadores.

Tienen como objetivo eliminar los sólidos en suspensión de las aguas residuales, entre los cuales podemos encontrar arenas, arcillas y limos. Los materiales inorgánicos deben ser removidos ya que de lo contrario, generan sobrecargas en los lodos, depósitos en las conducciones hidráulicas, abrasión en bombas y equipos mecánicos y disminuyen la capacidad hidráulica.

Los desarenadores son dispositivos en forma de canales, en los que se controla la velocidad del agua para permitir la sedimentación de los materiales inorgánicos, manteniendo en suspensión a los sólidos orgánicos. El principio fundamental de los desarenadores está basado en que las arenas tienen velocidades de sedimentación sensiblemente superiores a la de los sólidos orgánicos putrescibles.

El procedimiento utilizado, para lograr la separación de la arena del agua residual, consiste en provocar una reducción de la velocidad del agua por debajo de los límites de precipitación de los granos de arena, pero por encima de los de sedimentación de la materia orgánica.

Velocidad de precipitación

La sedimentación de la partículas discretas puede analizarse mediante las leyes clásicas formuladas por Newton y Stokes. La ley de Newton proporciona la velocidad final de sedimentación de la partícula como resultado de igualar el peso específico de la partícula a la resistencia de rozamiento o fuerza de arrastre. Para el caso de las arenas, se suponen como partículas esféricas para lo cual se iguala la fuerza de arrastre con el peso específico de la partícula, obteniéndose la Ecuación (3.1), que proporciona la velocidad vertical de la partícula.

$$\text{Ley de Newton} \quad V_c = \sqrt{\frac{4g(\rho_s - \rho)d}{3C_D\rho}} \quad (3.1)$$

donde: V_c = velocidad final de sedimentación de la partícula
 d = diámetro de la partícula
 ρ_s = densidad de la partícula
 ρ = densidad del agua
 C_D = Coeficiente de arrastre

El coeficiente de arrastre adquiere diversos valores dependiendo de que tipo de régimen se presente en el flujo. Las expresiones en función del número de Reynolds utilizadas para el cálculo del coeficiente de arrastre son las siguientes:

$$\text{Flujo laminar} \quad C_D = \frac{24}{IR} \quad (3.2)$$

$$\text{Flujo de transición} \quad C_D = \frac{24}{IR} + \frac{3}{\sqrt{IR}} + 0.34 \quad (3.3)$$

Flujo turbulento

$$C_D = 0.4 \quad (3.4)$$

La velocidad horizontal de arrastre de la partícula esta dada por la ecuación (3.5).

$$V_a = k\sqrt{(S_s - 1)d} \quad (3.5)$$

donde: V_a = velocidad de arrastre

S_s = densidad específica

d = diámetro de la partícula

k = coeficiente que depende de las características de la partícula (arena $k = 125$)

El procedimiento de diseño consiste en, seleccionar una partícula con una velocidad vertical final V_c y diseñar el tanque de desarenado de modo que se precipiten todas aquellas partículas cuya velocidad sea igual o mayor a V_c . Esto es, que la velocidad de precipitación sea igual a la carga de superficie, lo cual lleva a la ecuación (3.6).

$$V_c = C_s = \frac{Q}{A} \quad (3.6)$$

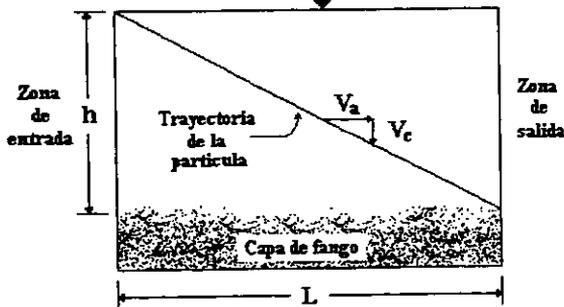


Figura 3.1
Precipitación de partículas en un tanque sedimentador

De la Figura 3.1 por triángulos semejantes tenemos:

$$\frac{V_c}{V_a} = \frac{h}{L} \quad (3.7)$$

Sustituyendo (3.6) en (3.7) y despejando V_c , finalmente llegamos a la expresión (3.8), con la cual podemos diseñar el tanque sedimentador. Podemos observar que en la ecuación (3.8) no interviene el término h por lo que el diseño del tanque sedimentador no depende de la profundidad del tanque.

$$V_c = \frac{Q}{Lb} \quad (3.8)$$

3.1.2. Tratamiento primario.

Con este nombre se designa a los procesos cuya finalidad es la remoción de sólidos suspendidos y pueden ser por: sedimentación, filtración, flotación, floculación y precipitación. De estos el más usado y que mejor se ajusta a las características de las aguas residuales municipales es la sedimentación. Aún cuando este tipo de tratamientos disminuye la cantidad de materia orgánica en las aguas residuales, ésta se limita a la suspendida y no a la disuelta, condición que determina su nombre de tratamiento primario.

A continuación se describirán brevemente los procesos mas utilizados en el tratamiento primario.

3.1.2.1. Tanques Imhoff.

Son dispositivos de tratamiento que proporcionan la separación de los sólidos suspendidos, en un canal sedimentador y su digestión en un compartimiento inferior. Están diseñados de tal manera que se evite que los gases producto de la digestión interfieran con el proceso de sedimentación.

El tanque Imhoff es de forma rectangular y se divide en tres compartimentos: 1) Cámara de derrama continuo o canal sedimentador; 2) La sección inferior que se conoce como cámara de digestión de lodos, y 3) Un área de ventilación y compartimiento de natas.

Los lodos retenidos en la sección inferior se extraen periódicamente, después de un tiempo, el cual debe de ser suficiente para su digestión y se conducen para su secado a unos dispositivos que consisten en camas o lechos de grava y arena en donde se reduce, por infiltración, su aún alto contenido de agua, después de lo cual se retiran y dispone de ellos con algún fin determinado.

En la actualidad la aplicación de los tanques Imhoff ha disminuido y está limitada a plantas relativamente pequeñas.

3.1.2.2. Sedimentación primaria.

La mayor parte de las sustancias en suspensión y disolución en las aguas residuales no pueden retenerse, por razón de su finura o densidad, en las rejillas y desarenadores, ni tampoco pueden separarse mediante flotación por ser más pesadas que el agua.

La reducción de la velocidad de corriente por debajo de un determinado valor, es el fundamento de la eliminación de un 50 a un 65 % de las materias en suspensión en el efluente. Al precipitarse estas partículas, arrastran en su caída una cierta cantidad de bacterias, con lo que se alcanza también, en este tipo de tratamiento una reducción de la DBO y una cierta depuración biológica.

Los sedimentadores primarios son depósitos con la forma adecuada para que el agua los atraviese con una velocidad suficientemente lenta, lo cual permita la precipitación del material suspendido.

El modo de funcionar de estas unidades o tanques es el siguiente: el influente proveniente del pretratamiento es introducido por una tubería que va por debajo del tanque, y que penetra por el centro, descargando en la superficie, el agua es forzada, por unas pantallas deflectoras, a circular hacia el fondo del tanque ayudando a que los sólidos se sedimenten en el fondo. Los sólidos depositados son recolectados por rastras giratorias que conducen a una tolva de donde se extraen para su tratamiento y disposición. El agua asciende nuevamente y es colectada por un vertedor perimetral y depositada en un canal, de donde es conducida a las etapas subsecuentes de tratamiento. Las grasas y aceites que flotan en la superficie son colectadas por un brazo giratorio que las conduce a una pequeña tolva de donde se extraen para su disposición final.

Normalmente los tanques de sedimentación primaria se diseñan para proporcionar un tiempo de retención entre 1.5 y 2.5 horas para el caudal medio de agua residual. El dimensionamiento de los tanques es función de la carga de superficie, y al igual que en los desarenadores se adopta una carga de superficie adecuada para eliminar ciertos sólidos orgánicos predeterminados. En la Figura 3.2 podemos observar el rendimiento de la sedimentación primaria en función del tiempo de retención para un tanque con 3 metros de profundidad.

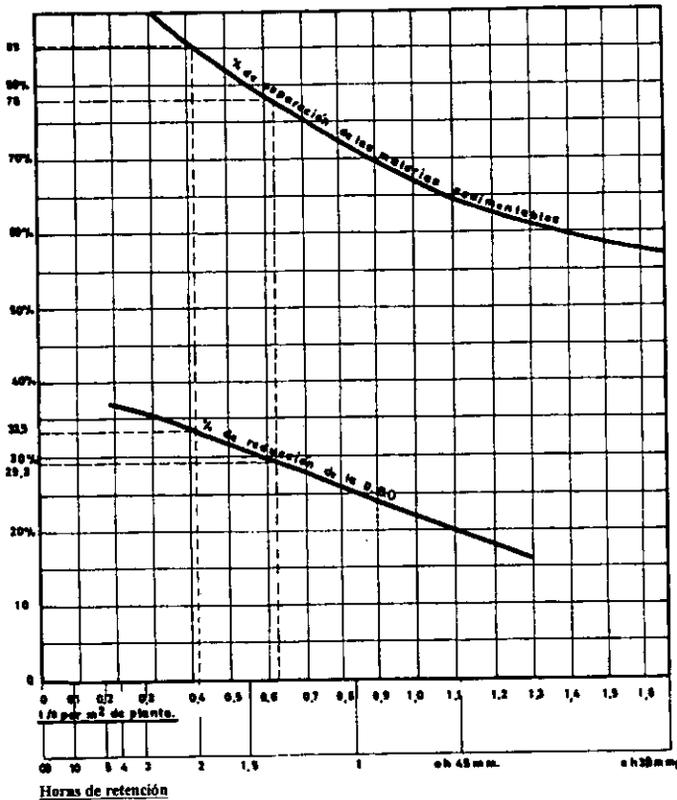


Figura 3.2
Rendimiento de la sedimentación de lodos en tanques de 3 m. de profundidad
 Fuente: Hernández Muñoz, "Depuración de aguas residuales"

3.1.3. Tratamiento secundario.

El tratamiento secundario emplea procesos biológicos y químicos con el fin de eliminar la mayor parte de la materia orgánica no sedimentable. Generalmente para el tratamiento de aguas residuales municipales se suelen emplear los procesos biológicos, en estos procesos se aprovecha la acción de los microorganismos, los cuales degradan la materia orgánica, convirtiéndola en material celular, productos inorgánicos o material inerte.

Procesos químicos de tratamiento.

Tienen como objetivo separar del agua residual los elementos extraños por precipitación, rompiendo mediante la atracción de los coagulantes la estructura coloidal de la partículas. Los coagulantes normalmente usados son el sulfato de aluminio, el cloruro férrico, polielectrolitos, unidos o no a la acción de los coadyuvantes. Los procesos químicos no son tan utilizados en el tratamiento de aguas residuales municipales debido que se necesita la introducción de cantidades importantes de reactivos, además requieren sistemas de dosificación muy correctos y equipos de personal preparados, lo cual se refleja en altos costos

Procesos biológicos de tratamiento.

Los procesos biológicos utilizan microorganismos no patógenos en condiciones controladas, para eliminar los contaminantes del agua residual. En ellos, se simulan y aceleran los fenómenos naturales de depuración del agua. El funcionamiento de los procesos biológicos es el siguiente:

Los microorganismos utilizan la materia orgánica carbonosa coloidal como fuente de alimento para producir materia celular. Dado que el tejido celular tiene un peso específico ligeramente mayor al del agua, se puede eliminar posteriormente por decantación.

Los microorganismos para poder desarrollar correctamente sus funciones metabólicas necesitan tres cosas:

- 1) **Energía.** Las fuentes de energía son la luz solar, para los organismos fotótrofos y las reacciones químicas de oxidación para los organismos heterótrofos.
- 2) **Carbono** para la síntesis de materia celular nueva. La materia orgánica y el dióxido de carbono son las principales fuentes de carbono celular para los microorganismos.
- 3) **Nutrientes.** Los microorganismos necesitan nutrientes inorgánicos (N, S, P, K, Mg, Ca, Fe, Na y Cl) y nutrientes orgánicos, conocidos como "factores de crecimiento", los cuales son compuestos indispensables para que los organismos efectúen la síntesis de materia celular orgánica que no se puede obtener a partir de otras fuentes de carbono.

Se puede hacer una clasificación de los microorganismos atendiendo a las características de su metabolismo y a sus necesidades de oxígeno molecular. Cuando el oxígeno molecular actúa como aceptor de electrones en los metabolismos respiratorios, el proceso recibe el nombre de respiración aerobia. Estos procesos, se caracterizan por generar grandes cantidades de masa celular y por eliminar desechos estables como son

el CO₂, NO₃, SO₄ y H₂O. Los organismos que generan energía por fermentación y sólo pueden existir en un medio en ausencia de oxígeno, se denominan anaerobios obligados. Estos organismos a diferencia de los aerobios, generan gran cantidad de desechos con alta energía, como el H₂S y el CH₄. También existen organismos que pueden crecer, tanto en presencia como en ausencia de oxígeno, éstos reciben el nombre de anaerobios facultativos.

Para que los microorganismos actúen de manera eficiente, es necesario que se les suministren las condiciones adecuadas para que cumplan con sus funciones metabólicas. La temperatura y el pH son factores importantes en el desarrollo bacteriano. El pH admisible puede variar entre 4 y 9.5, pero los límites adecuados están entre 6 y 7.5. El efecto de la temperatura sobre la actividad enzimática es doble. La velocidad de reacción se incrementa con la elevación de la temperatura, pero a su vez las enzimas se vuelven menos estables, por lo que se recomienda que el tratamiento biológico se lleve a cabo entre los 12°C y los 38°C.

Cinética del crecimiento de los microorganismos

La tasa de crecimiento de microorganismos se puede definir mediante la siguiente expresión:

$$\frac{dX}{dt} = \mu X - k_e X \quad (3.9)$$

donde: μ = tasa de crecimiento específico

X = concentración de microorganismos

k_e = constante de eliminación o muerte de microorganismos

En la expresión (3.9) aparece el término μ que corresponde a la tasa de crecimiento bacteriano, la cual está afectada por la limitación de los nutrientes contenidos en el agua, que son necesarios para que los microorganismos realicen sus funciones metabólicas. Este término se puede definir mediante la ecuación de Monod como:

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_s + S} \quad (3.10)$$

donde: μ_m = máxima tasa de crecimiento específico

S = concentración del nutriente que limita el crecimiento

K_s = constante de velocidad mitad, concentración de nutriente a la mitad de la máxima tasa de crecimiento.

La concentración del nutriente limitante S no es constante debido a que permanentemente es utilizado por los microorganismos, por lo que la variación del nutriente está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\mu}{Y} X \quad (3.11)$$

donde: Y = coeficiente de producción máxima medio durante cualquier periodo finito de la fase de crecimiento exponencial, definido como la relación de la masa de células formadas y la masa de nutrientes consumidos.

Las ecuaciones diferenciales (3.9) y (3.11) forman un sistema no lineal acoplado, el cual no tienen solución analítica, su solución se puede hacer mediante la utilización de algún método numérico. La figura 3.3 representa la solución de las ecuaciones utilizando el método de Runge-Kutta.

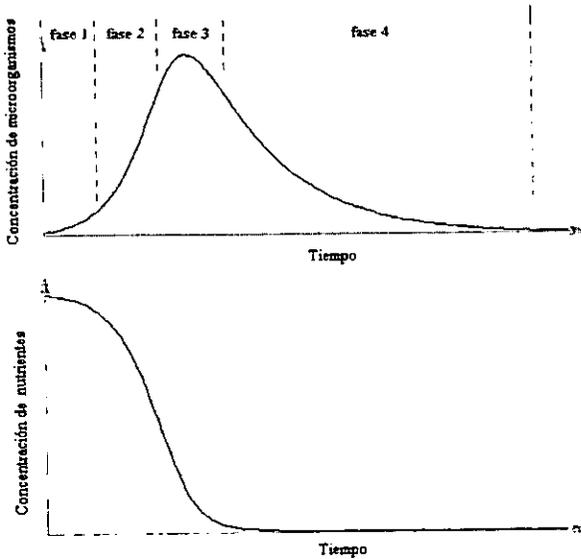


Figura 3.3
Curvas de crecimiento bacteriano y utilización de nutrientes típicas en los procesos biológicos de tratamiento

En la curva de la figura 3.3 que describe el crecimiento de los microorganismos se pueden identificar 4 fases:

1. **Fase de retardo.** Representa el tiempo necesario para que los organismos se aclimaten y comiencen a multiplicarse.
2. **Fase de crecimiento exponencial.** Las células se dividen a una velocidad determinada por su tiempo de generación y su capacidad de procesar alimento. Siempre existe una cantidad en exceso de alimento.
3. **Fase estacionaria.** La población de microorganismos permanece constante debido a que las células han agotado los nutrientes necesarios para el crecimiento y la generación de células nuevas se compensa con la muerte de células viejas.
4. **Fase de muerte exponencial.** La tasa de mortalidad de microorganismos excede la de generación de células nuevas. Debido a la falta de alimento, los microorganismos se ven forzados a metabolizar su propio protoplasma (metabolismo endógeno).

Modelos básicos de los procesos

Es deseable representar los procesos mediante modelos matemáticos y determinar entonces los parámetros utilizados en dichos modelos. Los modelos matemáticos parten de las relaciones cinéticas estudiadas en el capítulo anterior. Mediante los modelos matemáticos es posible obtener la información básica necesaria para desarrollar el tamaño de los reactores biológicos.

Antes de deducir los modelos matemáticos que rigen los procesos de tratamiento, definiremos algunos conceptos de utilidad que intervienen en ellos.

El tiempo medio de retención hidráulica θ se define como:

$$\theta = \frac{V}{Q} \quad (3.12)$$

donde V = Volumen del reactor
 Q = Gasto efluente

El tiempo medio de retención celular θ_c definido como:

$$\theta_c = \frac{VX}{Q_w X_c} \quad (3.13)$$

donde: X = Concentración de microorganismos en el reactor
 Q_w = Caudal de salida del reactor
 X_c = Concentración de microorganismos en el efluente

El tiempo medio de retención celular nos expresa la masa de microorganismos del reactor dividida entre la masa diaria de microorganismos purgada del sistema.

Debido a que la mayoría de los procesos de tratamiento funcionan bajo las características de un reactor de mezcla completa o un reactor de flujo pistón a continuación se deducirán únicamente estos dos modelos.

• Reactor de mezcla completa

Haciendo un balance de masas y aplicando los términos cinéticos estudiados en el capítulo 2 de ésta tesis tenemos:

$$V \frac{dC}{dt} = Q_e C_e - Q_s C_s - kCV \quad (3.14)$$

donde: V = volumen del reactor.

Q_e = Gasto de entrada

Q_s = Gasto de salida.

C_e = Concentración de materia orgánica de entrada.

C_s = Concentración de materia orgánica de salida.

k = constante de degradación

Si el gasto de entrada y salida es el mismo tenemos:

$$V \frac{dC}{dt} = Q(C_e - C_s) - kCV \quad (3.15)$$

Por lo tanto:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{Q}{V}(C_e - C_s) - kC \quad (3.16)$$

Al introducir en la ecuación (3.15) la definición de tiempo de retención hidráulica y simplificando algunos términos:

$$\frac{dC}{dt} = -C \left[\frac{1}{\theta} + k \right] + \frac{C_e}{\theta} \quad (3.17)$$

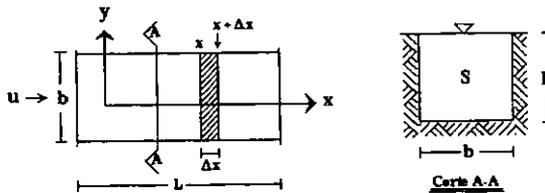
Finalmente integrando ambos lados de la ecuación considerando como límite de integración que para el tiempo $t = 0$, la concentración inicial es X_0 , llegamos a la ecuación (3.18), la cual nos indica la variación de la concentración de la materia orgánica dentro de un reactor de mezcla completa en función del tiempo.

$$C = C_0 e^{-\left(\frac{1}{\theta} + k\right)t} + \frac{C_e}{1 + k\theta} \left[1 - e^{-\left(\frac{1}{\theta} + k\right)t} \right] \quad (3.18)$$

Si consideramos que el sistema ha alcanzado un estado estable después de cierto tiempo, haciendo que $t \rightarrow \infty$ se le llama estado estacionario, y la ecuación (3.18) se reduce a la ecuación (3.19).

$$C = \frac{C_e}{1 + k\theta} \quad (3.19)$$

• **Reactor con flujo pistón**



donde: u = velocidad del flujo
 S = sección transversal del canal
 L = longitud del canal

Figura 3.4
Modelo del flujo pistón en un canal

Debido al modo de operar de un reactor de flujo pistón no se presentan acumulaciones dentro del sistema, al hacer un balance de masa se tiene:

$$E - S - T = 0 \tag{3.20}$$

que también podemos escribir como:

$$Q_e C_e - Q_s C_s - V k C = 0 \tag{3.21}$$

Si analizamos una franja diferencial del canal de la figura 3.4 tenemos que:

$$Q_e C_x - Q_s C_{x+\Delta x} - V k C (\Delta x S) = 0 \tag{3.22}$$

Si $Q_e = Q_s$ y $Q = u S$

$$u(C_x - C_{x+\Delta x}) - k C \Delta x = 0 \tag{3.23}$$

simplificando algunos términos de la ecuación:

$$\frac{dC}{C} = -\frac{k}{u} dx \tag{3.24}$$

Si integramos la ecuación (3.24) y tomamos como límites de integración que al inicio del cana, $L = 0$ la concentración inicial toma el valor de C_0 , tenemos:

$$C = C_0 e^{-kL/u} \tag{3.25}$$

La ecuación (3.25) nos indica el consumo del material orgánico, que pasa a través de un reactor con flujo pistón, en función de la longitud del canal

3.1.3.1. Lagunas de estabilización.

Se le llama laguna de estabilización a cualquier laguna o estanque, previstos y proyectados para llevar a cabo un tratamiento biológico. Las lagunas de estabilización, pueden clasificarse en relación a la presencia de oxígeno en aerobias, facultativas y anaerobias. La figura 3.5 es una representación esquemática de un tanque de estabilización, en el cual se presentan los estados aerobio, facultativo y anaerobio.

1. Lagunas aerobias.

Son grandes depósitos de poca profundidad, que emplean algas y bacterias en suspensión para el tratamiento de aguas residuales. Por lo general sus profundidades no son mayores a 80cm, lo que maximiza la producción de algas, lo cual suministra el oxígeno por fotosíntesis. También el oxígeno penetra por difusión atmosférica. El oxígeno es utilizado por las bacterias en la degradación aerobia de la materia orgánica. Los nutrientes y el dióxido de carbono liberados por las bacterias en este proceso, los emplean las algas, produciéndose una relación simbiótica. La eficiencia de estos procesos en la eliminación de la DBO₅ es muy alta situándose entre el 95 y 100 por ciento.

2. Lagunas anaerobias.

Lo que se busca en este tipo de estanques es la ausencia de oxígeno. Por lo general se utilizan para aguas residuales con alto contenido orgánico. Para mantener las condiciones anaerobias y conservar la energía calorífica, se utilizan estanques bastante profundos, (se han construido estanques hasta de 9m de profundidad). La temperatura es uno de los factores que mayor influencia tienen en estas unidades, se puede decir, que su eficiencia decrece notablemente con valores inferiores a 15°C. Tiene la ventaja de que se pueden conseguir rendimientos de eliminación de la DBO₅ superiores al 70 por ciento de forma continua, pero en ocasiones es posible conseguir la eliminación hasta de el 85 por ciento.

3. **Lagunas facultativas.** Este tipo de lagunas son una combinación de las mencionadas anteriormente. Requieren poco terreno, y por lo general tiene 1.8m de profundidad, lo que permite el crecimiento de microorganismos aerobios, anaerobios y facultativos. Al igual que en los procesos anteriores, la temperatura es el factor principal que afecta su eficiencia, que por lo general va desde un 60 hasta un 85 por ciento en la remoción de la DBO₅.

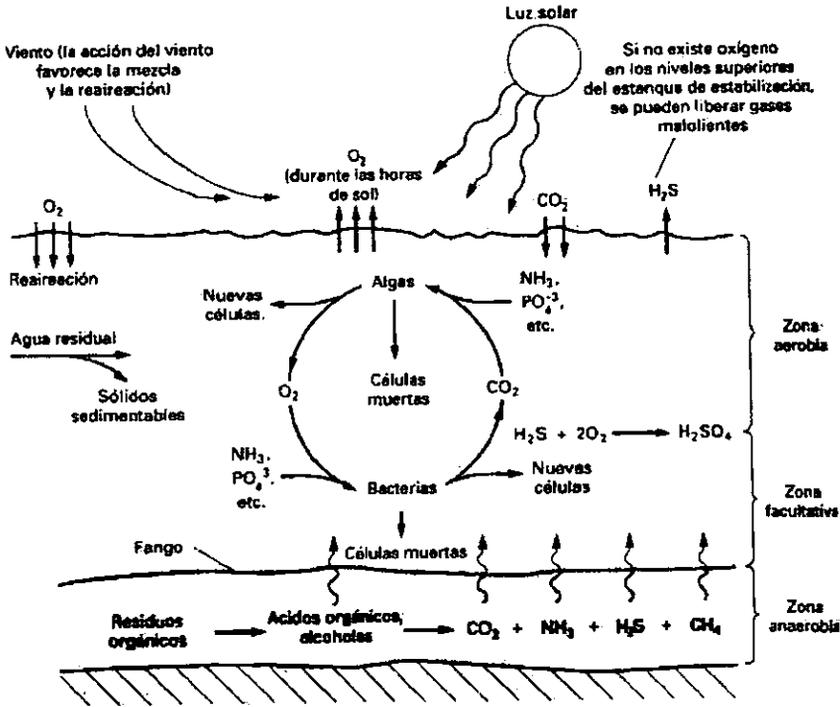


Figura 3.5
Representación esquemática de un tanque de estabilización

Tomando como base el período de retención, las lagunas pueden lograr la remoción total de patógenos. Para que esto suceda, se recomiendan tiempos de retención de alrededor de 30 días en un sistema de lagunas en serie anaerobio-facultativo-aerobio. Ningún sistema convencional, tipo lodos activados o filtros biológicos, puede competir con la eficiencia de remoción que se logra en las lagunas de estabilización, a menos que, finalizado el tratamiento se le aplique al efluente algún proceso de desinfección.

Diseño de los procesos de lagunas de estabilización

El diseño de las lagunas aerobias se basa en las cargas orgánicas y los tiempos de retención hidráulica. Los reactores de grandes dimensiones se suelen diseñar como reactores de mezcla completa. Para reactores de menores dimensiones, se suele utilizar la expresión de velocidad de eliminación (3.26) desarrollada por Wehner y Wilhelm, la cual considera un reactor de flujo arbitrario.

$$\frac{S}{S_0} = \frac{4ae^{1/2d}}{(1+a)^2 e^{1/2d} - (1+a)^2 e^{-1/2d}} \quad (3.26)$$

- donde: S = concentración de materia orgánica en el efluente
 S_0 = concentración de materia orgánica en el influente
 $a = \sqrt{1 + 4kd}$
 d = factor de dispersión = D/uL .
 u = velocidad del agua, m/h
 D = coeficiente de dispersión axial, m²/h.
 L = longitud del canal, m
 k = constante de relación de primer orden, 1/h
 t = tiempo de retención, h.

Cabe mencionar, que en la ecuación (3.26) aparece el factor de dispersión d , que puede tomar valores entre 0 hasta infinito. Para el caso en el que $d = 0$ tendríamos un reactor con flujo pistón y en cambio, cuando $d \rightarrow \infty$ la ecuación corresponde a un reactor de mezcla completa. El rango que generalmente se haya del valor del factor de dispersión para lagunas de estabilización aerobias se encuentra entre 0.1 y 2.0.

El diseño de lagunas facultativas es muy similar al de las lagunas aerobias. En estos casos, se pueden considerar factores de dispersión entre 0.3 y 1.0.

Aunque se han llevado a cabo un número considerable de investigaciones sobre lagunas anaerobias, el alto número de variables existentes en el proceso producen notables discrepancias en los resultados obtenidos. Dada estas diferencias el uso de criterios de diseño constituye una práctica aceptable.

Los principales criterios de diseño para las lagunas de estabilización se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1

PARÁMETROS DE DISEÑO PARA LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN			
Parámetro	L. Aerobia	L. Facultativa	L. Anaerobia
Tamaño del tanque, ha	< 4.0	0.8 - 4	0.2 - 0.8
Tiempo de retención, d	10 - 40	5 - 30	20 - 50
Profundidad, m	0.3 - 0.8	1.2 - 2.4	2.4 - 4.8
pH	6.5 - 10.5	6.5 - 8.5	6.5 - 7.2
Intervalo de temperaturas, °C	0 - 30	0 - 50	6 - 50
Temperatura óptima	20	20	30
Carga de DBO ₅ , kg/ha d.	67 - 134	56 - 200	225 - 560

Fuente: Modificado de Metcalf & Eddy "Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización, Tomo I"

3.1.3.2. Lodos activados.

Su nombre proviene de la producción de una masa activada de microorganismos capaz de estabilizar un residuo por vía aerobia. El proceso inicia cuando se introduce la materia orgánica al reactor, donde se mantiene un cultivo bacteriano aerobio en suspensión. El oxígeno es suministrado mediante aireadores mecánicos. Dentro del reactor se producen los procesos metabólicos de oxidación y síntesis. Después de un periodo de tratamiento, las aguas son conducidas a un tanque sedimentador para remover a los microorganismos del efluente de agua. Una parte de las células sedimentadas se recirculan al reactor, para mantener la concentración de células deseada, mientras que la otra parte se elimina del sistema.

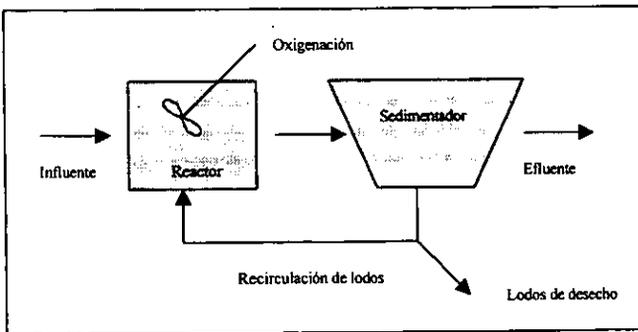


Figura 3.6
Esquema de un reactor de lodos activados

Debido a que el proceso de lodos activados es muy flexible, existen modificaciones que permiten adaptarlo a distintos tipos de problemas de tratamiento del agua residual. En la Tabla 3.2 se muestran las principales variantes del proceso de lodos activados.

Tabla 3.2

PRINCIPALES VARIANTES DEL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS.	
Proceso	Descripción
Convencional	Es un reactor de flujo pistón o de mezcla completa, en el que el agua residual entra en el tanque de aireación y se mezcla con aire disuelto o con agitadores mecánicos. El suministro de aire es uniforme a lo largo de todo el tanque. Se utiliza para aguas residuales municipales con baja concentración de contaminantes.
Aireación por pasos	El agua residual entra al tanque por varios puntos. La carga orgánica y la demanda de oxígeno son uniformes en todo el tanque.
Contacto y estabilización	En esta variante se utilizan dos tanques, en uno de ellos se lleva a cabo el contacto o mezcla del agua residual con el lodo, el otro llamado de activación recibe el lodo recién recogido del sedimentador y en el se airea sin presencia de sustancias orgánicas de nuevo aporte y por ello se agotan las reservas orgánicas presentes en el proceso.
Aireación prolongada	Es similar al proceso convencional excepto en que funciona en la fase de respiración endógena, lo cual precisa una carga orgánica baja, un largo periodo de aireación y la producción de pocos lodos.
Alta carga	Es un reactor de mezcla completa en el cual se utilizan altas concentraciones de SSVLM con elevadas cargas volumétricas. Esta variación permite una elevada relación F/M y largos tiempo de retención celular con tiempos cortos de retención hidráulica.
Oxígeno puro	Son reactores de mezcla completa en los cuales se inyecta oxígeno puro al tanque, mediante difusores. Son utilizados cuando existen limitantes de espacio. La cantidad de lodos producidos es sensiblemente menor
Canal de oxidación	Consiste en un canal ovalado con dispositivos de aireación mecánica. El agua residual circula por el canal a velocidades bajas (entre 0.24 y 0.35 m/s). Generalmente funcionan con largos tiempos de retención.
Flujo discontinuo	Son reactores que siguen un proceso de llenado y vaciado alternado, en el que todas las etapas del proceso de lodos activados se llevan a cabo en un reactor de mezcla completa.

Fuente: Modificado de Metcalf & Eddy "Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización, Tomo I"

Diseño del proceso de los activados

En la tabla 3.1 se puede observar que aunque existen muchas variantes de los procesos de lodos activados, todas se llevan a cabo en reactores de mezcla completa o en reactores de flujo pistón, debido a esto, los procesos se diseñan con las ecuaciones (3.19) y (3.25) respectivamente. Además, para el dimensionamiento de los reactores, también se utilizan las ecuaciones (3.27) y (3.28), las cuales corresponden a la concentración de microorganismos en el reactor y la concentración de nutrientes en el efluente para un reactor de mezcla completa sin recirculación y las ecuaciones (3.29) y (3.30) que a su vez corresponden a un reactor de mezcla completa con recirculación de lodos. Estas ecuaciones se obtiene haciendo un balance de masas, y suponiendo condiciones estacionarias.

$$\text{Mezcla completa sin recirculación} \left\{ \begin{array}{l} X = \frac{Y(S_0 - S)}{(1 - k_d \theta)} \quad (3.27) \\ S = \frac{k_s(1 + \theta k_d)}{\theta(Yk - k_d) - 1} \quad (3.28) \end{array} \right.$$

$$\text{Mezcla completa con recirculación} \left\{ \begin{array}{l} X = \frac{\theta_c Y(S_0 - S)}{\theta(1 + k_d \theta_c)} \quad (3.29) \\ S = \frac{k_s(1 + \theta_c k_d)}{\theta_c(Yk - k_d) - 1} \quad (3.30) \end{array} \right.$$

De igual forma, para el diseño de un reactor de lodos activados que funciona bajo un régimen de flujo pistón, se utiliza la ecuación (3.31), además la ecuación (3.25) nos indica la degradación de la materia orgánica que pasa a través del canal.

$$\frac{1}{\theta_c} = \frac{Yk(S_0 - S)}{(S_0 - S) + (1 + \alpha)k_s \ln(S_0/S)} - k_d \quad (3.31)$$

donde: S_0 = concentración del influente al reactor tras la mezcla con el caudal de recirculación = $(S + \alpha S)/(1 + \alpha)$.
 α = relación de recirculación.

En la tabla 3.3, podemos observar los parámetros típicos de diseño para las principales variantes de los procesos de lodos activados.

Tabla 3.3

PARÁMETROS DE DISEÑO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES MEDIANTE LAS PRINCIPALES VARIANTES DEL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS								
Variante	θ_c días	Relación sustrato- biomasa kg DBO/kg SS	Carga Volumétrica VI kg DBO/m ³	θ horas	SSLM mg/l	Razón de recirculación Qr / Q	Régimen de flujo	DBO, eliminado %
Convencional	4 - 15	0.2 - 0.4	0.3 - 0.6	4.0 - 8.0	1500-3000	0.25 - 0.5	Flujo pistón	85 - 95
Mezcla completa	4 - 15	0.2 - 0.4	0.8 - 2.0	3.0 - 5.0	3000-6000	0.25 - 1.0	Completo. mezclado	85 - 95
Contacto y estabilización	4 - 15	0.2 - 0.6	1.0 - 1.2			0.25 - 1.0		
T. de contacto				0.5 - 1.0	1000-3000		Completo. mezclado	80 - 90
T. de estabilización				4.0 - 6.0	4000-10000		Flujo pistón	
Aireación prolongada	20-30	0.05 - 0.15	0.16 - 0.4	18.0 - 24.0	3000-6000	0.75 - 1.5	Completo. mezclado	75 - 90
Alta carga	4 - 15	0.4 - 1.5	1.6 - 16.0	0.5 - 2.0	4000-10000	1.0 - 5.0	Completo. mezclado	75 - 90
Oxígeno puro	8 - 20	0.2 - 1.0	1.6 - 4.0	1.0 - 3.0	6000-8000	0.25 - 0.5	Completo. mezclado	85 - 95
Canal de oxidación	10 - 30	0.05 - 0.3	0.08 - 0.48	8.0 - 36.0	3000-6000	0.75 - 1.5	Flujo pistón	75 - 95
Flujo discontinuo	No aplica	0.05 - 0.3	0.08 - 0.24	12.0 - 50.0	1500-500	No aplica	Flujo intermitente	85 - 95

Fuente: César y Vázquez "Apuntes de Tratamiento de Aguas residuales"

3.1.3.3. Filtros percoladores.

Consisten en un lecho formado de un material sumamente poroso al que se adhieren los microorganismos y a través del cual se permite la circulación de aire y agua residual. El medio filtrante puede estar formado de piedras o diferentes materiales plásticos. La profundidad del lecho filtrante suele tener entre 1 y 2.5m. El agua residual se distribuye por la parte superior del filtro mediante un distribuidor rotatorio. Estos filtros funcionan gracias a los microorganismos aerobios adheridos en el lecho filtrante, los cuales degradan la materia orgánica del agua residual. En un principio, los microorganismos forman una capa de 0.1 a 0.2mm de espesor, en la cual se crea un ambiente aerobio. Conforme los microorganismos crecen, aumentan el espesor de la película, y el oxígeno se consume antes de que pueda penetrar en todo su espesor, produciéndose un ambiente anaerobio. Conforme la película crece, la materia orgánica absorbida se metaboliza antes de que pueda alcanzar los microorganismos situados en el medio filtrante, lo que produce que estos microorganismos entren en fase de crecimiento endógeno, en donde pierden la capacidad de adherirse y son arrastrados al fondo.

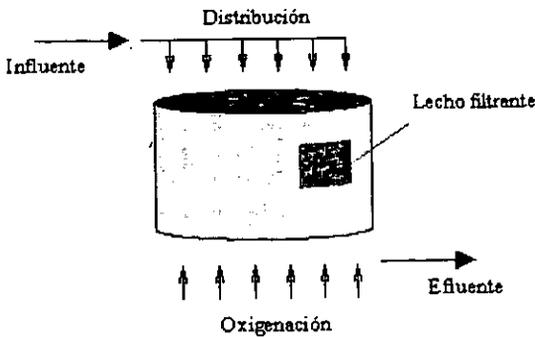


Figura 3.7
Esquema del proceso de filtros percoladores

Diseño de filtros percoladores.

La tasa de remoción del sustrato depende de muchos factores como son el gasto del influente, la tasa de carga orgánica, las tasas de difusividad de sustrato y oxígeno hacia el interior de la biopelícula y la temperatura. La modelación de éste tipo de sistemas se hace muy difícil debido al crecimiento de la biopelícula, el desprendimiento, su naturaleza aerobia y anaerobia, por lo que no es posible la aplicación de las ecuaciones de equilibrio en forma similar a los sistemas de cultivo suspendido estudiadas anteriormente. Esto ha generado que las ecuaciones de diseño hayan sido derivadas, en gran parte, de manera empírica.

Debido a que las propiedades de los medios plásticos son más predecibles, se han desarrollado numerosas relaciones empíricas para predecir el funcionamiento de los filtros percoladores. Haciendo un balance de masa, tomando en cuenta la tasa de flujo de materia orgánica hacia la película biológica, se llega a la ecuación (3.32) que fue desarrollada por Atkinson, la cual es la expresión más empleada para el diseño de filtros percoladores, en la cual se relaciona la eliminación de la DBO, la profundidad del lecho y la carga hidráulica.

$$\frac{S_e}{S_o} = e^{-kD/Q^n} \quad (3.32)$$

donde: S_e = DBO en el efluente

S_o = DBO en el influente

D = profundidad del medio

Q = tasa de carga hidráulica

k = constante de tratabilidad relativa a las características del agua residual y del medio.

n = coeficiente relativo a las características del medio

Los parámetros de diseño para filtros percoladores se muestran en la tabla 3.4, y éstos dependen de los intervalos de carga hidráulica y carga orgánica que pasa a través de ellos.

Tabla 3.4

PARÁMETROS DE DISEÑO PARA FILTROS PERCOLADORES			
Parámetro	Baja Carga	Carga intermedia	Alta carga
Tasa de carga hidráulica, $m^3/m^2 d$	1 - 4	4 - 10	10 - 40
Tasa de carga orgánica, $kg/m^3 d$	0.08 - 0.32	0.24 - 0.48	0.32 - 1.0
Profundidad, m	1.5 - 3.0	1.25 - 2.5	1.0 - 2
Relación de recirculación	0	0 - 1	1 - 3; 2- 1
Medio filtrante	Roca	Roca	Roca, materiales sintéticos

Fuente: Modificado de Metcalf & Eddy "Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización, Tomo I"

3.1.3.4. Discos biológicos rotatorios.

Los discos biológicos rotatorios se integran dentro de los procesos biológicos realizando una misión similar a la de los filtros percoladores. El proceso consiste en una serie de discos o cilindros, los cuales se sumergen parcialmente (aproximadamente 40% de su superficie) en el agua residual contenida en un depósito por la cual fluye. Los discos giran lentamente, exponiéndose alternativamente al aire y al agua residual. La velocidad de rotación de los discos debe de ser suficiente para producir el desprendimiento de la biomasa y para mantener suficiente turbulencia que mantenga suspendidos a los sólidos dentro del reactor.

Al igual que en los filtros percoladores, se forma una película de microorganismos sobre la superficie de los discos. Los microorganismos van degradando la materia orgánica y comienzan a crecer hasta su desprendimiento. Las capas desprendidas, forman flóculos en suspensión en el líquido, los cuales se separan en un tanque sedimentador.

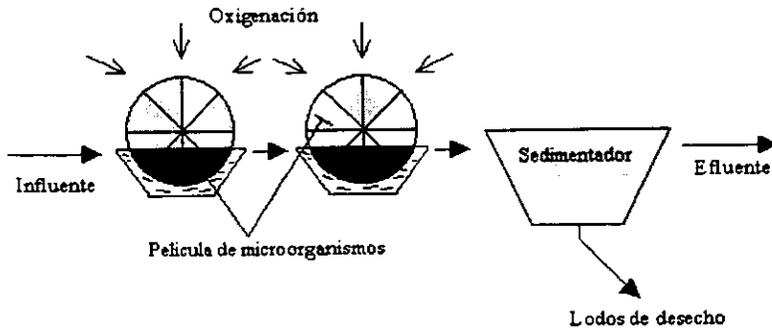


Figura 3.8
Esquema típico del proceso de discos biológicos rotatorios

Debido a que los biodiscos permiten el desarrollo de gran cantidad de biomasa, permiten tiempos de contacto corto, mantiene al sistema estable bajo condiciones variables y no se hace necesario la recirculación del efluente.

Diseño del proceso de discos biológicos rotatorios

Debido a que la utilidad de los modelos teóricos desarrollados para este tipo de sistemas no están perfectamente comprobados, el diseño generalmente se basa en el uso de parámetros de diseño.

Los fabricantes de biodiscos proporcionan gráficas que relacionan las tasas de carga y la eficiencia correspondiente. La figura 3.9 muestra una grafica de este tipo, en la cual se puede determinar la superficie requerida en términos del número y tamaño de módulos necesarios para el sistema.

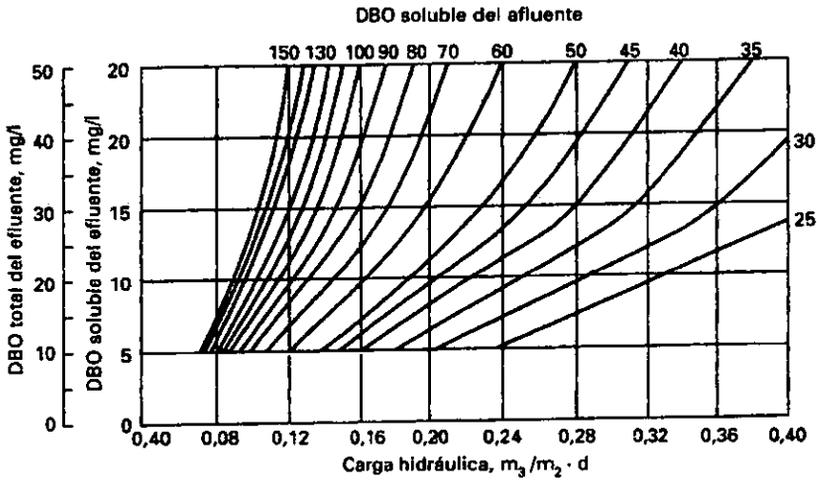


Figura 3.9
Curvas de diseño para discos biológicos rotatorios

3.1.3.5. Procesos anaerobios.

La digestión anaerobia es un proceso, en el cual se produce la descomposición de la materia orgánica e inorgánica en ausencia de oxígeno molecular. La materia orgánica se convierte biológicamente bajo condiciones anaerobias en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). El proceso se lleva a cabo en un reactor completamente cerrado, el cual es alimentado constantemente con agua residual con alto contenido de material orgánico, el agua permanece dentro del reactor determinado tiempo, suficiente para degradar la materia orgánica.

Los procesos de digestión anaerobia son muy utilizados para la estabilización de lodos concentrados producidos en otro tipo de tratamientos biológicos, pero actualmente se están utilizando reactores anaerobios para el tratamiento de aguas residuales con residuos orgánicos diluidos.

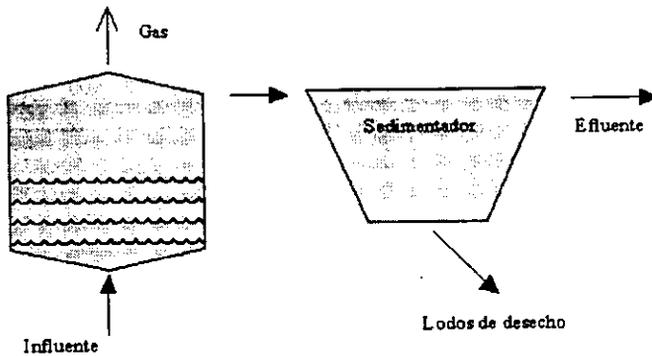


Figura 3.10
Esquema típico de un proceso anaerobio

Una de las desventajas de este tipo de tratamiento, es que las bacterias anaerobias tienen un lento crecimiento, lo cual obliga a tiempos de retención mas amplios para conseguir resultados satisfactorios del efluente. Una de las ventajas es que son sistemas compactos que a su vez producen un gas combustible y por ello un producto final útil.

Existen numerosos procesos de tratamiento anaerobio, entre los que se encuentran los procesos de cultivo fijo, dentro de los cuales encontramos el filtro anaerobio y el proceso de lecho expandido y los procesos de cultivos en suspensión dentro de los cuales encontramos el proceso anaerobio de contacto y el proceso UASB.

Entre los procesos de tratamiento anaerobio, el mas comúnmente utilizado en el tratamiento de aguas residuales de tipo municipal es el reactor UASB, debido a sus bajos requerimientos energéticos. Por esta razón se presenta a continuación dicho proceso anaerobio.

Reactor UASB.

También llamado proceso anaerobio de manto de fango, se basa en la formación de una cama de lodos granulares de alta sedimentabilidad en el fondo del reactor, el agua se introduce por la parte inferior, se distribuye uniformemente y en su trayectoria ascendente atraviesa la cama de lodos donde los microorganismos transforman la materia orgánica en biogás. Los gases producidos provocan una circulación interior, que colabora en la formación y mantenimiento de los gránulos. Finalmente, el líquido que contiene algunos sólidos residuales y algunos de los gránulos biológicos, se conduce un tanque sedimentador para separarlos.

En general el éxito del proceso UASB se debe a que los granos que forman el lodo constituyen biopartículas muy activas lo que confiere al reactor las características de un reactor empacado sin problemas de taponamientos, ni los elevados costos del empaque convencional. Sin embargo, si el agua residual no favorece la granulación o la formación de flóculos densos, el proceso UASB no deberá ser aplicado.

Diseño de reactores anaerobios

Existen dos enfoques para el diseño de reactores anaerobios: el método tradicional, que está basado en numerosas observaciones realizadas en este tipo de reactores y que consiste en proponer valores de carga orgánica y predecir el grado de eliminación de ella; y el método conceptual que intenta simular matemáticamente la cinética de las transformaciones que se llevan a cabo dentro del reactor.

La digestión anaerobia es un proceso complejo, por lo que no todas las reacciones han sido completamente explicadas. Los modelos desarrollados permiten predecir la concentración de la materia orgánica en el efluente en función de su concentración en el influente. Las ecuaciones (3.33) y (3.34) son ejemplos de los modelos cinéticos de los procesos anaerobios desarrollados por Monod y por Chen y Hashimoto.

$$S = \frac{k_s(1 + b\theta_c)}{\theta_c(\mu_{max} - b) - 1} \quad (3.33)$$

$$S = \frac{kS_0(1 + b\theta_c)}{(k - 1)(1 + b\theta_c) + \mu_{max}\theta_c} \quad (3.34)$$

donde: S_0 = concentración de sustrato limitante en el influente.

S = concentración del sustrato en el efluente.

μ_{max} = tasa máxima de utilización del sustrato.

k_s = constante de saturación media ($\mu = \mu_{max}/2$).

k = tasa máxima de utilización de sustrato por unidad de peso microbiano.

b = tasa de decaimiento microbiano.

θ_c = tiempo de retención celular

Los parámetros de diseño para reactores UASB que funcionan adecuadamente para el tratamiento de aguas residuales de tipo municipal son los siguientes:

Velocidad ascendente <math>< 1 \text{ m/h}</math>
Tiempo de retención > 5 horas
Altura del reactor 3 – 5 m.
Gasto de recirculación $0.25Q$.

3.1.4. Desinfección.

Consiste en la eliminación de los organismos que causan enfermedades. Los principales grupos de organismos que causan enfermedades son las bacterias, los virus y los protozoos. Existen diferentes métodos para desinfectar el agua los cuales los podemos clasificar en agentes físicos, agentes químicos y radiación.

Agentes químicos.

Los agentes químicos oxidantes, en especial el cloro, son los desinfectantes mas comunes utilizados en aguas residuales, aunque también se suelen utilizar el bromo y el yodo. También se utiliza el ozono, a pesar de que no deja una concentración residual que permita valorar su presencia después del tratamiento

Agentes físicos.

Como agentes físicos de desinfección encontramos la luz y el calor. El calor no suele ser empleado para desinfección en el tratamiento de aguas residuales debido a que nos es factible por su alto costo económico. De igual forma la luz solar aunque es un buen desinfectante solo es factible utilizarla para pequeñas cantidades de agua.

Radiación.

No suele ser muy común la desinfección del agua residual mediante radiación, pero se han utilizado rayos gamma para cumplir con este objetivo.

En las plantas de tratamiento, generalmente se utiliza el gas cloro, el hipoclorito de sodio o el dióxido de cloro para la desinfección del agua residual. Una de las principales ventajas de la utilización del cloro es el efecto residual que proporciona. Otra utilidad del cloro es que en ciertas cantidades puede oxidar el nitrógeno amoniacal del agua residual a nitrógeno gas y otros compuestos estables, a ésta reacción se le llama cloración al punto de quiebre. Si se añade suficiente cloro mas allá del punto de quiebre, se producirá un aumento del cloro libre disponible, lo cual asegura que se alcanzará la desinfección de efluente.

Una de las variables más importantes en el proceso de desinfección es el tiempo de contacto, por lo general, se ha observado que para una cierta concentración de desinfectante, la mortalidad de los patógenos aumenta cuanto mayor sea el tiempo de contacto.

3.2. Comparación y evaluación técnica de los procesos convencionales de tratamiento.

3.2.1. Clasificación de los procesos de tratamiento biológico secundario.

A continuación se presenta una clasificación esquemática de los distintos procesos secundarios de tratamiento biológico de aguas residuales municipales. Para una misma planta de tratamiento se pueden incluir distintos procesos de tratamiento y cada uno de ellos puede ser de características diferentes.

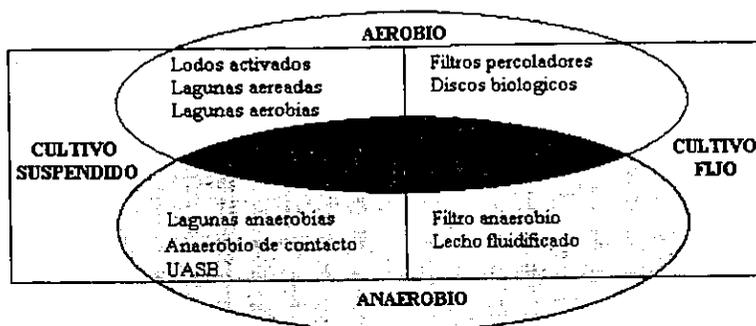


Figura 3.11
Clasificación de los procesos de tratamiento biológico

3.2.2. Comparación y evaluación técnica.

La evaluación técnica que a continuación se presenta se basa en los rendimientos de los procesos para la eliminación de sólidos suspendidos, materia orgánica y organismos patógenos. El propósito de ésta evaluación es establecer en que medida los procesos unitarios cumplen con la eliminación de contaminantes presentes en el agua residual de tipo municipal.

El contenido de sólidos totales, es una de las características físicas más importantes del agua residual, la cual engloba la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta.

La materia orgánica generalmente se mide en términos de la DBO₅. Este índice está relacionado con la medición del oxígeno disuelto en el agua, que consumen los microorganismos durante el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica.

La DQO o demanda química de oxígeno se emplea para medir todo lo oxidable ya sea por vía biológica o química. El parámetro se basa en la medición de un oxidante como el dicromato de potasio. Generalmente existe una relación directa entre los valores de la DQO y la DBO₅, lo que puede ser de gran utilidad ya que la DQO puede determinarse en un tiempo de 3 horas en comparación con los 5 días necesarios para determinar la DBO₅. Para aguas residuales de tipo municipal, la relación DBO₅/DQO varía entre 0.4 y 0.8.

Los rendimientos alcanzados por los procesos de tratamiento se pueden analizar desde el punto de vista de la calidad del efluente o en base a los porcentajes de eliminación alcanzados para los contaminantes más importantes. Los rendimientos alcanzables por los procesos estudiados en éste trabajo son los reflejados en la tabla 3.5. Por motivos de dificultad en la obtención de la información, para el caso de algunos procesos no se incluye la información referente a la eliminación de DQO, pero para estos procesos si se muestra la eliminación de DBO₅, la cual nos indica eliminación de material orgánico.

Tabla 3.5

GRADO DE TRATAMIENTO OBTENIDO MEDIANTE DIVERSAS OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS			
Operación o proceso unitario	Porcentajes de eliminación		
	DBO ₅	DQO	SS
Rejillas o cribas	0	0	0
Desarenadores	0 - 5	0 - 5	0 - 10
Tanques Imhoff	25 - 35	n/d	40 - 50
Sedimentador primario	30 - 40	30 - 40	50 - 65
Lodos activados	80 - 95	80 - 95	80 - 90
Filtros percoladores	65 - 80	65 - 85	65 - 85
Discos biológicos	80 - 85	80 - 85	80 - 85
Lagunas aerobias	65 - 75	n/d	98 - 99
Lagunas facultativas	60 - 85	n/d	98 - 99
Lagunas anaerobias	20 - 70	n/d	98 - 99
Reactor UASB	75 - 85	75 - 80	50 - 90
Cloración agua cruda	15 - 30	n/d	0

Fuente: : Modificado de Metcalf & Eddy "Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización, Tomo 1"

Con objeto de visualizar mejor los resultados referentes al rendimiento en la eliminación de contaminantes, se presenta la figura 3.12, los límites máximos de eliminación de SS y DBO₅ para los distintos procesos.

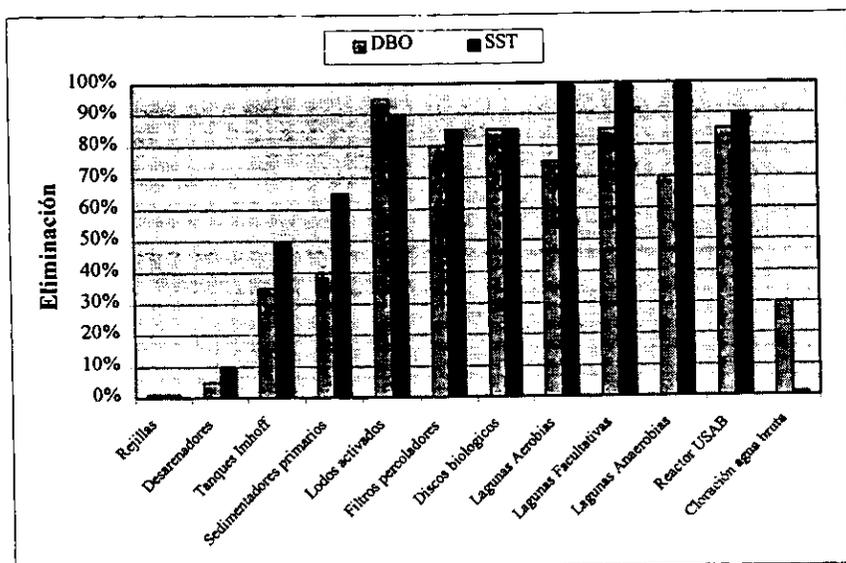


Figura 3.12

Grado de tratamiento obtenido mediante diversas operaciones y proceso unitarios

Los contaminantes por microorganismos biológicos presentes en el agua residual pueden ser muy diversos, aun así, los microorganismos coliformes que se encuentran en las aguas residuales se utilizan como indicadores debido a que su presencia es más numerosa que la de otros microorganismos patógenos y a que son fácilmente contabilizados en el laboratorio. En la tabla 3.6 se presenta el rendimiento en la eliminación de coliformes fecales para los distintos procesos de tratamiento estudiados.

Tabla 3.6

ELIMINACION DE BACTERIAS COLIFORMES PARA DIVERSOS NIVELES DE TRATAMIENTO		
Procesos	Sin cloración %	Con cloración %
Pretratamiento	10 - 20	52
Sedimentación primaria	25 - 75	99
Tanques Imhoff	50 - 90	99
Lagunas de estabilización	98 - 99	99
Lodos activados	90 - 98	99
Filtros percoladores	90 - 95	99
Discos biológicos rotatorios	90 - 92	99
Reactor UASB	70 - 75	99

Fuente: : Modificado de Metcalf & Eddy "Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización, Tomo I"

4. EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES.

Durante la elección de las alternativas de tratamiento de aguas residuales un punto muy importante es la estimación de los costos, tanto los de inversión como los de operación y mantenimiento. El objetivo de éste capítulo es describir como se integran éstos costos y además hacer una comparación cuantitativa de los costos para distintos procesos.

4.1. Descripción de la integración de los costos de inversión.

En la evaluación económica de un proyecto de tratamiento de aguas residuales municipales, es necesario considerar los costos de construcción y los asociados a éstos. Existen numerosos factores que afectan los costos del tratamiento del agua, entre ellos tenemos:

- Tipo de planta.
- Costos locales y de mano de obra.
- Criterios de diseño.
- Ubicación geográfica.
- Transportación.
- Condiciones climáticas.
- Nivel de competencia entre contratistas de construcción.
- Tiempo de entrega de componentes físicos.

Indudablemente para hacer la elección del proceso o los procesos más convenientes para una planta de tratamiento es necesario considerar los costos de inversión. En ocasiones, los costos de inversión son difíciles de estimar ya que generalmente se basan en condiciones ajenas al proceso de tratamiento de aguas residuales que se está evaluando, como son la disponibilidad de recursos del cliente o usuarios para llevar a cabo el proyecto, el costo del dinero, la posibilidad de allegarse financiamiento e incluso la capacidad de financiamiento por parte de la empresa que llevará a cabo el proyecto.

Los costos de una región a otra pueden variar considerablemente debido al costo de la mano de obra, costo de embarque y otros relacionados con la transportación de equipo y materiales, precios de los materiales de construcción y equipos adquiridos localmente.

El costo de inversión total se considera mediante la suma del capital fijo y el capital de trabajo. El capital fijo es el costo requerido para la construcción de la planta, el cual es igual a la suma de los costos directos más los indirectos. El costo directo es igual a la suma de los costos de los materiales y la mano de obra requeridos para la construcción de la planta, lo cual llega a representar entre el 70 y el 85% del capital fijo. Los costos indirectos involucran aspectos como la ingeniería y supervisión, gastos que apoyen la construcción como la adquisición de equipos temporales, apertura de caminos, etc. El capital de trabajo es el capital necesario para arrancar la planta de tratamiento y llega a representar entre el 10 y el 20% del capital total.

Debido a que existen grandes variaciones entre los procesos, no es factible incorporar todos los factores en una estimación preliminar de costos, no obstante, se

deben de considerar todas las condiciones conocidas que afectan sustancialmente el costo del proyecto.

A continuación se describirán los elementos que integran los costos de inversión en una planta de tratamiento de aguas residuales municipales.

4.1.1. Obra civil.

Los costos de obra civil son aquellos que se generan a partir de la construcción de las instalaciones de la planta de tratamiento. Los trabajos más importantes realizados durante la construcción, de los cuales debemos de estimar los costos son los siguientes:

- Despalme del terreno.
- Trazo y nivelación del terreno.
- Excavaciones y rellenos.
- Estructuras de concreto reforzado.
- Estructuras de acero estructural.
- Albañilería.
- Acabados.
- Interconexiones hidráulicas
- Terracerías y pavimentos.
- Guarniciones y banquetas.
- Jardinería
- Limpieza general.

Dentro de los costos que integran éstas actividades, se deben de tomar en cuenta los costo del personal técnico administrativo que se encarga de la elaboración del proyecto, de la mano de obra utilizada, las herramientas y equipos necesarios y los materiales empleados.

4.1.2. Equipo electromecánico.

Este concepto abarca al equipo electromecánico necesario para el funcionamiento de la planta de tratamiento. Dentro de los equipos necesarios encontramos:

- bombas
- aireadores
- cirbas
- medios de soporte

4.1.3. Terreno.

El área requerida para la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales puede ser factor fundamental en la elección de los procesos a utilizar. La poca disponibilidad de terreno o el alto costo del mismo puede influir de manera decisiva en la factibilidad de ciertos procesos, tales como los sistemas lagunares. En sentido inverso, un terreno barato y disponible favorecerá este tipo de procesos. En forma general se puede considerar que los tratamientos más económicos en cuanto a costos de inversión, operación y mantenimiento, son los que mayor superficie requieren.

4.2. Descripción de la integración de los costos de operación y mantenimiento.

En la actualidad se debe hacer énfasis especial en éste rubro, si se toma en cuenta la frecuente escasez de recursos económicos para mantener la operación de una planta de tratamiento. Debe ser incluso un criterio de decisión más importante que el costo de inversión inicial, ya que un sistema de operación costosa, por arriba de la capacidad de pago del usuario, será abandonado.

Los costos de operación y mantenimiento son muy variables y muy difíciles de estimar. Generalmente los costos de operación y mantenimiento dependen de los costos de mano de obra, calidad del agua cruda, grado de utilización del equipo, materiales e insumos necesarios y complejidad de las instalaciones. Además dependen en gran medida de los costos por consumo de energía y compuestos químicos, que se ven afectados por la variaciones de precio en el mercado.

En la figura 4.1 se muestra el desglose de los costos de operación y mantenimiento de una planta de tratamiento típica con un rendimiento de reducción media del 90 % en DBO_5 . Dentro de éste desglose no se incluyen el costo del manejo de lodos de desecho ya que es un rubro que varía mucho según el proceso de tratamiento utilizado. Las unidades ECU corresponden a una unidad monetaria utilizada en Europa antes de la introducción del euro, la relación es de 1 ECU = 1 Euro.

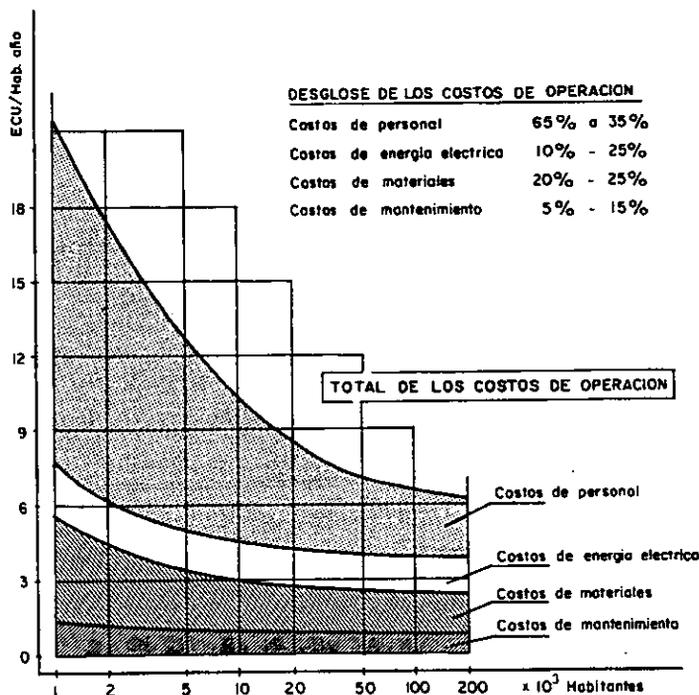


Figura 4.1
Desglose de los costos de operación y mantenimiento
 Fuente: Hernández Muñoz, "Depuración de aguas residuales"

A continuación se describirán los elementos que integran los costos de operación y mantenimiento en una planta de tratamiento de aguas residuales municipales.

4.2.1. Personal.

Deben tomarse en cuenta los aspectos de carácter administrativo, pues éstos se relacionan directamente con las necesidades de recursos económicos y de organización para operar las plantas de tratamiento.

El número y el grado de calificación del personal requerido para operar y mantener una planta de tratamiento de agua residual está en función de la capacidad, complejidad, grado de equipamiento, necesidades locales de la planta y de la estructura social de la comunidad. Debido a esto, cada planta tendrá condiciones únicas y requerirá un conocimiento de la situación. Un sistema de operación complejo requerirá un nivel de organización mayor, así como requerimientos superiores de personal calificado.

4.2.2. Manejo de residuos.

Se deben estimar los tipos y cantidades de residuos ya sean sólidos, líquidos o gaseosos generados por los diversos procesos de tratamiento. Hay que tener en cuenta que en las plantas de tratamiento sea cual fuere el proceso o procesos utilizados se generarán residuos en mayor o menor cantidad y tipo, según sean las características particulares del caso.

Dentro de estos residuos, se debe de poner especial atención al costo del manejo de lodos de desecho de los procesos que intervienen en la planta de tratamiento. Para la evaluación se deben considerar los costos por transporte y el sitio de disposición final.

Por el contrario, con algunos procesos, es posible generar subproductos con valor económico los cuales pueden representar ventajas adicionales al tratamiento del agua. Tal es el caso de la utilización de los lodos estabilizados para enriquecer el suelo o de los gases combustibles arrojados por algunos procesos anaerobios.

4.2.3. Energía.

El requerimiento de energía es un criterio fundamental en la evaluación de un proceso de tratamiento de aguas residuales, pues impacta de manera directa los costos de operación de la planta. Algunas plantas se abandonan debido a elevados consumos energéticos, lo cual hace insostenible su operación.

Se debe de buscar procesos de tratamiento que requieran bajo consumo de energía o si se puede, utilizar procesos que puedan ser autosuficientes, como son el caso de algunos procesos biológicos entre los cuales encontramos las lagunas de estabilización y los procesos anaerobios.

Para evaluar los requerimientos energéticos se debe de identificar el equipo electromecánico requerido y calcularse la potencia necesaria para su funcionamiento.

4.2.4. Insumos.

En los procesos de tratamiento, el consumo de reactivos constituye un costo fijo que nunca se puede amortizar.

Dentro de las necesidades de compuestos químicos de los procesos descritos en el capítulo anterior por lo general únicamente se emplea la adición de cloro (hipoclorito de sodio) al efluente final, para el caso de aguas residuales de tipo municipal. La dosis de cloro pueda variar de acuerdo al proceso utilizado y a la calidad del efluente que se desea obtener.

4.2.5. Mantenimiento.

Dentro del mantenimiento se incluyen todas las actividades que tienen como tarea el conservar el equipo eléctrico, mecánico, obra civil y estructuras en condiciones apropiadas para llevar a cabo las funciones a que están destinadas.

Los costos de mantenimiento no son fáciles de estimar, debido a que son función del equipo existente en la planta y del proveedor. Generalmente, el mayor mantenimiento lo demandarán los equipos con elementos móviles (motores, motorreductores, cadenas, etc.).

Las principales actividades de mantenimiento preventivo que deben desarrollarse son:

- Mantenimiento de las instalaciones eléctricas. Dentro de estas está: el mantenimiento de conductores para los aireadores, motores, bombas y red de alumbrado.
- Mantenimiento de equipo mecánico. El equipo mecánico debe inspeccionarse frecuentemente, de la forma en que lo recomiende el fabricante. También se contempla la pintura anticorrosiva en estructuras metálicas expuestas al agua residual, como láminas de compuertas, el engrasado de tornillos, etc.
- Mantenimiento de obras civiles. Estas generalmente están a cargo de las cuadrillas de obreros y contemplan actividades como la limpieza periódica de las obras de llegada, canales de acceso, limpieza de natas, sedimentos y materiales flotantes. Además se debe de dar mantenimiento a los diques, grietas en los tanques y a las instalaciones asociadas a la plantas como edificaciones y caminos de acceso.

4.2.6. Costos adicionales

Adicionalmente hay que considerar costos asociados como los de administración, servicios legales, servicios de ingeniería y arquitectura, inspecciones e imprevistos. Pueden existir otros costos adicionales que deben ser considerados en cada proyecto específico. Estos costos adicionales no son fáciles de estimar, pero generalmente equivalen al 25% del costo total de construcción, y deben ser añadidos al total para calcular el costo real del proyecto.

4.3. Evaluación económica: caso estudio.

Para ejemplificar como se obtienen los costos que integran un proyecto de una planta de tratamiento, se presentarán los datos referentes a la evaluación financiera de la planta de tratamiento de aguas residuales municipales localizada en Ciudad Acuña, Coahuila.

Esta planta esta diseñada para tratar un gasto medio diario de 250 l/s. Las aguas residuales a tratar en la planta son predominantemente de tipo domésticas con una concentración media de DBO₅ de 250 mg/l y una concentración media de SST de 250 mg/l.

En función a la calidad del agua cruda y a las condiciones de descarga establecidas en la NOM-001-ECOL-19997, así como a las características de la zona y la disponibilidad de terreno, se propuso un proceso de tratamiento biológico a base de lodos activados. Además se contemplan las operaciones físicas de pretratamiento necesarias para el correcto funcionamiento de la planta, que constan de rejillas y un canal desarenador, así como la desinfección del efluente y el tratamiento de los lodos generados.

4.3.1. Costos de inversión.

Para éste ejemplo, se dividieron los costos de inversión en inversión preoperativa e inversión fija. Los costos de inversión preoperativa son aquellos asociados a la ejecución del proyecto, mientras que los costos fijos son aquellos asociados a la construcción y equipamiento. A continuación se hará el desglose de los costos de inversión.

Licitación. El costo de las bases es de \$ 50 000.00

Proyecto ejecutivo. El costo del proyecto ejecutivo es de 2 850 000.00 y se desglosa en la tabla 4.1

Tabla 4.1

COSTO DEL PROYECTO EJECUTIVO	
Actividad	Importe
Estudio del sitio	\$ 350 000.00
Diseño del área civil.	\$ 1 000 000.00
Diseño del área mecánica	\$ 750 000.00
Diseño del área eléctrica	\$ 750 000.00
Total	\$ 2 850 000.00

Vigilancia de la concesión. Por concepto de vigilancia de la concesión se entrega la cantidad de \$ 1 000 000.00.

Fianza de garantía. El costo de la fianza de garantía es de \$ 147 550.00 que equivale al 1% del monto afianzado. El monto afianzado es el 20% del costo de construcción y equipamiento.

Seguros. Se obtiene un seguro contra daños, robo o destrucción parcial o total de todos los bienes y además contra daños a terceros como se muestra en la tabla 4.2.

Tabla 4.2

COSTOS DEBIDO A SEGUROS				
Seguro	Suma asegurada	Cuota anual	Prima neta Anual	Importe total
Daños, robo, destrucción total	\$ 70 000 000.00	2.2%	\$ 154 000.00	\$ 308 00.00
Responsabilidad civil	\$ 20 000 000.00	6.7%	\$ 134 000.00	\$ 268 00.00
Total			\$ 288 000 00	\$ 576 000.00

Puesta en marcha. El costo por el periodo de puesta en marcha y pruebas para estabilizar el proceso de lodos activados, así como verificar el correcto funcionamiento de los equipos de la planta es de \$2 890 000.00.

Supervisión. El costo de la supervisión equivale al 4.5% de la suma del proyecto ejecutivo, construcción y puesta en marcha, el desglose de estos costos se muestra en la tabla 4.3.

Tabla 4.3

COSTOS DEBIDO A LA SUPERVISIÓN DEL PROYECTO	
Supervisión	Importe
Proyecto ejecutivo	\$ 2 850 000.00
Construcción y equipamiento	\$ 73 775 000.00
Puesta en marcha	\$ 2 890 000.00
Total	\$ 79 515 000.00
Supervisión externa 4.0%	\$ 3 180 600.00
Supervisión interna 0.5%	\$ 397 575.00
Total	\$ 3 578 175.00

Obra civil y equipamiento. La tabla 4.4 contiene el desglose de los costos de la obra civil y el equipamiento necesarios para la planta de tratamiento.

Tabla 4.4

COSTOS DE OBRA CIVIL Y EQUIPAMIENTO	
Obra	Importe
Camino de acceso	\$ 248 325.00
Llegada de agua cruda	\$ 192 857.59
Canal Parshall derivación	\$ 121 872.89
Pretratamiento	\$ 576 498.87
Canal Parshall agua pretratada	\$ 50 280.81
Caja de distribución	\$ 32 708.62
Tanque de aireación	\$ 6 036 450.70
Sedimentador secundario	\$ 1 956 107.78
Tanque de contacto de cloro	\$ 637 414.80
Canal Parshall de agua tratada	\$ 50 280.81
Sala de cloración y sal de almacenamiento	\$ 238 757.85
Espesadores de lodos	\$ 272 937.66
Deshidratación de lodos	\$ 374 471.72
Subestación eléctrica y talleres	\$ 8 283 787.48
Edificio de operación y edificio central	\$ 857 734.87
Caseta de vigilancia	\$ 42 493.03
Interconexiones, drenaje, descarga y excedencias	\$ 1 857 431.6
Cárcamo de bombeo	\$ 276 358.33
Conducció de lodos	\$ 792 240.17
Equipamiento	\$ 47 697 729.06
Obras exteriores	\$ 3 178 275.69
Total	\$ 73 775 000.00

Terreno. El terreno donde se instalará la planta tiene un costo de \$ 2 800 000.00.

La tabla 4.5 muestra el total de los costos de inversión de la planta de tratamiento estudiada.

Tabla 4.5

COSTOS DE INVERSION	
	Importe
Inversión Preoperativa	\$ 11 091 725.00
Inversión Fija	\$ 76 575 000.00
Inversión total	\$ 87 666 725.00

4.3.2. Costos de operación y mantenimiento.

Los costos de operación y mantenimiento se pueden dividir en costos fijos y costos variables. El desglose de éstos costos para el caso de la planta de Ciudad Acuña, Coahuila se encuentra en las tablas 4.6 y 4.7 respectivamente.

Tabla 4.6

COSTOS FIJOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO		
	Importe mensual	Importe anual
Personal	\$ 93 074.00	\$ 1 116 888.00
Mantenimiento	\$ 27 084.00	\$ 325 008.00
Energía eléctrica	\$ 122 234.00	\$ 1 466 808.00
Seguros	\$ 16 542.00	\$ 198 504.00
Administrativos	\$ 21 816.00	\$ 261 792.00
Total	\$ 280 750.00	\$ 3 369 000.00

Tabla 4.7

COSTOS VARIABLES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO		
	Importe mensual	Importe anual
Energía eléctrica	\$ 52 386.00	\$ 628 632.00
Productos químicos	\$ 26 225.00	\$ 314 700.00
Reactivos de laboratorio	\$ 2 500.00	\$ 30 000.00
Transporte y disposición de lodos	\$ 18 590.00	\$ 223 080.00
Total	\$ 99 701.00	\$ 1 196 412.00

4.4. Comparación y evaluación económica de algunos procesos de tratamiento.

La comparación económica que se presenta a continuación, tiene como objetivo determinar cuál de los procesos de tratamiento biológico secundario resulta más económico. Esto es de gran importancia para países subdesarrollados como el nuestro, ya que las principales limitaciones en la aplicación de los procesos se dan en términos del dinero destinado al saneamiento.

Para efecto de éste trabajo, se tomaron los costos reportados en la referencia [20], dicha información fue utilizada debido a que dentro de los procesos comparados aparecen un proceso aerobio de lecho suspendido, un proceso aerobio de lecho fijo, un proceso anaerobio y un proceso combinado aerobio-anaerobio. Los costos fueron actualizados al mes de enero del año 2000, tomando como inflación la reportada en el índice general de precios y cotizaciones (IPC) publicado por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. La actualización se hizo de la siguiente manera:

$$\text{Costo 2000} = \frac{(\text{Costo 1996})(\text{IPC 2000})}{\text{IPC 1996}} \quad 4.1$$

Los costos actualizados son los mostrados en la tabla 4.8. Con objeto de visualizar mejor los resultados, se presentan las figuras 4.2 y 4.3 en las cuales se observan los costos de inversión y los costos de operación y mantenimiento respectivamente.

Tabla 4.8

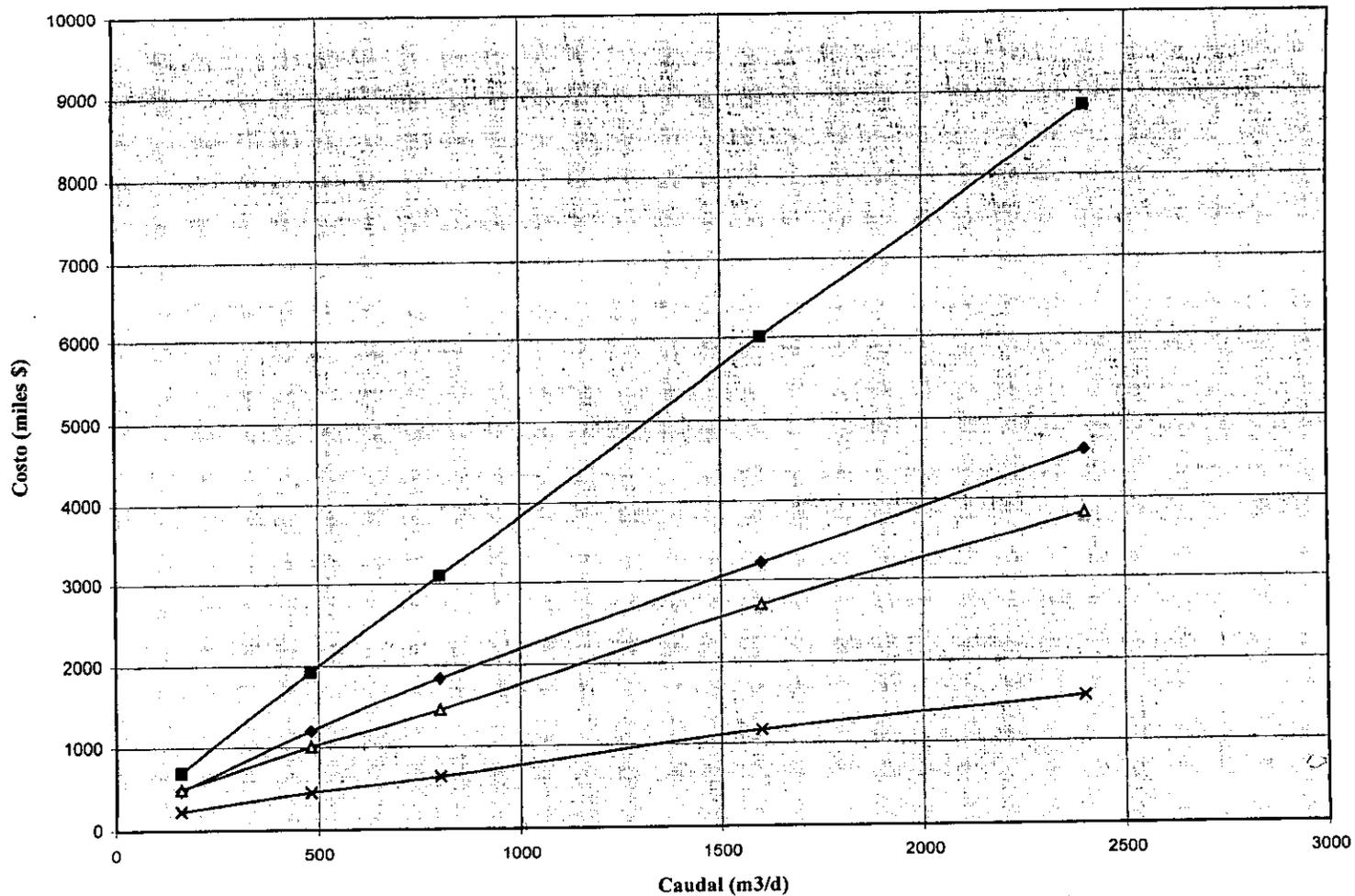
COSTOS DE INVERSIÓN, OPERACIÓN Y UNITARIO PARA CUATRO SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES							
	Caudal	Costo de inversión		Costo de operación y mantenimiento			Costo unitario
	(m ³ /d)	(miles \$)		(\$/mes)			(\$/m ³)
		Obra civil	Equipamiento	Reactivos químicos	Energía	Personal	
Aireación extendida	160	322	165	1899	1975	6109	6,75
	480	779	424	4748	3647	12218	5,28
	800	1164	681	9591	5319	12218	4,68
	1600	1908	1315	19182	10032	24594	4,20
	2400	2668	1934	28994	13832	27491	4,08
Discos Biológicos R.	160	208	498	4336	2087	3055	8,76
	480	505	1424	13009	2736	3055	7,47
	800	765	2335	21682	3647	3055	7,14
	1600	1345	4669	43365	7145	3055	6,89
	2400	1859	6974	64889	9424	3055	6,72
R. UASB - F. Percolador	160	218	283	3640	1368	3055	6,49
	480	443	566	10920	1519	3055	4,31
	800	626	826	18200	1671	3055	3,75
	1600	1138	1567	36084	3647	3055	3,48
	2400	1528	2295	54443	4396	3055	3,31
Reactor UASB	160	199	35	4621	911	3055	4,04
	480	408	49	13927	1064	3055	2,71
	800	570	70	23107	1215	3055	2,37
	1600	1046	118	46213	2887	3055	2,20
	2400	1400	151	69637	3647	3055	2,06

Fuente: Modificado de Sabino Sámano Castillo.

La figura 4.4 representa el costo unitario por inversión y operación. Los montos presentados se evaluaron, calculando el monto del pago mensual para amortizar la inversión bajo el esquema de amortización de pagos totales iguales, y considerando una tasa de interés fija del 55 % anual. Esta cifra se sumó al costo mensual de operación. Cabe mencionar, que esta tarifa de m³ de agua tratada debe ser tomado con fines comparativos, ya que los supuestos financieros no necesariamente reflejan la realidad de los costos de los procesos.

Costos de Inversion

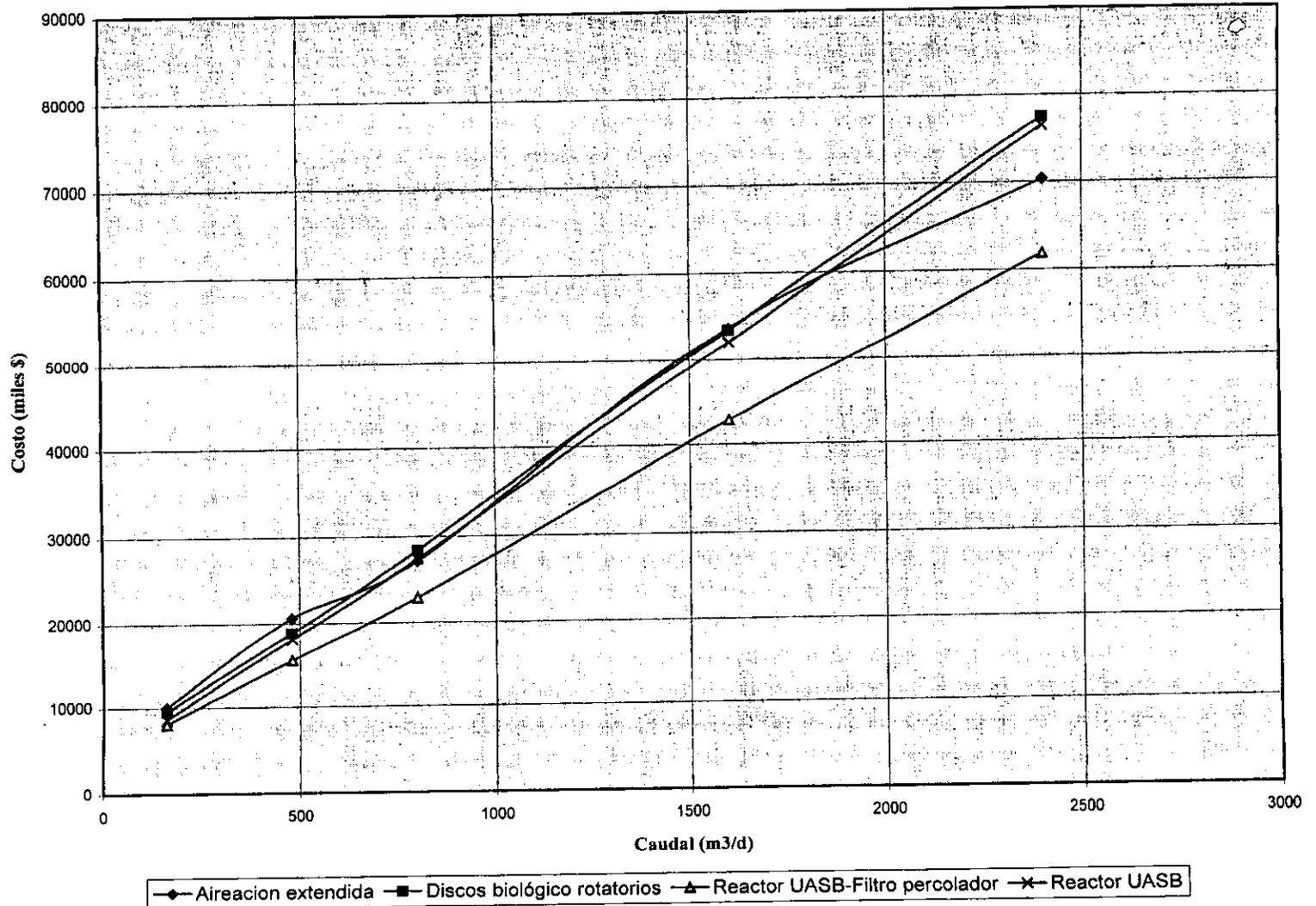
73



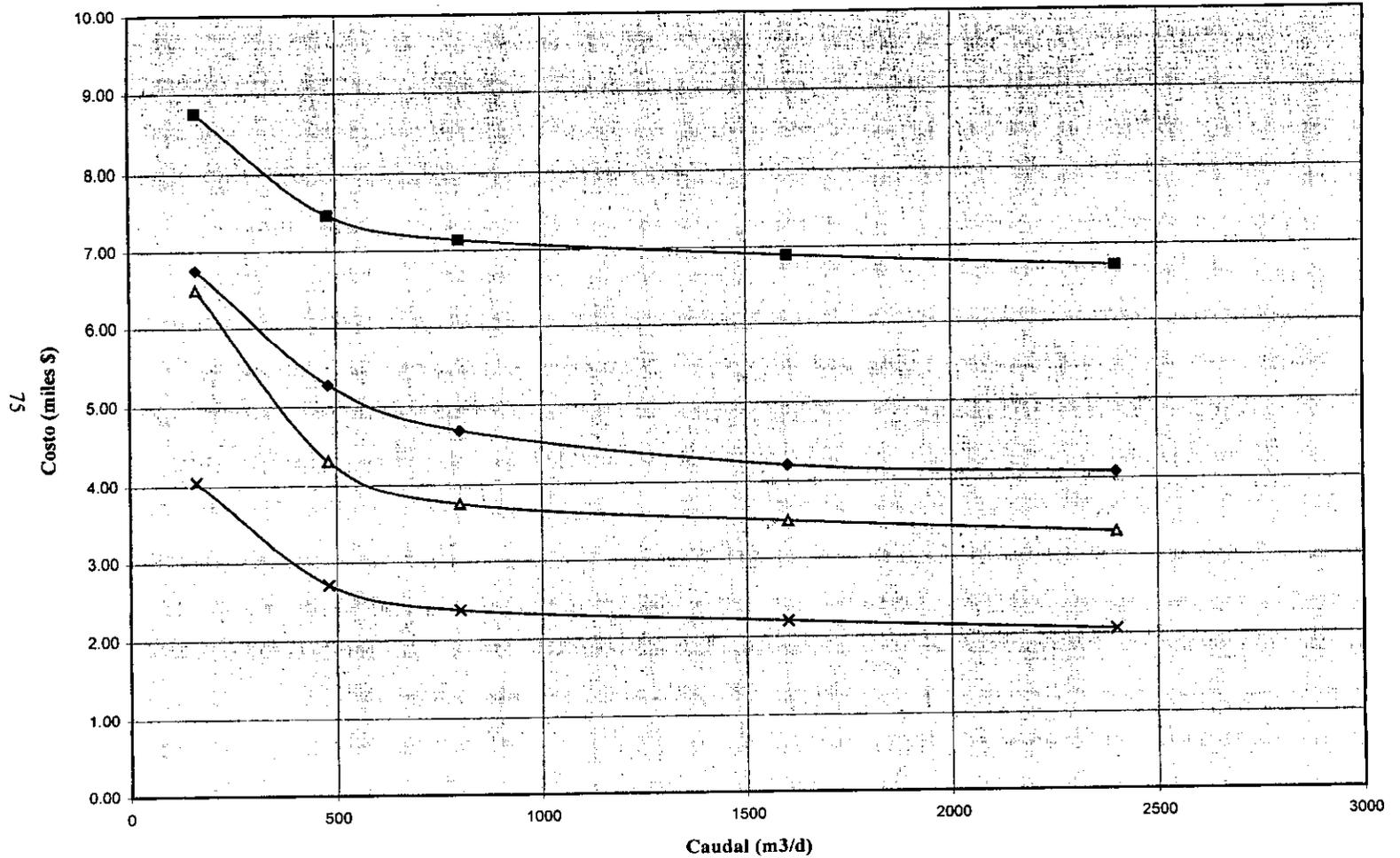
◆ Aireación extendida ■ Discos biológicos rotatorios ▲ Reactor UASB-Filtro percolador × Reactor UASB

Costos de operación y mantenimiento

74



Costo unitario por inversión y operación



◆ Aireacion extendida ■ Discos biológico rotatorios ▲ Reactor UASB-Filtro percolador ✕ Reactor UASB

Las figuras 4.2, 4.3 y 4.4 muestran que el proceso de discos biológicos rotatorios es el que resulta de mayor costo, mientras el proceso anaerobio mediante el reactor UASB es el de menor costo.

Cabe mencionar que aunque el costo mediante el reactor UASB es menor al de los otros procesos, éste produce una calidad del efluente inferior. La calidad del efluente para éste proceso es apto para riego agrícola restringido (NOM-001-ECOL-1996), pero no lo es para agua que involucre riesgo de contacto primario (NOM-003-ECOL-1997).

Los costos de operación y mantenimiento de los procesos de aireación extendida, discos biológicos rotatorios y reactor UASB son bastante similares.

De las opciones de tratamiento secundario, el sistema acoplado UASB-filtro percolador es el que resulta de menor costo unitario en inversión y operación por m³ de agua tratada, por lo que se considera una buena opción para el tratamiento de aguas residuales municipales generadas por pequeñas comunidades.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se presenta un listado de las ventajas y desventajas de los procesos de tratamiento de agua residual municipal analizados en este trabajo, a partir del cual se concluye qué procesos resultan más convenientes para las condiciones nacionales, tomando en consideración los aspectos técnicos, económicos y sociales.

Ventajas y desventajas de los procesos de tratamiento estudiados

Sedimentación primaria

Ventajas:

- Baja producción de lodos de desecho y el lodo de desecho tiene buena calidad en cuanto a su concentración de nutrientes (N y P) por lo que puede ser usado para mejorar el suelo.
- Requieren de área mínimas para su construcción.
- No se requiere de personal especializado para su operación y mantenimiento.
- Los costos de inversión inicial son bajos.
- Se pueden construir en cualquier terreno.
- El equipo de rastras prácticamente no consume energía.

Desventajas:

- Los lodos generados requieren tratamiento antes de su disposición.
- Requieren de un proceso de tratamiento secundario para cumplir con las normas de calidad del efluente.
- Cualquier desperfecto en el sistema de rastras, afecta la calidad del efluente.
- El manejo de lodos incrementa los costos de operación y mantenimiento.
- Requiere de equipo cuya fabricación es especializada.

Lagunas de estabilización

Ventajas:

- No requieren de un tanque de sedimentación secundario.
- No requieren de tratamiento de lodos.
- Los efluentes de las lagunas de estabilización, por su calidad bacteriológica, pueden usarse en cualquier actividad agropecuaria, desde la horticultura, los cultivos agroindustriales y acuicultura.
- Por lo general, no requieren de instalaciones electromecánicas.
- Los costos de operación y mantenimiento son mínimos ya que no requieren productos químicos, equipos, energía, ni mano de obra muy tecnificada.
- Su construcción se reduce al movimiento de tierras, pudiendo efectuarse con maquinaria y gente de la localidad.

Desventajas:

- Es posible que generen problemas de malos olores y proliferación de mosquitos.
- El uso de lagunas y estanques está generalmente limitado a pequeñas comunidades debido a sus altos requerimientos de terreno.
- Son los procesos que requieren mayor superficie de terreno.
- El terreno donde se ubique la planta debe ser sensiblemente plano con características impermeables del material subyacente.

Lodos activados

Ventajas:

- El agua tratada es de excelente calidad para usos en riego agrícola, llenado de lagos o en procesos industriales que no requieran agua de primer uso.
- No produce malos olores.
- La obra civil es de fácil ejecución.
- Necesidades de terreno intermedias.
-

Desventajas:

- Es un proceso sensible a la oscilación de caudales y cargas contaminantes.
- Las bajas temperaturas pueden producir un efluente con malas características.
- Requieren de equipos electromecánicos de alto consumo de energía.
- Requieren mayores necesidades de personal especializado para su operación y mantenimiento.
- Los costos de inversión pueden ser altos.

Filtros percoladores

Ventajas:

- Permiten tasa altas de carga orgánica.
- Con una buena ventilación, se minimizan los problemas de malos olores.
- Facilidad de operación.

Desventajas:

- Pueden generar la proliferación de moscas.
- Son extremadamente sensibles a las variaciones de temperatura, lo cual provoca que el efluente muestre variaciones de calidad estacionales drásticas.
- Las temperaturas extremadamente frías congelan y destruyen la biopelícula.
- El crecimiento excesivo de la biopelícula puede ocasionar la obstrucción de los poros, teniendo como resultado la inundación de porciones del medio.

- Pueden requerir da altos costos de operación debido al bombeo ya que la perdida de carga es grande.
- Los medios de soporte sintéticos pueden ser costosos.

Discos biológicos rotatorios

Ventajas:

- Requieren de tiempos de contacto cortos.
- El sistema es muy estable bajo condiciones variables del influente.
- La biomasa desprendida es relativamente densa y se sedimenta bien en el sedimentador secundario.
- Requieren bajo consumo energético y son bastante fáciles de operar.

Desventajas:

- No existen suficientes experiencias de operación documentadas.
- El proceso es muy sensible a cambios de temperatura.
- Los costos de inversión son relativamente altos.

Proceso anaerobio (UASB)

Ventajas:

- Soporta altas cargas (20 kg/DQO/m³).
- No generan grandes volúmenes de lodos.
- Aplicable a pequeña y gran escala.
- El biogás producido puede en ciertos casos ser subproducto energético valioso.
- Bajo requerimiento de energía.
- No requiere medio de soporte.
- Construcción relativamente simple y de bajo costo.
- Es un proceso simple y económico en operación y mantenimiento.

Desventajas:

- Es sensible a sólidos en suspensión y a grasas y aceites en el influente.
- Es sensible en aguas que forman precipitados
- Pueden presentarse problemas de malos olores.
- El proceso es sensible a cambios bruscos de pH fuera del intervalo de 6.5 a 7.5.
- El proceso es sensible a la presencia de grandes cantidades de compuestos químicos.
- El proceso no es efectivo para un tratamiento secundario completo ya que requiere de un postratamiento para remover en mayor grado la materia orgánica.
- Requiere de costosos equipos de control automático del proceso

Resulta difícil concluir cual proceso de tratamiento es el más adecuado a las condiciones actuales del país, ya que los procesos estudiados en éste trabajo varían tanto en las necesidades económicas (construcción, operación y mantenimiento), como en la calidad del efluente obtenido.

Debido a que el principal problema en México, que ha originado la degradación de sus cuerpos de agua, es la falta de recursos económicos, se debe buscar los procesos de tratamiento más económicos en cuanto a la inversión inicial, a la operación y al mantenimiento. Cabe mencionar que estos últimos pueden llegar a ser un serio problema durante el transcurso de la vida útil del proyecto.

Evidentemente el problema de contaminación en México se debe a la escasez de recursos financieros por lo que una buena alternativa para obtenerlos es que el gobierno fomente la inversión privada, dándole un riguroso seguimiento a los proyectos, para evitar su desvinculación con las decisiones políticas y con las normas de calidad del agua. Con lo que respecta a los programas de saneamiento elaborados por el gobierno, se debe de dar más importancia al saneamiento del agua ya que actualmente la mayoría de programas van dirigidos a proyectos justificables en términos de beneficio social como el abastecimiento de agua potable. Cabe señalar que el problema de contaminación del agua en México existe tanto en las grandes ciudades como en las pequeñas comunidades.

En los países en vías de desarrollo, el objetivo prioritario de tratamiento de las aguas residuales, debe ser la remoción de parásitos, bacterias y virus patógenos pues son males endémicos, sin descuidar la remoción de la materia orgánica y sólidos suspendidos presentes en el agua residual que contribuyen a sobrecargar de desechos los cuerpos de agua.

La comparación económica mostrada en éste trabajo comprende tan solo algunos de los procesos. Aunque existen diferentes fuentes bibliográficas con información económica de los diferentes procesos, cada una utiliza distintos criterios para determinar los costos, lo cual dificulta la comparación de los mismos. Además los costos varían según el número de usuarios, el tipo y tamaño de terreno considerado.

Tomando como base el período de retención, las lagunas en serie pueden lograr la remoción total de patógenos. Ningún sistema convencional, tipo lodos activados o filtros biológicos, puede competir con la eficiencia de remoción que se logra en las lagunas de estabilización en serie, a menos que, finalizado el tratamiento secundario, se haga un pulimento mediante un proceso de desinfección del efluente. Esto obviamente encarece el tratamiento y hace más compleja la operación y el mantenimiento.

Las lagunas de estabilización prácticamente no requieren actividades de operación y mantenimiento en comparación con los sistemas convencionales de tratamiento. Además, tampoco existe la dependencia de equipos electromecánicos, ya que los procesos biológicos involucrados son naturales y se adecuan a las posibilidades económicas, de espacio, valor de la tierra y de recursos humanos de México.

Las razones expuestas hacen que las lagunas de estabilización sean consideradas como una de las mejores opciones de tratamiento de aguas residuales en México. Una de las principales limitantes de las lagunas de estabilización es la demanda de áreas extensas de terreno, por lo que su implantación está limitada a pequeñas comunidades.

Para el caso de grandes ciudades el proceso de lodos activados es una buena opción, el cual arroja eficiencias altas de remoción de materia orgánica. Este tipo de proceso puede resultar un poco más costoso debido a que requiere mayores recursos para su operación y mantenimiento, además de que es necesario desinfectar el efluente para eliminar los patógenos presentes en el agua residual.

Procesos como los discos biológicos rotatorios y los reactores UASB son una tecnología de punta en el tratamiento de aguas residuales municipales, sin embargo requieren costosos equipos de control automático del proceso, lo que hace que para las condiciones de los países en vías de desarrollo, aún no sea una tecnología adecuada.

REFERENCIAS

1. Adalberto Noyola, "Desarrollo de tecnologías mexicanas en el tratamiento de aguas residuales: Una experiencia", Revista Interciencia, May-Jun 1999, Vol 24, N^o3.
2. "Compendio Básico del Agua en México", Comisión Nacional del Agua, México, septiembre de 1999.
3. Ignacio Castillo Escalante, "El saneamiento y la calidad del agua", Revista Tláloc, Abril – Junio de 200, año VII, num. 18.
4. "Ley de aguas nacionales", Comisión Nacional del Agua, México, diciembre de 1992.
5. "Aspectos del desarrollo sostenible referente a los recursos naturales en México.", Organización de las Naciones Unidas, enero de 1998.
6. "Programa del Medio Ambiente 1995-2000", Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca – Instituto Nacional de Ecología, México, 1996.
7. "El agua en México: Retos y avances", Comisión Nacional del Agua, México, 2001
8. "Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente", SEMARNAP, 1996
9. "Ley de Aguas Nacionales", Comisión Nacional del Agua, México, diciembre de 1992.
10. "Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996", Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, México 1996.
11. "Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996", Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, México 1996.
12. "Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1997", Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, México 1997.
13. Alejandro Garza Ruzafa, Marcos Ramos Arras, "Saneamiento de las aguas residuales y reúso de agua tratada", Revista Tláloc, Abril – Junio de 200, año VII, num. 18.

14. Enrique Mejía Maravilla “Principales aspectos que hay que considerar en los proyectos de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales”, Revista Tláloc, Abril – Junio de 200, año VII, num. 18.
15. Fernando Martínez Guzmán, “Sistemas de tratamiento de aguas residuales para poblaciones menores de 40000 habitantes”, Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, septiembre de 1990.
16. Aurelio Hernández Muñoz, “Depuración de aguas residuales”, Colegio e ingenieros de caminos, canales y puertos, España, 1990.
17. Metcalf & Eddy, “Ingeniería de aguas residuales, Tratamiento, vertido y reutilización. Tomo I y II, Mc Graw-Hill, México, 1996.
18. R. S. Ramalho, “Tratamiento de aguas residuales”, Editorial Reverté, S.A., España 1991.
19. Fabian Yáñez Cossío, “Lagunas de estabilización, teoría, diseño, evaluación y mantenimiento”, Cuenca, Ecuador, 1993.
20. José Sabino Sámano Castillo, Adalberto Noyola, “Análisis del costo de inversión y operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales para poblaciones pequeñas”, Revista Federalismo y desarrollo, año 9, Abril-Mayo-Junio 1996.
21. W. Wesley Eckenfelder, “Manual of treatment processes, Volume 1”, Enviromental Science Services Corporation, U.S.A, 1970.
22. Carlos Alberto Flores Torres, “Tratamiento anaerobio de aguas residuales municipales”, Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. 2001.
23. Carlos Alberto Domínguez Muñoz, “Planta de tratamiento de aguas residuales de ciudad Acuña, Coahuila”, Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, México , octubre de 2000.

PAGINAS DE INTERNET

<http://dgcnesyp.inegi.gob.mx/> Página del Banco de información económica INEGI

<http://www.cepis.org.pe/> Página del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.