



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

TRATAMIENTO AVANZADO DEL AGUA RESIDUAL

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL

PRESENTA:
MARISOL ESCALANTE MORA

DIRECTOR DE TESIS:
M. I. ALBA B. VAZQUEZ GONZALEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, MEXICO, D. F. 2004





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/135/00

Señor
MARISOL ESCALANTE MORA
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **ING. ALBA B. VAZQUEZ GONZALEZ**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

"TRATAMIENTO AVANZADO DEL AGUA RESIDUAL"

- INTRODUCCION**
- I. TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN MEXICO**
 - II. NIVELES DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES**
 - III. TRATAMIENTO AVANZADO**
 - IV. DESCRIPCION DE LOS PROCESOS AVANZADOS EN LA PLANTA PILOTO "CERRO DE LA ESTRELLA" DEL D.F.**
 - V. CONCLUSIONES**

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 27 de noviembre de 2000.
EL DIRECTOR


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

AGRADECIMIENTOS

A Dios.... Por darme todo lo que tengo, mi familia, mis amigos y por brindarme amor y salud, hoy, mañana y siempre.

A Isabel y Víctor, mis padres por el amor, la confianza y el apoyo brindado.

A mis hermanos: Isabel, Víctor, Miguel, José, Carlos, Jorge y Luis, por compartir los momentos buenos y los tristes también. Ejemplo de superación, perseverancia y unidad.

A mis sobrinos: José Alberto, Brandón Erick, Miguel Ángel y Víctor Raúl, que este trabajo sea superado por ustedes.

A mis familiares por confiar en mi.

A mis profesores por la formación académica brindada durante mi vida estudiantil.

A la M. I. Alba B. Vázquez González por su apoyo y paciencia en la elaboración de este trabajo, el compartir sus valiosos conocimientos y experiencia. Al M. I. Enrique César Valdez por su apoyo, gran vocación de docencia e interés en mi desempeño profesional. Compañeros y amigos los cuales siempre han sido y serán símbolo de motivación.

A mis amigos por compartir una de las mejores etapas de la vida: Alejandra, Dulce, Olga, Susana, Tamara, Miguel, Pablo, Javier y todos aquellos que compartieron conmigo la estancia por esta Facultad.

De manera especial a Jorge y Eduardo que me apoyaron en la elaboración de este trabajo y por su paciencia.

A Eduardo muchas gracias por estar conmigo en los momentos buenos y malos y por que siempre tuviste las palabras de aliento cuando las necesite.

A mis compañeros de trabajo, por compartir sus valiosas experiencias, las cuales han trascendido en mi formación profesional, y sobre todo por hacer placentera mi estancia en la División de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica.

A la Facultad de Ingeniería, por el invaluable esfuerzo que ésta hace en la formación profesional de todos los que asistimos a ella.

A nuestra Máxima Casa de Estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México, por su extraordinaria labor educativa y por abrirme las puertas del conocimiento universal en aras del progreso.

Asimismo, deseo expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que colaboraron para que esta tesis fuera concluida.

Por último quisiera agradecer a todas aquellas personas que ya no están con nosotros y que fueron especiales.

POR QUE TODOS SOMOS ALQUIMISTAS.....

**CUANDO UNA PERSONA REALMENTE DESEA ALGO, EL
UNIVERSO ENTERO CONSPIRA PARA QUE REALICE SUS
SUEÑOS.**

**ASÍ SUCEDE SI APRENDEMOS A ESCUCHAR LA VOZ DEL
CORAZÓN Y COMPRENDEMOS AQUEL LENGUAJE QUE
TRASCIENDE LAS PALABRAS, EL QUE MUESTRA AQUELLO
QUE LOS OJOS NO PUEDEN VER.**

PAULO COELHO

INTRODUCCIÓN

I.	Tratamiento de las aguas residuales en México	
I.1	Generalidades	1
I.2	Composición de las aguas residuales	4
I.3	Legislación Nacional aplicable	11
II	Niveles de tratamiento de las aguas residuales	17
II.1	Tratamiento preliminar	19
II.2	Tratamiento primario	21
II.3	Tratamiento secundario	24
II.4	Desinfección	27
II.5	Tratamiento de lodos	28
II.6	Tratamiento avanzado o terciario	28
II.7	Tratamiento del agua residual industrial	29
III	Tratamiento avanzado	
III.1	Importancia del tratamiento avanzado	30
III.2	Clasificación del tratamiento avanzado	31
III.3	Procesos aplicables en el tratamiento avanzado	32
III.3.1	Remoción del Nitrógeno	32
III.3.2	Remoción del Fósforo	35
III.3.3	Remoción de sólidos finos suspendidos	37
III.3.4	Remoción de organismos patógenos	43
III.3.5	Nitrificación	47
III.3.6	Desnitrificación	49
III.3.7	Remoción de compuestos tóxicos y compuestos orgánicos	51
III.3.8	Remoción de sustancias inorgánicas disueltas	52
IV	Descripción de los procesos avanzados en la planta piloto Cerro de la Estrella del D. F.	
IV.1	Justificación de la planta	57
IV.2	Descripción de la planta	57
IV.3	Tren de procesos	58
IV.3.1	Espumación	61
IV.3.2	Tratamiento químico	63
IV.3.3	Desorción de amoniaco	68
IV.3.4	Recarbonatación	70
IV.3.5	Filtración	72

IV.3.6	Adsorción en carbón activado	75
IV.3.7	Ozonación	79
IV.3.8	Ósmosis inversa	81
IV.3.9	Cloración	83
V	Conclusiones	85
	Bibliografía	88

INTRODUCCIÓN:

Toda comunidad genera residuos tanto líquidos como sólidos, los líquidos llamados aguas residuales, son el agua que genera la comunidad una vez que ha sido contaminada debido a los diferentes usos para los cuales ha sido empleada. El agua residual es la combinación de los residuos líquidos procedentes tanto de residencias como de instituciones públicas y establecimientos industriales y comerciales, a los que pueden agregarse eventualmente, aguas subterráneas, superficiales y pluviales.

Si se permite la acumulación y estancamiento de agua residual, la descomposición de la materia orgánica que contiene puede conducir a la generación de grandes cantidades de gases malolientes, además de la presencia frecuente de numerosos microorganismos patógenos causantes de enfermedades, el incremento en el contenido de nutrientes que pueden estimular el crecimiento de plantas acuáticas y además la posibilidad de contener compuestos tóxicos. Por lo anterior, la evacuación inmediata y sin molestias del agua residual de sus fuentes de generación, seguida de su tratamiento y eliminación, es no sólo deseable, sino también necesario.

Aunque la captación y drenaje de aguas pluviales datan de tiempos antiguos, a finales del siglo XIX y principios del XX se probaron varios procesos de tratamiento; alrededor de 1920, el tratamiento de las aguas residuales había evolucionado hasta llegar a los procesos que hoy se usan comúnmente. Sin embargo, el diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales se hizo empíricamente hasta mediados del siglo XX. A partir de 1960 se tuvieron avances importantes en el conocimiento del tratamiento de aguas residuales, y se formularon y cuantificaron los procesos originales. Pero la ciencia del tratamiento de aguas residuales no es estática; actualmente se desarrollan procesos avanzados con los cuales se puede producir agua potable a partir de las aguas residuales domésticas.

Actualmente en nuestro país se conoce que el 87.8% de la población dispone de agua potable pero sólo el 76.2% cuenta con red de alcantarillado (datos obtenidos del Programa Nacional Hidráulico 2001-2006), aún en ciudades donde tienen este servicio, tienen grandes áreas que carecen de él, por lo que se ha recurrido al empleo de fosas sépticas para la depuración parcial del agua residual, sin embargo son tantas que resulta contraproducente, generando otro tipo de problemas. En otras poblaciones, los efluentes se vierten a redes de drenaje que finalmente descargan a cauces superficiales en los que la dilución y autopurificación del cuerpo de agua es insuficiente.

En el intento de cumplir la normatividad sobre el control de la contaminación del agua, la preocupación por la salud pública y el medio ambiente está desempeñando un papel cada vez más importante en la elección y diseño tanto de la red de alcantarillado como de las plantas de tratamiento.

El tratamiento de las aguas residuales se inició con el propósito de: remover sólidos flotantes, reducir la cantidad de materia orgánica biodegradable y eliminar microorganismos patógenos, desafortunadamente estos objetivos han sido alcanzados con una baja cobertura en nuestro país.

Existen actualmente 3 normas oficiales mexicanas que establecen los requerimientos de aguas residuales que se descargan a: cuerpos receptores, alcantarillado, y que se reúsan en servicios al público. La **NOM-001-CNA-1996**, establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, la **NOM-002-CNA-1996**, establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado y la **NOM-003-CNA-1997** los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público; en las que se definen la cantidad de contaminantes permitidos de descarga. Existe una creciente preocupación en relación con la gestión de las aguas residuales, es por eso que sé esta estudiando la efectividad de las instalaciones y mejoras de las ya existentes, especialmente en cuanto al funcionamiento de las plantas de tratamiento.

A partir de la entrada en vigor de las normas arriba mencionadas se producen esencialmente los siguientes cambios, con respecto a las normas precedentes de 1993. a) Existe una única norma que establece los límites máximos permisibles de los contaminantes en las descargas a cuerpos de agua y bienes nacionales. b) Se establece un cumplimiento gradual y progresivo y c) El reúso del agua residual tratada se considera por primera vez.

De acuerdo con el Programa Nacional del Medio Ambiente y Recursos Naturales 2001-2005 en lo que se refiere al subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, las inversiones de la federación, estados y municipios han disminuido de aproximadamente 11 mil millones de pesos en 1993 a 3.9 mil millones de pesos en el 2000.

La experiencia práctica en el tratamiento avanzado de aguas residuales en nuestro país es relativamente escasa; por lo que debido a la importancia que día a día va cobrando este rubro, se han realizado investigaciones acordes a las características del agua residual producidas por el sector industrial, comercial, de servicios y domésticos, de la gran urbe de la Ciudad de México.

Por otro lado, la sobre-explotación de los acuíferos del Valle de México y los altos costos de importación de agua potable de otras cuencas, confirman que las aguas residuales son un recurso valioso, el cual puede ser utilizado, previo tratamiento, en diferentes actividades del hombre.

Por estas razones, el Departamento del Distrito Federal a través de la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (D.G.C.O.H.), hoy Sistemas de Agua del Distrito Federal, construyó en 1984 los dispositivos experimentales de tratamiento avanzado de aguas residuales, en terrenos de la planta de tratamiento de aguas residuales "Cerro de la Estrella", localizada en la Delegación Iztapalapa.

La planta piloto utiliza el efluente del sedimentador secundario de esta planta, como materia prima del proceso terciario en cuestión. El caudal de diseño de la planta piloto de los dispositivos experimentales de tratamiento avanzado de aguas residuales es de 0.5 l/s; contando con nueve procesos que pueden interconectarse en la secuencia que se desee, dependiendo de la calidad final requerida y las características físico-químico-biológicas del agua que se trate.

Este trabajo presenta una recopilación bibliográfica sobre tratamiento avanzado y un resumen del trabajo realizado en el área del tratamiento avanzado de aguas residuales en el Distrito Federal, en las instalaciones de los Sistemas de Agua del Distrito Federal, teniendo como finalidad aportar recomendaciones que puedan servir como antecedentes a posibles trabajos posteriores.

El desarrollo del presente tema tiene como finalidad dar un panorama amplio de la problemática de las aguas residuales, el reúso en las diferentes actividades del hombre y los procesos aplicables en el tratamiento avanzado.

El enfoque principal de este trabajo se centra en los criterios de selección de los procesos de tratamiento avanzado, las bases de diseño, la experimentación realizada y los resultados obtenidos para cada uno de los procesos unitarios.

CAPITULO I

TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN MÉXICO

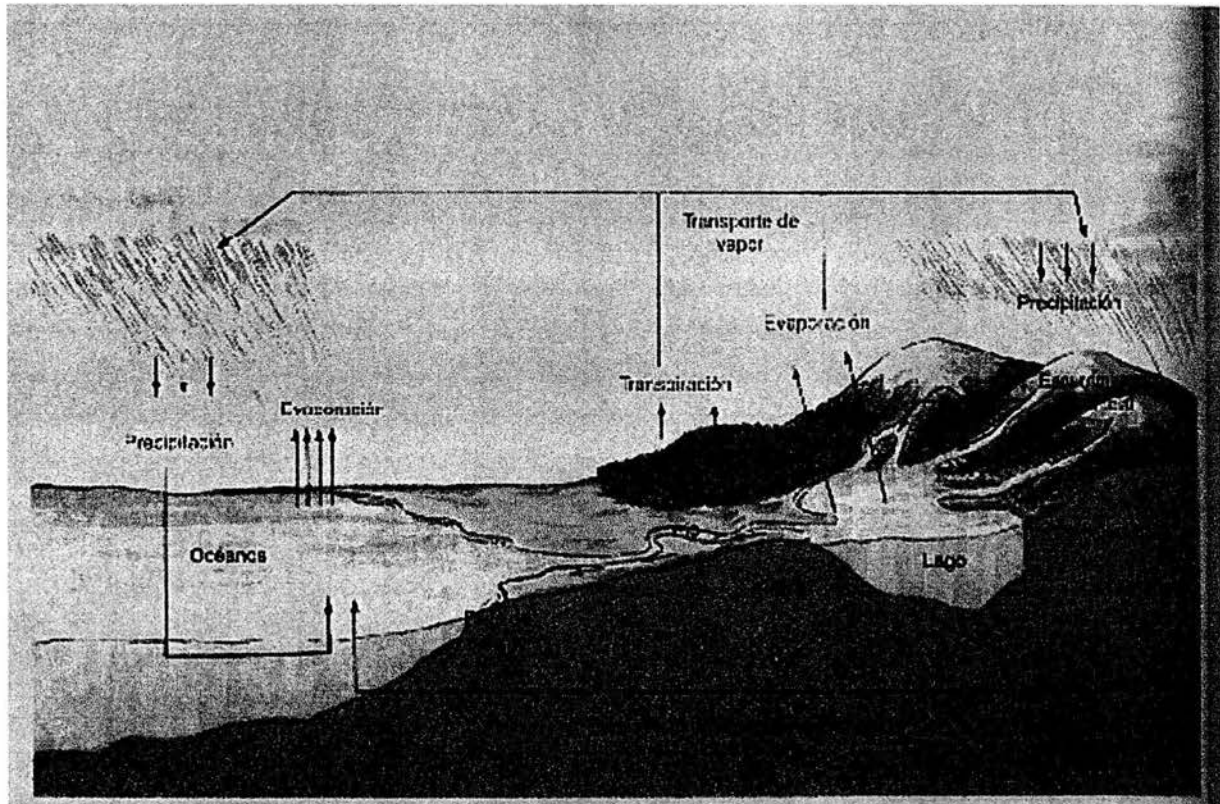
Capítulo I

Tratamiento de las aguas residuales

I.1 Generalidades

El ciclo hidrológico es un término descriptivo aplicable a la circulación general del agua, puede empezar con la evaporación de los océanos. El vapor resultante es transportado por las masas de aire en movimiento, en determinadas condiciones el vapor se condensa formando nubes que, a su vez, pueden ocasionar precipitaciones. De la precipitación sobre el terreno, una parte es retenida por la superficie, otra parte escurre sobre ella y la restante penetra en el suelo.

El agua retenida es devuelta a la atmósfera por evaporación y por la transpiración de las plantas. La parte que escurre sobre la superficie es drenada por arroyos y ríos hasta el océano; aunque parte se pierde por evaporación. El agua que se infiltra satisface la humedad del suelo y abastece los depósitos subterráneos, de donde puede fluir hacia las corrientes de los ríos, o bien descargar en los océanos; la que queda detenida en la capa vegetal del suelo es regresada a la atmósfera por transpiración. La figura 1.1 presenta el ciclo hidrológico del agua.



Fuente: Educación Ambiental, 1996.

Figura 1.1 Ciclo Hidrológico.

Distribución y uso del agua en México

México es un país en el que la actividad económica y la población están ubicadas de manera inversa a la distribución natural del agua y, en consecuencia, a la disponibilidad de este recurso. El territorio mexicano está dividido en 320 cuencas, con un escurrimiento medio anual de 430,000 millones de m^3 . No obstante, la zona norte sólo tiene un escurrimiento de 12,900 millones de m^3 , 3% del global en un área equivalente al 30% del país; y en el sureste hay 215,000 millones de m^3 , es decir, el 50% de la disponibilidad para un 20% del territorio. En conclusión, más de la mitad del territorio (53%) está bajo déficit hídrico, lo que ha ocasionado una sobreexplotación de los cuerpos de agua subterránea, que trae como resultado su salinización (Sedesol, 1994).

Aunada a esta situación, la heterogénea distribución de la población, lo extenso del territorio y la contaminación de las fuentes de abastecimiento de agua potable han provocado que en nuestro país el suministro de este líquido sea una tarea complicada y costosa, por lo que se ha originado un rezago de la oferta en comparación con las demandas. Bajo estas circunstancias es que el tratamiento de aguas residuales cobra importancia, ya que representa una solución para conservar y recuperar este recurso natural.

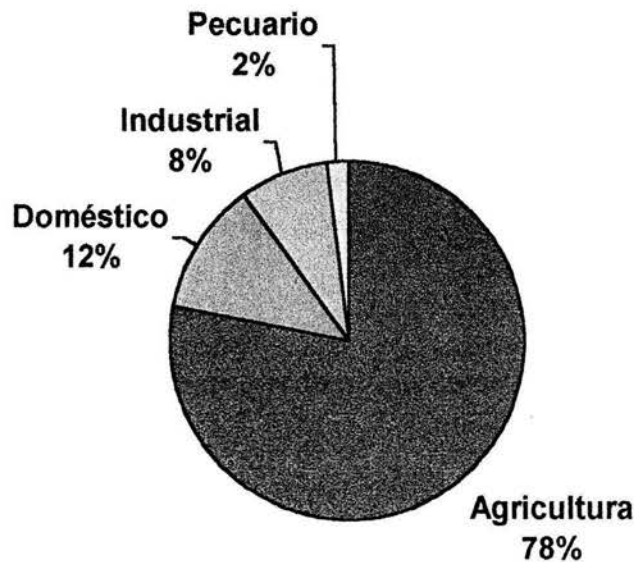
La presencia de agua en la naturaleza, en cantidad y calidad suficiente, y en tiempo y espacio adecuado, es imprescindible para mantener el equilibrio de todos los ecosistemas. Esta aseveración debe tomarse en cuenta especialmente en el caso de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, debido a que de éstos se extrae el agua para consumo humano y para actividades productivas, y son los directamente afectados en los casos en que los aprovechamientos sean excesivos, las descargas rebasen la cantidad de depuración natural del cuerpo de agua, o la modificación de su estructura natural no considere la prevención y mitigación de los impactos ambientales generados.

El agua es la sustancia de consumo más común y generalizada. Se utiliza para beber, en los hogares para la limpieza y la cocina, en las industrias como materia prima, para enfriamiento y lavado, en la producción agropecuaria para riego y limpieza y en otras actividades con diversos propósitos. Según el Programa Nacional Hidráulico 2001-2006, se estima que en el año 2000 se extrajeron de los ríos, lagos y acuíferos del país 72 km^3 para los principales usos consuntivos. Este volumen representa el 15 % de la disponibilidad natural media nacional.

El uso predominante es el agrícola, ya que representa el 78% de la extracción, seguido por el uso público urbano con el 12%, el uso industrial con el 8% y finalmente el pecuario con el 2%. Estas cifras reflejan solo el agua que es efectivamente utilizada, sin embargo, grandes volúmenes que no son utilizados directamente son afectados por la acción humana. La figura 1.2 muestra los principales usos del agua en México.

El agua después de haber sido objeto de múltiples usos en las comunidades humanas, tiene que ser alejada de las mismas por las características desagradables y peligrosas que en tales usos adquiere, recibiendo el nombre genérico de "aguas residuales".

Se acostumbra a llamar “agua residual doméstica” a la resultante del aseo de personas y casas-habitación, y “agua residual industrial” a la desechada por los centros de producción. Toda comunidad genera residuos líquidos y sólidos. La parte líquida -agua residual- proviene esencialmente del agua contaminada por los diversos usos a que ha sido sometida. Por lo que desde el punto de vista de las fuentes de generación, las aguas residuales pueden definirse como la combinación de los residuos líquidos, o aguas portadoras de residuos, procedentes tanto de residencias como de instituciones públicas y establecimientos industriales y comerciales, a los que pueden agregarse eventualmente, aguas subterráneas, superficiales y pluviales. (Metcalf & Eddy, 1996).



Fuente: CNA Programa Nacional Hidráulico 2001-2006

Fig. 1.2 Usos del agua

Infraestructura

De acuerdo con el Programa Nacional del Medio Ambiente y Recursos Naturales 2001-2005 existen 1018 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, con una capacidad instalada de 75.9 m³/s, de éstas el 78% se encuentran en operación con un gasto aproximado de 45.9 m³/s, y 177 plantas de tratamiento de aguas residuales de origen industrial, con una capacidad aproximada de 12 m³/s. De los sistemas registrados en el inventario, se estima que el 60% opera con eficiencias bajas de remoción, del 30 al 50% aproximadamente; el 35% con eficiencia del 50 al 80% y el 5% restante con eficiencias mayores al 80%. Los procesos de tratamiento para los efluentes municipales son diversos, aunque predominan las lagunas de estabilización y los lodos activados.

I.2 Composición de las aguas residuales

Los componentes que conforman el agua residual que genera una comunidad dependen del tipo de sistema de recolección empleado y pueden incluir:

Agua Pluvial. Agua resultante del escurrimiento superficial de las lluvias; se incluyen las que provienen de nieve y granizo. Su volumen varía según la intensidad de las precipitación, la topografía y las superficies pavimentadas y techadas. Estos escurrimientos pueden ser colectados y dispuestos junto con los efluentes de la comunidad o ser tratados separadamente.

Agua Residual Doméstica o Sanitaria. Es el agua procedente de residencias, instalaciones comerciales, públicas y similares. Estos desechos son muy importantes en lo que se refiere a la salud pública ya que pueden contener organismos dañinos al hombre, por lo que su tratamiento y disposición constituyen el principal problema de acondicionamiento de las aguas residuales.

Agua residual Industrial. Es el agua residual en la cual predominan los productos de desecho de los procesos industriales. El volumen y características de esta agua varía mucho, pues depende del tipo de establecimiento industrial.

Infiltraciones y conexiones incontroladas. Agua que penetra de forma no controlada en la red de alcantarillado, procedente del subsuelo o del agua pluvial que es descargada a la red provenientes de edificios, drenes de cimentaciones y alcantarillas pluviales. El volumen de agua infiltrado no puede determinarse con exactitud porque depende de la estructura del suelo, del tipo de alcantarillado, de las condiciones del agua subterránea, de las lluvias, etc.

El volumen y la naturaleza del agua residual dependen también del tipo y tiempo que tenga de instalado el sistema de drenaje, observándose que en los sistemas viejos se presentan pérdidas de agua debido a fugas o, por el contrario, infiltraciones de agua subterránea que pueden aumentar el gasto. En los países en vías de desarrollo se emplean drenajes combinados que transportan el agua residual junto con el escurrimiento pluvial, ya que un drenaje separado requiere una inversión inicial elevada. Sin embargo, este sistema ocasiona colocar alcantarillados injustificadamente grandes desde el punto de vista económico para poder captar todo el gasto; además de que presenta problemas de diseño hidráulico y un incremento en el caudal que requiere recibir tratamiento.

Debido a la gran diversidad de elementos y compuestos que pueden estar presentes en las aguas residuales, no es factible detallar de los componentes presentes en una muestra dada; sin embargo, se puede considerar que existe un conjunto de ellos que tienen importancia por la influencia que ejercen en la selección de una tecnología de tratamiento del agua.

La composición de las aguas residuales se refiere a las características físicas, químicas y biológicas presentes en las aguas residuales.

Características físicas. Las propiedades físicas son relativamente fáciles de medir, algunas de las cuales las puede observar cualquier persona rápidamente. El cuadro 1.1. muestra un resumen de las características físicas más importantes de las aguas residuales y se hace mención de su influencia en el tratamiento de éstas últimas.

Cuadro 1.1. Principales características físicas de las aguas residuales.

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN	IMPORTANCIA EN EL TRATAMIENTO
Sólidos Totales (ST) (mg/l)	Contenido de sólidos totales que queda como residuo en la evaporación del agua entre 103 y 105°C.	Poca importancia si se hace una interpretación aislada. Útil al relacionarlo con otros parámetros.
Sólidos Sedimentables (mg/l)	Sólidos removidos por sedimentación en un cono Imhoff en 60 minutos a temperatura ambiente.	Medida de la cantidad de lodos que se obtendrá en una sedimentación primaria.
Sólidos Suspendidos (SS) (mg/l) *	Sólidos retenidos en un filtro de fibra de vidrio o de membrana de policarbonato.	Están sujetos a una rápida degradación (hidrólisis) y son un factor importante en el tratamiento y disposición de las aguas residuales.
Sólidos Disueltos (SD) (mg/l) *	Sólidos capaces de filtrarse por poros como los mencionados en SS. Sólidos coloidales: materia con un intervalo de tamaño de 0.001 a 1 µm.	La fracción coloidal no puede removerse por sedimentación, sino por reacciones biológicas o coagulación seguida de una sedimentación. Los principales procesos biológicos aplicados al tratamiento de las aguas residuales se dividen en dos grupos: procesos aerobios (en medio suspendido ó fijo), y procesos anaerobios (en medio suspendido ó fijo).
* Ambos sólidos se pueden subdividir en:		
Volátiles (SSV y SDV) (mg/l)	Sólidos orgánicos que se oxidan y volatizan a 550±50°C.	Contenido orgánico de los sólidos (disueltos y suspendidos).
Fijos (SSF y SDF) (mg/l)	Sólidos inorgánicos que quedan como cenizas al calentarse a 550±50°C.	Contenido inorgánico de los sólidos (Suspendidos y disueltos).
Olor	Causado por gases desprendidos de la descomposición de materia orgánica y/o sustancias adicionadas al agua residual.	Factor importante en el diseño, ubicación y operación de una planta de tratamiento, por afectar directamente a la población cercana.

Fuente: Adaptado de Ingeniería de aguas residuales, Metcalf & Eddy. Vol 1 1998.

Cuadro 1.1. Principales características físicas de las aguas residuales. (Continuación)

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN	IMPORTANCIA EN EL TRATAMIENTO
Color	Agua residual fresca: varía de gris a café claro. Agua residual séptica: de gris a gris obscuro/negro.	Parámetro importante, ya que los consumidores rechazan el agua por razones estéticas cuando esta muy coloreada y para ciertos usos industriales puede ser inaceptable
Temperatura	En general, la temperatura del agua residual es mayor que la temperatura de la fuente y mayor que la temperatura del aire del ambiente. (Con excepción de climas muy cálidos).	Parámetro fundamental por su efecto en otras propiedades, por ejemplo, aceleración de reacciones químicas y bioquímicas, reducción en la solubilidad de los gases, intensificación de olores, etc. Determinante para la operación y diseño de procesos biológicos por su influencia en el crecimiento y actividad de los microorganismos.

Fuente: Adaptado de Ingeniería de aguas residuales Metcalf & Eddy, Vol 1 1998.

Características químicas. Los cuadros 1.2 al 1.5 muestran un resumen de las propiedades químicas más importantes de las aguas residuales haciendo mención de su influencia en el tratamiento de éstas últimas, e incluye los siguientes cuatro apartados: 1) medición del contenido orgánico, 2) materia inorgánica, 3) gases presentes, y 4) materia orgánica presente.

Cuadro 1.2. Principales características químicas de las aguas residuales. Medición del Contenido Orgánico.

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN	IMPORTANCIA EN EL TRATAMIENTO
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅) (mg/l)	Cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos para oxidar bioquímicamente la materia orgánica. Las muestras se incuban por 5 días a una temperatura de 20°C para determinar el O ₂ consumido en este período por los microorganismos inoculados.	Parámetro útil para determinar la cantidad de oxígeno requerida para estabilizar la materia orgánica del agua residual, seleccionar el método de tratamiento, dimensionar las instalaciones y evaluar la eficiencia de los procesos de tratamiento.
Demanda Química de Oxígeno (DQO) (mg/l)	Cantidad de oxígeno requerido para la oxidación química de la materia orgánica. La DQO > DBO ₅ , ya que existe más materia que es oxidable químicamente que biológicamente.	Parámetro útil para medir la materia orgánica del agua residual que contenga compuestos tóxicos para la vida biológica. Se obtiene rápidamente (3 horas) por lo que sirve para controlar el funcionamiento de las plantas de tratamiento.

Fuente: Adaptado de Ingeniería de aguas residuales, Metcalf & Eddy, Vol 1 1998.

Cuadro 1.3. Principales características químicas de las aguas residuales. Materia Inorgánica.

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN	IMPORTANCIA EN EL TRATAMIENTO
PH	Medición indirecta de la concentración de iones de hidrógeno. (Acidez o alcalinidad de una muestra).	Es importante en los tratamientos biológicos, ya que los microorganismos se desarrollan con un pH entre 6 y 8. Sirve para controlar muchas reacciones químicas del tratamiento de las aguas.
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /l)	Medida de la capacidad para neutralizar ácidos, debida a la presencia de bicarbonato, carbonato e hidróxido.	Es importante para el tratamiento químico y como parámetro de control de procesos biológicos de tratamiento. Ayudar a regular los cambios de pH.
Nitrógeno y Fósforo	Nutrientes básicos para el crecimiento y desarrollo de los microorganismos.	Nitrógeno: Parámetro para evaluar la tratabilidad biológica del agua residual. Fósforo: Esencial para el crecimiento de algas y otros organismos biológicos.
Metales Pesados	Destacan el níquel (Ni), plomo (Pb), manganeso (Mn), cromo (Cr), cadmio (Cd), zinc (Zn), cobre (Cu), hierro (Fe) y el mercurio (Hg).	Algunos de ellos son necesarios para el desarrollo de los microorganismos. El exceso de estos metales es tóxico.
Cloruros	Proveniente de sales del suelo, desechos industriales y domésticos.	Los métodos convencionales de tratamiento no remueven significativamente los cloruros.

Fuente: Adaptado de Ingeniería de aguas residuales, Metcalf & Eddy. Vol 1 1998.

Cuadro 1.4. Principales características químicas de las aguas residuales. Gases Presentes.

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN	IMPORTANCIA EN EL TRATAMIENTO
Oxígeno Disuelto	Elemento importante en el control de la calidad del agua, presente en todas las aguas que están en contacto con el aire. Desafortunadamente el oxígeno es poco soluble en el agua.	Es conveniente disponer de cantidades suficientes de oxígeno disuelto para: evitar la formación de olores desagradables en las aguas y mantener formas superiores de vida biológica.
Metano	Principal subproducto de la descomposición anaerobia de la materia orgánica del agua.	En cantidades significativas puede emplearse como combustible y fuente de energía.
Sulfuro de Hidrógeno	Se forma durante el proceso de descomposición de la materia orgánica que contiene azufre.	Produce un olor desagradable y en presencia de oxígeno se oxida y tiene efectos corrosivos.

Fuente: Adaptado de Ingeniería de aguas residuales, Metcalf & Eddy. Vol 1 1998.

Cuadro 1.5. Principales características químicas de las aguas residuales. Materia Orgánica.

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN	IMPORTANCIA EN EL TRATAMIENTO
Proteína	Es el principal componente del organismo animal y menos relevante en organismos vegetales.	En gran cantidad puede causar olor desagradable debido a su descomposición. Responsable de la presencia de nitrógeno en las aguas residuales.
Carbohidratos	Compuestos formados por carbono, oxígeno e hidrógeno. Se encuentra como azúcares, almidones, celulosa y fibra de madera.	La celulosa es el carbohidrato mas importante por su volumen y resistencia a la descomposición.
Grasas y Aceites (mg/l)	Formado por alcohol, glicerina y ácido graso. Por su estado a temperatura ambiente son: grasas: se encuentran en estado sólido. aceites: se encuentran en estado líquido.	Interfieren en el desarrollo de la actividad biológica y causan problemas de mantenimiento en las plantas de tratamiento.
Sustancias activas al azul de metileno (S.A.A.M.) (mg/l)	Formados por moléculas orgánicas de gran tamaño y ligeramente solubles en agua provenientes de detergentes sintéticos.	Causan formación de espuma en distintos equipos de la planta de tratamiento. Se depositan en las interfaces aire-agua.
Contaminantes Prioritarios	Compuestos orgánicos e inorgánicos con características de alta toxicidad.	Ejemplos: arsénico (As), selenio (Se), bario (Ba), cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb), etc.
Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)	Compuestos orgánicos con punto de ebullición menor a los 100 °C y/o una presión de vapor mayor que 1 mm de Hg a 25°C.	La liberación de este tipo de compuestos en las plantas de tratamiento puede afectar la salud de los operadores de la misma.

Fuente: Adaptado de Ingeniería de aguas residuales, Metcalf & Eddy. Vol 1 1998.

Características Biológicas. El análisis bacteriológico de las aguas residuales es uno de los parámetros de calidad más importantes. Los principales grupos de organismos presentes en las aguas residuales se presentan en el cuadro.

Cuadro 1.6. Principales características microbiológicas de las aguas residuales.

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN	IMPORTANCIA EN EL TRATAMIENTO
Organismos eucariotes multicelulares	Organismos con distinciones en células y tejidos (con núcleo real). Muchos son patógenos (Helmintos: Taenia saginata, Taenia solium)	Son importantes para determinar la toxicidad de las aguas residuales y evaluar la eficiencia de los procesos biológicos de tratamiento secundario.

Cuadro 1.6. Principales características microbiológicas de las aguas residuales. (Continuación)

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN	IMPORTANCIA EN EL TRATAMIENTO
Organismos eucariotes multicelulares	Organismos con distinciones en células y tejidos (con núcleo real). Muchos son patógenos (Helmintos: Taenia saginata, Taenia solium)	Son importantes para determinar la toxicidad de las aguas residuales y evaluar la eficiencia de los procesos biológicos de tratamiento secundario.
Eubacterias y archaeobacterias	Procariotes unicelulares (sin membrana nuclear). Las aguas residuales contienen cerca de un millón de bacterias /ml. Algunas bacterias son patógenas como la Salmonella y el Vibrio cholerae.	Muchas bacterias cumplen con la función de descomposición y estabilización de materia orgánica, constituyendo el fundamento de los procesos de tratamiento biológico.
Virus	Organismos parásitos constituidos por cadenas de material genético (ADN, ARN), y una cubierta proteica.	Por ser patógenos requieren de su eliminación por desinfección.

Fuente: Adaptado de Ingeniería de aguas residuales, Metcalf & Eddy. Vol 1 1998.

Equilibrio ecológico y contaminación del agua

Los seres vivos y su ambiente físico integran unidades funcionales, denominadas ecosistemas, que se caracterizan por su compleja trama de relaciones de materia asimilada por las plantas verdes, y que es utilizada para la reducción del carbono, del hidrógeno y la formación de cuerpos orgánicos. La materia y energía asimilada por las plantas verdes es transferida a aquellos organismos que no son capaces de realizar esa función: animales y plantas no fotosintéticas.

Las transferencias de materia y energía entre los diferentes elementos del ecosistema conducen a la degradación de los compuestos orgánicos inicialmente formados por las plantas; los elementos nutritivos indispensables para el funcionamiento de los seres vivos son así reintegrados al medio físico y de este las plantas pueden tomarlos y reincorporarlos a la trama de la vida. Los ecosistemas naturales, o sea, aquellos que no han sido modificados por el hombre, se caracterizan por su estabilidad y capacidad de regeneración. La contaminación que ocasiona el hombre, a través del vertido de las aguas residuales no tratadas, afecta contra estas dos características.

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

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

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

Por supuesto la naturaleza de los residuos y las características del agua tendrán una influencia considerable en los efectos de una descarga en particular. Los desechos de mayor importancia en la contaminación del agua son:

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

2. Materiales que afectan el balance del oxígeno del agua

- a) Sustancias que consumen el oxígeno disuelto. Estas pueden ser tanto materia orgánica que es descompuesta biológicamente y ocasiona una demanda bioquímica de oxígeno, o agentes inorgánicos reductores.
- b) Sustancias que impiden la reoxigenación. El oxígeno disuelto en el agua es suministrado por transferencia desde la atmósfera. Productos tales como el aceite y los detergentes pueden formar una capa protectora sobre la superficie del agua, reduciendo la tasa de transferencia de oxígeno y pueden, por tanto, amplificar los efectos de las sustancias consumidoras de oxígeno.
- c) Descargas con altas temperaturas pueden alterar el balance del oxígeno porque la concentración de saturación del oxígeno disuelto disminuye al incrementarse la temperatura.

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

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

Los cuerpos de agua tienen la capacidad de asimilar cierta cantidad de sustancias contaminantes mediante el fenómeno de la autopurificación. Este fenómeno involucra uno o más de los siguientes procesos: 1) sedimentación, 2) oxidación química de

agentes reductores, 3) decaimiento bacterial debido a las condiciones inhóspitas para los microorganismos patógenos, 4) oxidación bioquímica.

En el problema de contaminación de las aguas existen muchos efectos indeseables y no solo la presencia de organismos patógenos y el déficit de oxígeno. Dependiendo de la dilución disponible, pueden haber un incremento importante en el contenido de sólidos disueltos, materia orgánica, nutrientes (como nitrógeno y fósforo), turbiedad y otros parámetros indicadores de contaminación.

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

I.3 Legislación Nacional aplicable

Aunque de manera indirecta, desde tiempos de la colonia ha existido preocupación por proteger los recursos naturales, no fue sino hasta Marzo de 1971 que se dio inicio a la estructuración de un marco legal en materia de protección al ambiente al promulgarse la Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental y, de forma más directa sobre la normatividad de aguas residuales, el Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación de Aguas de 1973.

Para fortalecer las bases constitucionales en materia ambiental, en Agosto de 1987 se reformaron los artículos 27 y 63 de la **Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos**, dando prioridad a la preservación y restauración del Equilibrio Ecológico al descentralizar las atribuciones de la Ley en las instancias del Gobierno Federal, Estatal y Municipal para la protección de los recursos naturales.

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, cuando entró en vigor la Ley General del Equilibrio y la Protección al Ambiente, actualmente vigente. 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 LGEEPA, 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.

Ley de Aguas Nacionales, aprobada en 1992, con el fin de estructurar la administración de 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 uso y aprovechamiento.

La Ley de Aguas Nacionales tiene como fin la modernización, planeación y programación de la administración y del uso eficiente y racional dela 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, asignados 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 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.

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 los 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 el agua, aunque desde una perspectiva circunscrita a la salud humana, establecido que queda prohibida la descarga de aguas residuales o de contaminantes, en cualquier cuerpo de agua superficial o subterráneo, cuyas aguas se destinen para uso o consumo humano. 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.

En nuestros días, las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) publicadas en el Diario Oficial de la Federación regulan legalmente las descargas de Aguas Residuales y las Condiciones Particulares de Descarga (CPD) al especificar parámetros (físicos, químicos y biológicos) como valores máximos o mínimos permisibles que controlan la calidad del agua. Con estas normas el Tratamiento de Aguas Residuales se convertirá, y en algunos casos ya es, una necesidad legal. En la figura 1.3 se muestra la evolución de la Legislación Nacional en Materia de Tratamiento de Agua Residual.

NOM-001-CNA-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-CNA-1996 considera que su cumplimiento será gradual y progresivo. Para el caso de aguas residuales municipales las fechas de cumplimiento se presenta en el cuadro 1.7.

Cuadro 1.7 Fechas de cumplimiento para descargas municipales.

FECHAS DE CUMPLIMIENTO PARA DESCARGAS MUNICIPALES EN LA NOM-001-CNA-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 HABIATANTES

Fuente : NOM-001-CNA-1996

NOM-002-CNA-1996, esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano 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-CNA-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 muestra en el cuadro 1.8.

Cuadro 1.8 Fechas de cumplimiento de la NOM-002-CNA-1996.

FECHAS DE CUMPLIMIENTO DE LA NOM-002-CNA-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 HABIATANTES

Fuente : NOM-002-CNA-1996

NOM-003-CNA-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 de oxígeno₅ 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 en el cuadro 1.9.

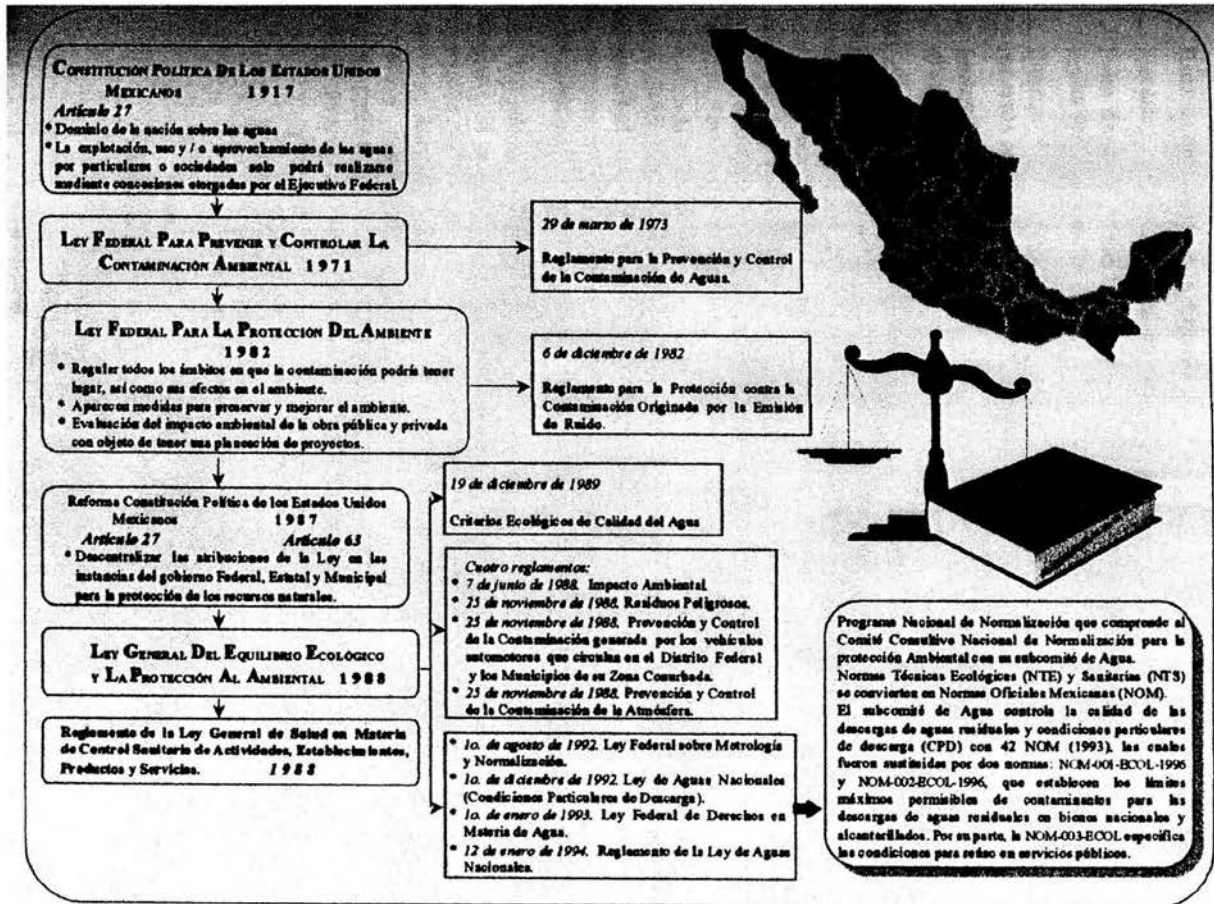
Cuadro 1.9 Límites máximos permisibles para aguas residuales que se reusen

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 con contacto indirecto u ocasional.	1,000	≤ 5	15	30	30

Fuente : NOM-003-CNA-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-CNA-1996.

En la actualidad, las dependencias gubernamentales encargadas de publicar documentos normativos relacionados con la calidad del agua son: la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, el Instituto Nacional de Ecología (INE), la Comisión Nacional del Agua (CNA) y la Secretaría de Salud, siendo la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Ley de Aguas Nacionales, la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua y la Ley de Salud las que establecen el marco general de la normatividad sobre aguas residuales.



Fuente: Leyva. 1998.

Figura: 1.3 Legislación Nacional en Materia de Tratamiento de Aguas Residuales.

CAPITULO II

NIVELES DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES

Capítulo II

Niveles de tratamiento de las aguas residuales

Con el desarrollo de los suministros de agua a las poblaciones y el uso de ésta para transportar los desechos, se emplearon originalmente como métodos de dispersión la irrigación, infiltración y dilución, pero conforme fue creciendo la población, con el proporcional aumento del volumen de agua residual, estos métodos resultaron ser poco satisfactorios, por lo que se hizo indispensable tomar otras medidas para mejorarlos, iniciándose el desarrollo de los sistemas de tratamiento antes de la disposición final de las aguas residuales.

El propósito del tratamiento del agua residual previo a su disposición consiste en estabilizar la materia orgánica biodegradable, eliminar los organismos patógenos y separar la materia en suspensión y flotante, de forma que al ser descargada al cuerpo receptor no interfiera con los usos actuales y potenciales del agua.

Operaciones y Procesos Unitarios

Existe una extensa variedad de operaciones y procesos unitarios para el tratamiento del agua residual. En este sentido, los contaminantes del agua residual pueden ser eliminados mediante fenómenos físicos, químicos y biológicos.

Los métodos individuales de tratamiento se clasifican en operaciones físicas unitarias, procesos químicos unitarios y procesos biológicos unitarios. Dichas operaciones y procesos se utilizan combinados en los sistemas de tratamiento, pero se estudian las bases científicas de cada uno de ellos por separado, ya que los principios básicos no varían.

Operaciones Físicas Unitarias

Son las operaciones llevadas a cabo en el tratamiento de las aguas residuales, en las que los cambios en las características y propiedades del agua se realizan mediante la aplicación de las fuerzas físicas. Las operaciones físicas unitarias más comúnmente empleadas en el tratamiento de agua residual incluyen medición de caudales, desbaste, dilaceración, homogeneización de caudales, mezclado, sedimentación, flotación, filtración, transferencia de gases y volatilización, y arrastre de gases.

Procesos Químicos Unitarios

Operaciones en las cuales la remoción o tratamiento de los contaminantes se realiza mediante la adición de productos químicos que llevan a cabo diferentes reacciones químicas. La precipitación, la oxidación y la desinfección con cloro son tres de los principales ejemplos. En la aplicación de los procesos químicos unitarios comparados con las operaciones físicas unitarias, es importante considerar que se trata de procesos demandantes de insumos o aditivos. En la mayoría de los casos, se añade algún reactivo o producto químico al agua residual para llevar a cabo la eliminación del contaminante (fósforo, compuestos orgánicos, nitrógeno). Como resultado generalmente se produce un incremento neto de los constituyentes disueltos del agua residual.

Procesos Biológicos Unitarios

Los métodos de tratamiento en los cuales se involucra la actividad de los microorganismos para la remoción y/o transformación de contaminantes se llaman procesos biológicos. Los métodos biológicos son utilizados para la remoción de material biodegradable (soluble o coloidal) del agua residual.

Básicamente los contaminantes presentes en el agua residual son transformados por los microorganismos en materia celular, energía para su metabolismo y en otros compuestos orgánicos e inorgánicos. Los objetivos que persigue el tratamiento biológico de un agua residual son la floculación y eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica suspendida y disuelta. En el caso del agua residual doméstica, el principal objetivo es reducir el contenido orgánico y, en muchos casos, los nutrientes tales como el nitrógeno y el fósforo.

Los procesos biológicos se dividen en dos grupos: anaerobios y aerobios.

El proceso anaerobio se caracteriza por tener una baja tasa de síntesis bacteriana (baja producción de lodos de desecho), ya que el 90% de la energía se utiliza en la producción de metano mientras que el 10% restante se emplea para la síntesis celular. Por el contrario, en el tratamiento aerobio el 65% de la energía es utilizada para la síntesis celular, por lo que hay mayor generación de biomasa (lodo no estabilizado), cuyo tratamiento y disposición incrementa la dificultad técnica y el costo total del tratamiento.

El proceso anaerobio es productor de energía (CH_4), mientras que el proceso aerobio es un consumidor de ésta en forma de agitación y oxigenación. Sin embargo, el proceso anaerobio es más sensible a cambios ambientales, requiere un mayor tiempo de arranque y alcanza calidades de agua tratada inferiores que el proceso aerobio.

La aplicación de las operaciones y procesos unitarios se agrupan para constituir diferentes sistemas de tratamiento. Dichos sistemas tendrán distintos alcances de tratamiento, también denominado nivel de tratamiento, dependiendo del tipo de operaciones y procesos que involucre. El nivel de tratamiento requerido en un proyecto específico de aguas residuales dependerá de las características iniciales del agua a tratar, así como de la calidad requerida por el efluente tratado.

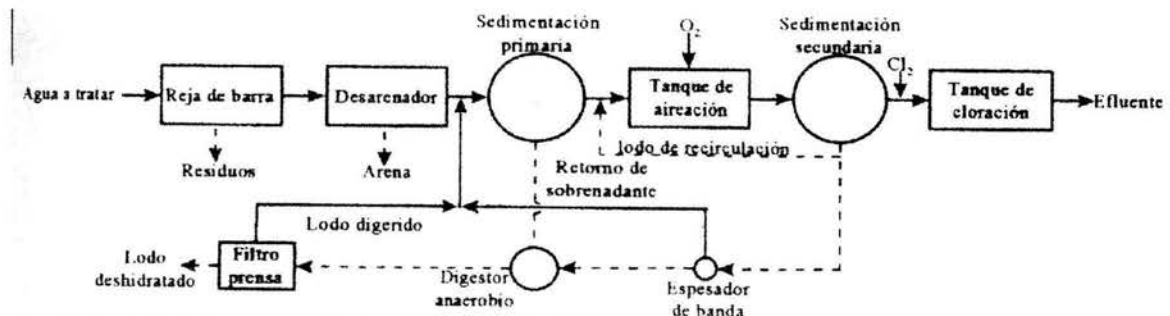
Los métodos de tratamiento pueden dividirse según la depuración que den al agua residual en: métodos de tratamiento primario, secundario y terciario (avanzado) siendo éste último el que ofrece mayor calidad al efluente cuando va precedido de tratamiento primario y secundario.

El **Tratamiento Primario** consiste en una serie de operaciones físicas que remueven basura, arena, grasas, aceites y una porción de sólidos suspendidos y de materia orgánica.

El **Tratamiento Secundario** consiste en una serie de procesos químicos y biológicos que emplean reacciones bioquímicas para remover la mayoría de los compuestos orgánicos biodegradables y sólidos suspendidos.

El **Tratamiento Terciario** consiste en una combinación de operaciones y procesos unitarios para realizar la desinfección del agua y remover el excedente de materia orgánica y otros elementos como el nitrógeno, fósforo y compuestos tóxicos.

En las plantas de tratamiento, las operaciones y procesos unitarios se agrupan para constituir un tren de tratamiento con el que se logra la depuración del agua. A las representaciones gráficas de los trenes de tratamiento se les denomina Diagramas de Bloques de Procesos. La Figura 2.1 muestra un diagrama de bloques del proceso de lodos activados.



Fuente: Ingeniería de aguas residuales, Metcalf & Eddy 1998,

Figura 2.1 Ejemplo de un diagrama de bloque de tratamiento de agua residual Lodos activados.

Con la gran gama de métodos existentes puede haber una amplia variedad de combinaciones que proporcionen un tren de tratamiento; sin embargo, no debe perderse de vista el objetivo principal del tratamiento que es la obtención de un efluente que cumpla con los requerimientos de calidad establecidos y que, por lo tanto, disminuya los impactos ambientales o posibilite su reúso, y todo esto con el menor costo de inversión y operación. A pesar de su variedad, los métodos de tratamiento del agua residual pueden agruparse en:

- ❖ Tratamiento preliminar
- ❖ Tratamiento primario
- ❖ Tratamiento secundario
- ❖ Desinfección
- ❖ Tratamiento de lodos
- ❖ Tratamiento avanzado o terciario

II.1 Tratamiento preliminar

El objetivo del tratamiento preliminar es separar del agua residual aquellos constituyentes que pudieran provocar problemas de funcionamiento y mantenimiento en los procesos, operaciones y sistemas auxiliares posteriores. Por lo tanto, los dispositivos del tratamiento preliminar se diseñan para separar cantidades excesivas de grasas y aceites, y sólidos inorgánicos pesados; así como para separar o disminuir el tamaño de los sólidos orgánicos flotantes o suspendidos. Para lograr los objetivos del tratamiento preliminar se emplean comúnmente los siguientes dispositivos:

1. Rejas y cribas de barras.
2. Cribas finas.
3. Desmenuzadores.
4. Medidor de gasto.
5. Desarenadores.
6. Tanque de homogeneización y regulación de caudales.
7. Tanques de preaireación.
8. Distribuidor de gasto.

1. Rejas y cribas de barras

Son cernidores compuestos de barras paralelas, colocadas verticalmente o inclinadas en dirección del flujo, que captan los desechos del agua residual para proteger las bombas, válvulas, conducciones y otros elementos. Las rejillas pueden ser fijas o móviles y limpiarse manual o mecánicamente. Las características de ambos tipos se comparan en el cuadro 2.1

Cuadro 2.1 Características de las rejillas

Características	Limpieza manual	Limpieza mecánica
Tamaño de la barra:		
Anchura, mm	5-15	5-15
Profundidad, mm	25-37.5	25-37.5
Separación entre barras, mm	25-50	15-75
Pendiente en relación a la vertical, grados	25-50	50-82.5
Velocidad de aproximación, m/s	150	150
Pérdida de carga admisible, mm	150	150

Fuente: Adriana Leyva 1998.

2. Cribas finas

Son rejas con aberturas de hasta 3 mm (1/8 ") que sirven para separar sólidos relativamente pequeños, usándose generalmente en el tratamiento de aguas industriales. Se clasifican en cribas de banda, de disco y de tambor. Su limpieza se realiza mediante chorros de agua a presión, vapor o con un agente desengrasador.

3. Desmenuzadores

Los molinos, cortadores y trituradores son dispositivos que se emplean para cortar los sólidos hasta que puedan ser reintegrados a las aguas residuales sin peligro de obstruir bombas o tuberías o afectar los sistemas de tratamiento posteriores. Se recomienda colocarlos precedidos de desarenadores para alargar la vida del equipo.

4. Medidores de gasto

Un aspecto importante para la operación de una planta de tratamiento es la medición del caudal, pues permite llevar un control y seguimiento de los procesos e informar los gastos que se están generando. El dispositivo más utilizado para la medición del caudal en canales es el aforador Parshall. En conducciones cerradas los dispositivos más empleados son: los tubos de flujo, los orificios, los tubos pitot, rotámetros, venturís, medidores magnéticos y ultrasónicos, dispositivos de vórtice y medidores de turbina o de hélice.

5. Desarenadores

Los desarenadores son cámaras de sedimentación que se usan para eliminar los sólidos inorgánicos gruesos que puede dañar los procesos o las partes mecánicas de la planta de tratamiento. Su funcionamiento consiste en disminuir la velocidad del flujo para que los sólidos se depositen. Los desarenadores pueden limpiarse manual o mecánicamente y en general, las arenas que se remueven se disponen en un relleno sanitario.

6. Tanques de homogeneización y regulación de caudales

La homogeneización consiste en amortiguar las variaciones de gasto para mejorar la eficiencia del tratamiento. Para evitar que las aguas residuales se vuelvan sépticas se instalan sistemas de mezclado y aireación. Existen dos disposiciones de tanques: en línea, la totalidad del caudal pasa por el tanque, y en derivación, sólo pasa el caudal en exceso.

7. Tanques de preaireación

Se realiza una aireación antes del tratamiento primario con la finalidad de aglomerar o flocular los sólidos suspendidos ligeros, formando masas pesadas que se depositan en los tanques de sedimentación. Otras ventajas de la preaireación son la separación de grasas, aceites y sólidos, y la restauración de las condiciones aerobias en las aguas residuales. La preaireación se logra forzando el paso de aire comprimido o por agitación mecánica.

8. Distribuidor de gasto

Se emplea para dividir el caudal en varias unidades similares o para descargar el gasto que sobrepasa la capacidad de diseño. Los dispositivos más empleados son las cajas de distribución y los vertedores de caída libre.

II.2 Tratamiento primario

El tratamiento primario tiene la finalidad de remover de las aguas residuales los sólidos orgánicos e inorgánicos suspendidos comúnmente mediante sedimentación al reducir la velocidad del flujo. Las unidades de tratamiento primario pueden dividirse en:

1. Fosa séptica.
2. Tanque de doble acción o tanque Imhoff.
3. Tanque de sedimentación simple.
4. Flotación

Para el tratamiento primario existen otras unidades auxiliares como son:

5. Tanque de precipitación química.
6. Tanques de floculación.
7. Mezcladores.

1. Fosa séptica

La fosa séptica mantiene el agua residual a baja velocidad y estabiliza los sólidos sedimentables por descomposición anaerobia en el fondo del tanque. Como el agua está en contacto con los sólidos, el efluente de la fosa tiene condiciones sépticas, por lo que se debe disponer en pozos de absorción o en campos de percolación. Este proceso requiere una atención mínima, bastando remover los lodos y las natas ocasionalmente.

2. Tanque de doble acción o tanque Imhoff

Este tanque corrige los defectos de la fosa séptica, ya que las aguas residuales no se mezclan con los lodos, reduciendo el tiempo de retención y generando un efluente adaptable a un tratamiento posterior. El tanque no tiene problemas mecánicos y es sencillo de operar. En su operación las aguas fluyen en la parte superior y los sólidos son separados a la cámara inferior, donde se realiza la digestión anaerobia de los lodos, para su posterior eliminación por tuberías. Los gases y partículas flotantes son desviados hacia la cámara de natas y respiradero.

3. Tanques de sedimentación primaria

Estos tanques separan los sólidos suspendidos del agua residual mediante sedimentación y los concentran en un volumen menor, además, remueven grasas, aceites y materiales flotantes. Los sólidos se acumulan por gravedad o con equipo mecánico (rastras) en una tolva para después ser substraídos por bombeo, evitando su descomposición en el tanque. Los tanques pueden ser rectangulares y circulares o cuadrados (menos comunes).

Tanque de sedimentación primaria circular

El agua entra en el centro y fluye radialmente hacia la periferia. Se caracteriza porque la longitud del vertedor del efluente es grande y los mecanismos de rastras son simples, pero la estructura no es compacta. Las rastras radiales y desnatadores están fijos al eje central y son impulsadas por un motor. Las rastras mueven los sólidos hacia las tolvas que están en el centro, mientras que los desnatadores separan los sólidos flotantes, grasas y aceites.

Tanque con fondo de tolva de flujo vertical

Se usa en instalaciones pequeñas y su operación se basa en mantos de lodo que filtran las partículas diminutas. Tiene la ventaja de introducir el agua residual por el fondo, evitando que se tengan que ir depositando los sólidos.

Tanque de sedimentación primaria horizontal

Estos tanques requieren menos espacio que los circulares y pueden ser construidos adyacentes a otros tanques, aprovechando paredes comunes. Sin embargo, tienen la desventaja de que la longitud del vertedor del efluente es corta, por lo que necesitan vertedores suspendidos. Pueden ser de dos tipos:

Tanques rectangulares

El agua entra por un extremo y fluye horizontalmente hacia el otro. La recolección de lodos y espumas es a partir de rastras fijas a las orillas del tanque o mediante un puente viajero con paletas.

Tanques cuadrados

El agua puede entrar en el centro y fluir hacia los cuatro lados, o entrar por un lado y atravesar el tanque. El mecanismo de recolección de lodos es similar al de los tanques circulares.

4. Flotación

El proceso consiste en la adición de un agente de flotación (burbujas de aire) que lleve a los sólidos a la superficie del tanque para removerlos en forma de nata. Se aplica específicamente para separar partículas pequeñas, con densidad cercana a la del agua.

5. Precipitación química

Consiste en agregar reactivos a las aguas residuales para formar flóculos que se sedimenten rápidamente. Esta operación es útil en tratamientos especializados como para: eliminar fósforo y trazas de metal, y prepara los lodos para filtración o deshidratación.

6. Tanques de floculación

Su propósito es formar flóculos por agitación mecánica o con aire para aumentar la remoción de sólidos en suspensión y DBO_5 en las instalaciones de sedimentación. La floculación se lleva a cabo en tanques para este fin.

7. Mezclado

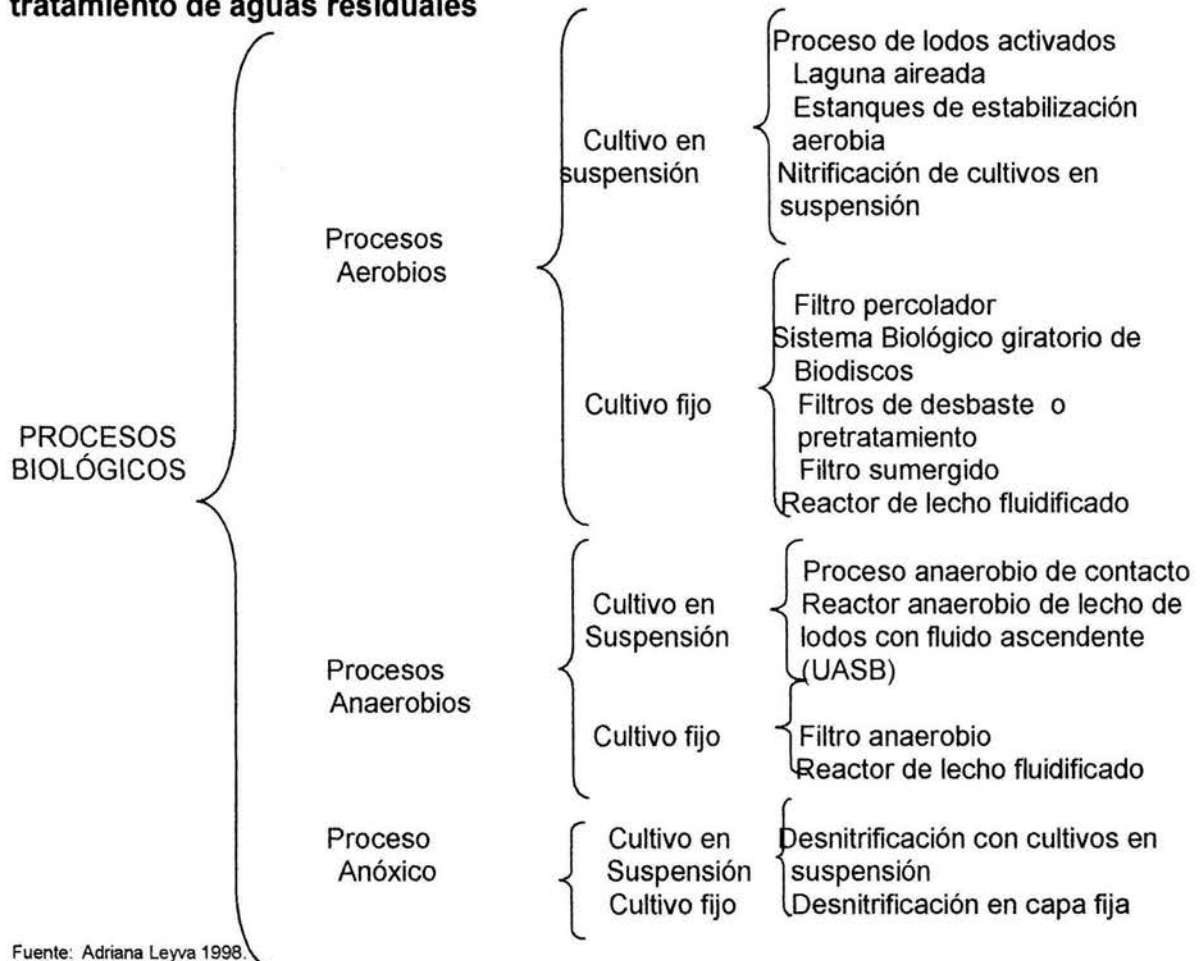
Se emplea para incorporar líquidos, en la floculación y en la transferencia de calor. El mezclado se clasifica en continuo y rápido continuo. Este último se usa para mezclar sustancias y se realiza con saltos hidráulicos, dispositivos Venturi, conducciones,

bombeo o mezcladores mecánicos. La mezcla continua se emplea para conservar el contenido del tanque uniforme y se logra con mezcladores mecánicos o estáticos, dispositivos neumáticos o por bombeo.

II.3 TRATAMIENTO SECUNDARIO

El tratamiento secundario o proceso biológico busca eliminar los sólidos en suspensión y los compuestos orgánicos biodegradables al combinar diversas operaciones y procesos unitarios. Este nivel de tratamiento depende principalmente de los microorganismos para la descomposición de los sólidos orgánicos en sólidos inorgánicos o en orgánicos estables. Existen tres formas de tratamiento biológico: los procesos aerobios, que se realizan en presencia y con consumo de oxígeno; los procesos anaerobios que suceden en ausencia de oxígeno; y los procesos facultativos, en los que los organismos pueden vivir en presencia o en ausencia de oxígeno. El cuadro 2.2 presenta la clasificación de los principales reactores biológicos para el tratamiento de aguas residuales. Adicionalmente, existe otro proceso denominado anóxico, en donde las principales reacciones están encaminadas a la desnitrificación anaerobia. Los procesos biológicos, a su vez, se pueden clasificar en función del crecimiento de los microorganismos en: sistemas con microorganismos en crecimiento sobre una superficie o biomasa fija y sistemas con microorganismos en suspensión.

Cuadro 2.2 clasificación de los principales reactores biológicos para el tratamiento de aguas residuales



Fuente: Adriana Leyva 1998.

A continuación se describen los principales procesos de tratamiento biológico empleados en México.

1. Lodos activados

Es el proceso que trata el mayor volumen de agua residual doméstica en México. Consiste en un tanque de aireación que contiene el cultivo bacteriano aerobio en suspensión mezclado con agua residual y aire.

El aire se suministra al tanque con difusores o aireadores mecánicos para llevar a cabo la degradación de la materia en condiciones aerobias, y proporcionar una velocidad de flujo suficiente que mantenga los sólidos en suspensión. Los microorganismos obtienen los nutrientes necesarios para su desarrollo del agua y forman el lodo activado, y a la mezcla de éste con el agua se le llama licor mezclado.

El licor mezclado fluye del tanque de aireación a un clarificador, en donde el lodo se sedimenta para producir un efluente con bajo contenido de DBO y sólidos suspendidos. Los sedimentadores secundarios pueden ser circulares o rectangulares y son similares a los empleados en el tratamiento primario. Una porción del lodo sedimentado es retornado al tanque para mantener una relación alimento- microorganismos (F/M) apropiada y permitir así una adecuada degradación de la materia orgánica. El resto del lodo es purgado del sistema para conservar su concentración constante en el tanque. Se han desarrollado un gran número de variantes de lodos activados con la finalidad de mejorar el tratamiento, disminuir los costos y producir un lodo más estable.

2. Lagunas de estabilización aerobia

Consisten en depósitos grandes de poca profundidad excavados en el terreno, en donde el tratamiento del agua depende de algas y bacterias. El oxígeno es suministrado por aireación de la superficie y a través de la fotosíntesis realizada por las algas, y es utilizado por las bacterias en la degradación aerobia de la materia orgánica. Los nutrientes y el dióxido de carbono producido en la degradación son empleados, a su vez, por las algas. También hay otros animales superiores como rotíferos y protozoos que mejoran el efluente.

3. Filtro percolador

Es un tanque que contiene un lecho formado por un medio permeable en donde se encuentran adheridos los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica y a través del cual se filtra en agua residual. Cuando los microorganismos crecen, el espesor de la película aumenta, por lo que la capa biológica se desprende cíclicamente del lecho en forma natural. Una vez que el agua residual ha pasado por el lecho filtrante es colectada junto con los sólidos biológicos en la parte inferior y conducida a un sedimentador secundario, donde se sedimenta el lodo generado en el proceso.

4. Laguna aireada aerobia

Este proceso es similar al de lodos activados, excepto que el reactor es un depósito excavado en el terreno y que la gran superficie de las lagunas puede dar lugar a efectos térmicos más marcados. En una laguna aireada se mantienen en suspensión solo una parte de los sólidos, y el aire requerido por el proceso es suministrado por aireadores o difusores. La microbiología es parecida a la empleada en lodos activados.

5. Sistema biológico giratorio de contacto o Biodiscos

Consiste en una serie de discos circulares concéntricos de poli estireno o cloruro de polivinilo parcialmente sumergidos en agua residual, en donde los microorganismos se adhieren formando una película biológica denominada biomasa. La rotación de los discos pone alternativamente en contacto la biomasa con la materia orgánica presente en el agua residual y con la atmósfera para la adsorción del oxígeno. La rotación es así mismo, el mecanismo de eliminación del exceso de sólidos adheridos a los discos y mantienen la materia en suspensión, de manera que ésta pueda ser transportada al tanque clarificador o sedimentador secundario para remover los sólidos en suspensión remanentes.

6. Reactor anaerobio de lecho de lodos con flujo ascendente (UASB)

El agua residual se introduce al reactor por la parte inferior, se distribuye uniformemente y en su trayectoria ascendente atraviesa el lecho de lodos donde la materia orgánica es transformada principalmente en biogás. En la parte superior del reactor existe una zona de captación de biogás y una de sedimentación del agua tratada.

7. Proceso anaerobio de contacto

Este tratamiento se emplea básicamente en la depuración de aguas residuales industriales con alto contenido de DBO y sólidos suspendidos volátiles. Consiste en un reactor sellado que impide la entrada de aire, al cual se introducen el agua a tratar con los lodos recirculados para ser digeridos anaerobiamente. El contenido del reactor se mezcla y una vez terminada la digestión se lleva a un clarificador o unidad de flotación al vacío para separar los sólidos. El lodo sedimentado es retornado al reactor para servir de siembra al agua residual entrante y, dada la baja tasa de síntesis de los microorganismos anaerobios, el exceso de lodo a evacuar resulta mínimo.

8. Lagunas anaerobias

Este proceso es empleado en el tratamiento de aguas residuales con alto contenido orgánico y concentraciones de sólidos, ya que logra eliminar del 70 al 85 % de DBO_5 . Esta constituido por un estanque profundo excavado en el terreno, dotado de conducciones para entrada y salida de flujo. El tratamiento es anaerobio en toda profundidad, excepto en una estrecha zona de superficie y la estabilización del agua se consigue por precipitación y conversión anaerobia de los residuos orgánicos en metano, dióxido de carbono y otros gases; así como ácidos orgánicos y tejidos celulares. Los sólidos se sedimentan en el fondo del estanque y el efluente parcialmente clarificado es conducido a un proceso de tratamiento posterior.

9. Lagunas facultativas

Son tanques excavados en el terreno, en donde la estabilización de la materia orgánica se lleva a cabo bajo la acción de bacterias aerobias, anaerobias y facultativas. Para que esto se realice, el estanque está dividido en tres zonas: 1) una superficial compuesta por bacterias aerobias y algas en relación simbiótica; 2) una intermedia parcialmente aerobia y anaerobia, donde las bacterias facultativas realizan la descomposición de la materia orgánica; 3) una inferior, en la que los sólidos acumulados son descompuestos por las bacterias anaerobias.

II.4 Desinfección

Los organismos patógenos que se encuentran presentes, en un momento dado, en las aguas residuales pudieron ser descargadas por personas enfermas, que padecen de una infección, o por personas sanas, que son portadoras de la enfermedad, sin llegar a padecerla. Las bacterias patógenas que excretan los hombres y algunos animales pueden causar enfermedades gastrointestinales, como tifoidea, paratifoidea, disentería y cólera, entre otras enfermedades. Debido a que estos organismos son muy infecciosos, son responsables por miles de muertes cada año en nuestro país.

La desinfección es la destrucción de los organismos patógenos y tiene como finalidad proteger los cuerpos receptores de aguas residuales para evitar la propagación de enfermedades. La desinfección se puede realizar mediante agentes físicos, químicos o radiación.

Los agentes físicos mas empleados son: el calor y la luz. El calor es un magnifico desinfectante, que ha estado en uso por mucho tiempo; pero su aplicación principal es a nivel domiciliario. Los agentes químicos mas comunes son los oxidantes químicos, como son los compuestos de cloro y ozono. Dentro de los compuestos de cloro los más usuales son: gas cloro, cloraminas, bióxido de cloro, hipoclorito de sodio e hipoclorito de calcio. Las principales características de un buen desinfectante son: toxicidad a los microorganismos, soluble, estable (lenta pérdida de capacidad germicida), no tóxico a otras especies (condición que no cumple ningún desinfectante), homogéneo (no debe variar su composición), disponibilidad a bajo costo. Además debe ser seguro para aplicarse y manejarse, y su concentración debe ser medible en el agua tratada. Por último, las radiaciones empleadas son: ultravioleta y gamma, siendo esta última la que tiene mayor fuerza de penetración.

En la actualidad, el desinfectante universalmente empleado es el cloro y sus compuestos como dióxido de cloro, hipoclorito de calcio y de sodio, debido a su eficiencia y bajo costo.

Además de la desinfección, estos productos químicos se emplean para impedir malos olores, reducir la putrefacción, evitar formación de espumas y proteger las estructuras de la planta de tratamiento. Sin embargo tiene el inconveniente de formar productos orgánicos clorados, potencialmente tóxicos.

II. 5 Tratamiento de lodos

Los lodos están constituidos por agua y sólidos responsables del carácter desagradable de las aguas residuales no tratadas, por lo que están sujetas a procesos de descomposición más intensos que los pueden hacer indeseables, lo que obliga a someterlos a un tratamiento que modifique sus características para que su disposición no ponga en peligro la salud o cause molestias. Además, el tratamiento de lodos debe buscar disminuir su volumen y degradar la materia orgánica putrescible a compuestos relativamente estables o inertes.

Para seleccionar el tipo de tratamiento se debe conocer su cantidad y composición, las cuales varían según las características del agua residual de donde hayan sido retirados y, sobre todo, del proceso de tratamiento que los generó.

Existe una gran gama de procesos de tratamiento de lodos, por lo que para su selección debe considerarse: el objetivo del mismo, el origen, la naturaleza, la cantidad y características del lodo; el costo de la evacuación y del tratamiento; y la aplicación que puedan tener estos residuos ya estabilizados. Como consecuencia, para escoger un tren de tratamiento de aguas residual se debe considerar que, además de proporcionar un efluente con la calidad requerida, no debe generar grandes cantidades de subproductos indeseables y con constituyentes que dificulten su tratamiento.

Los procesos de espesamiento, acondicionamiento, deshidratación, secado y reducción térmica tienen como finalidad eliminar la humedad del lodo; mientras que la estabilización y desinfección se utilizan para modificar sus propiedades y simplificar su disposición final.

II. 6 Tratamiento avanzado o terciario

El propósito del tratamiento avanzado es remover los contaminantes que permanecen en el agua después de que ésta ha recibido un tratamiento a nivel secundario, ya que el efluente de éste se utiliza para riego de parques, jardines y usos industriales como enfriamiento y producción de vapor; también se pretende evitar la recirculación de contaminantes como metales pesados, compuestos orgánicos y organismos patógenos.

A este nivel de tratamiento se emplean procesos químicos como pueden ser coagulación, precipitación e intercambio iónico dependiendo de las propiedades químicas de la impureza.

II.7 Tratamiento del agua residual industrial

En los últimos años se ha observado un incremento en el número de industrias con desechos de difícil tratamiento y disposición, por lo que, es fácil comprender que el problema de recolección, tratamiento y disposición de aguas industriales es de gran magnitud y complejidad.

El agua residual de origen industrial varía en cantidad y composición en función del tipo de industria y de los procesos que producen la descarga, siendo en general su poder contaminante mucho mayor que el de las aguas residuales domésticas. Antes de seleccionar el tren de tratamiento es recomendable evitar la mezcla de los desechos sólidos con los líquidos y reducir, mediante acciones de optimización y minimización de descargas en la planta productiva, el volumen del agua por tratar. Igualmente, la separación de corrientes que requieren de un tratamiento intenso de las que requieren un tratamiento somero, es una acción redituable, ya que su eliminación y disposición es más fácil y barata en forma separada.

En general, el tratamiento del agua residual industrial requiere de procesos especializados que degraden y remuevan las fuentes contaminantes que la caracteriza, con objeto de lograr un efluente aceptable para ser descargado a una corriente receptora.

CAPITULO III

TRATAMIENTO AVANZADO

Capítulo III Tratamiento avanzado

III.1 Importancia del tratamiento avanzado

El Distrito Federal presenta problemas entre la disponibilidad y la demanda del agua. En la actualidad el crecimiento acelerado ha implicado la reutilización de las aguas residuales como una fuente de abastecimiento a diferentes niveles: uso industrial, recreativo, piscícola, agrícola recarga de acuíferos y en los últimos años para uso municipal. Es así como el reúso depende del sector que la demande, del volumen requerido y de la calidad adecuada para evitar riesgos a la salud del hombre y del medio ambiente; así como también el reúso depende de los costos de operación, del tipo de agua a tratar y de la calidad deseada.

Dentro de los procesos de tratamiento se tiene un sinnúmero de ellos, cuya aplicación dependerá de las características físico-químico-biológicas de las aguas residuales; por ejemplo las aguas de desecho municipal no tienen complicaciones en su tratamiento, pues su composición se considera como 100% de origen doméstico y de comercios, por lo que su tratamiento se utilizan procesos preliminares como: rejillas, desarenadores, separadores de grasas y aceites, y procesos primarios como la sedimentación primaria para remover sólidos sedimentables; tratamiento biológico para degradar materia orgánica disuelta o en suspensión (lodos activados, filtros rociadores, lagunas de estabilización, por ejemplo); y sedimentación secundaria para la remoción de sólidos sedimentables en suspensión, así como digestión de lodos para su disposición final, ya sea en un relleno sanitario o como mejorador de suelos.

En el caso de las aguas residuales industriales se utilizan además tratamiento avanzado y otros como homogenización, neutralización, etc., Así, en un tren de procesos, cada componente del sistema proporciona una eficiencia en la remoción de contaminantes medidos a través de parámetros de calidad del agua, calidad del agua, lo cual es determinante para la disposición final de las aguas residuales tratadas, que incluye:

- Descarga a cuerpos receptores: ríos, estuarios, lagos, embalses y lagunas.
- Disposición en el suelo: recarga de acuíferos e infiltración.
- Usos: industriales y municipales.

El propósito del tratamiento avanzado es remover los contaminantes que permanecen en el agua después de que ésta ha recibido un tratamiento a nivel secundario, ya que el efluente puede utilizarse para: riego de parques, jardines, usos industriales como enfriamiento y producción de vapor.

Las aguas residuales representan un recurso renovable, debido a que después de ser tratadas pueden ser empleadas para satisfacer las necesidades industriales, agrícolas y municipales secundarias, así como para la recarga de acuíferos, a corto, mediano y largo plazo, y que el saneamiento se vuelve prioritario en zonas de probable conflicto, como son las regiones turísticas, fronterizas y con sequía extrema, es menester implementar e implantar planes y programas de acción, en coordinación con los Gobiernos Estatales y Municipales, para dar solución a la problemática en forma integral.

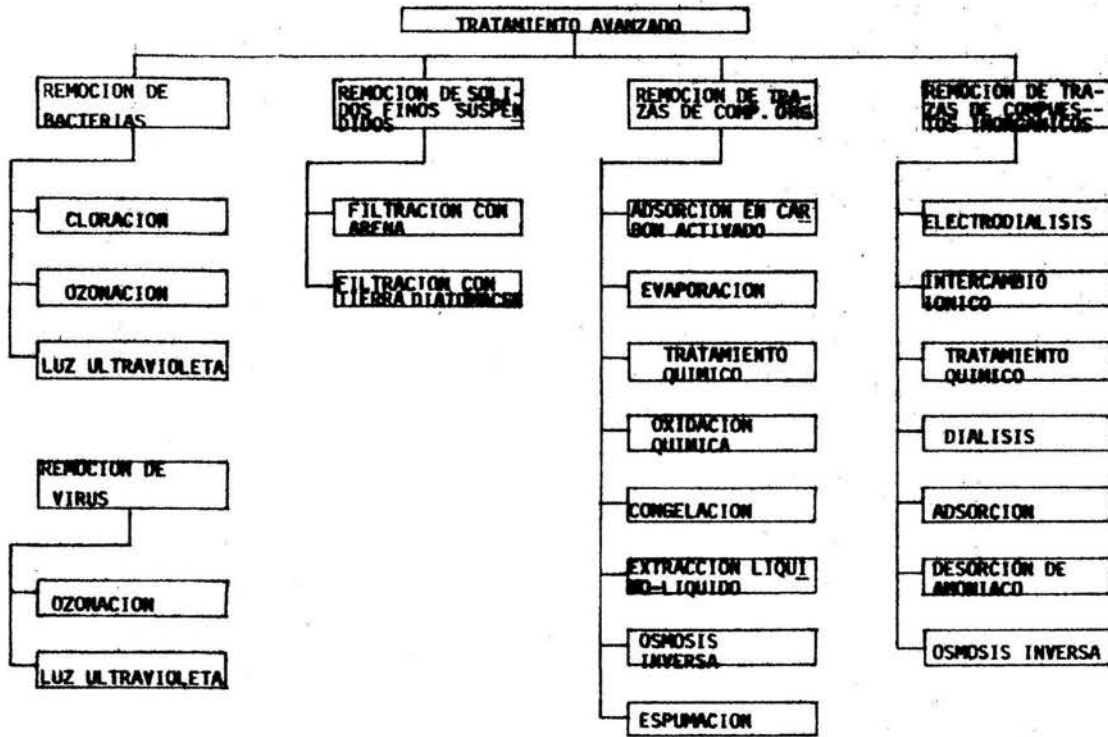
A continuación se presenta una lista de los contaminantes que permanecen en el agua después de haber recibido tratamiento secundario.

- Detergentes
- Nutrientes (Nitrógeno y Fósforo)
- Compuestos que causan color, olor y turbidez
- Compuestos orgánicos que demandan oxígeno
- Metales pesados (Fierro, Plomo y Manganeso)
- Compuestos orgánicos dañinos a la salud
- Organismos patógenos (Virus, Bacterias y Protozoarios)
- Sales inorgánicas disueltas

III. 2 Clasificación del tratamiento avanzado

Los métodos de tratamiento avanzado de las aguas residuales se pueden clasificar en función del tipo de operación o proceso unitario, o por el objetivo principal de eliminación o remoción que se quiere conseguir. El Cuadro 3.1 muestra la clasificación del tratamiento avanzado.

La selección de una operación o proceso, depende del uso potencial del efluente tratado; la naturaleza del agua residual; la compatibilidad de las diferentes operaciones y procesos; los medios disponibles para el vertido de los contaminantes, y la viabilidad económica y ambiental de los diferentes sistemas. Por lo anterior, la importancia de la caracterización del agua radica en que es indispensable para seleccionar las operaciones y procesos unitarios.



Fuente: Sistemas de Aguas del D. F., Rodrigo Figueroa 1998.

Figura 3.1 Clasificación de tratamiento avanzado.

III. 3 Procesos aplicables en el tratamiento avanzado

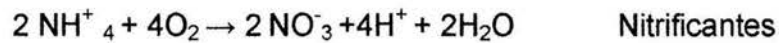
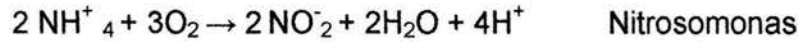
Es posible tratar el agua residual al grado que se desee, hasta convertirla en potable o aún en agua químicamente pura. El tratamiento avanzado de agua residual abarca aquellas técnicas que son aplicadas con el fin de mejorar la calidad del agua residual más allá de la que usualmente es lograda en el tratamiento secundario convencional.

Los procesos de tratamiento secundario seguidos de la desinfección pueden remover al menos el 85% de la DBO y sólidos suspendidos, y casi todos los microorganismos patógenos, no obstante se logra escasa remoción del nitrógeno, fósforo, DQO soluble y metales pesados. Los procesos de tratamiento avanzado más comunes son los que se describen a continuación.

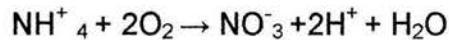
III. 3. 1 Remoción del nitrógeno

Existen varias razones importantes que justifican la eliminación de los compuestos de nitrógeno o de las aguas residuales antes de su descarga a los cuerpos receptores. Estas razones son las siguientes: el nitrógeno, junto con el fósforo, juega un papel importante como nutriente en el proceso de eutrofización; los compuestos nitrogenados exigen una demanda de oxígeno.

Los compuestos orgánicos del nitrógeno en las aguas residuales, bajo condiciones ambientales favorables, se convierten en nitrógeno amoniacal (por ello se indican como N-NH_4^+). A veces el N-NH_4^+ , se oxida a nitrito (N-NO_2^-) y finalmente a nitrato (N-NO_3^-). Las ecuaciones que se desarrollan en estas oxidaciones biológicas son las siguientes:



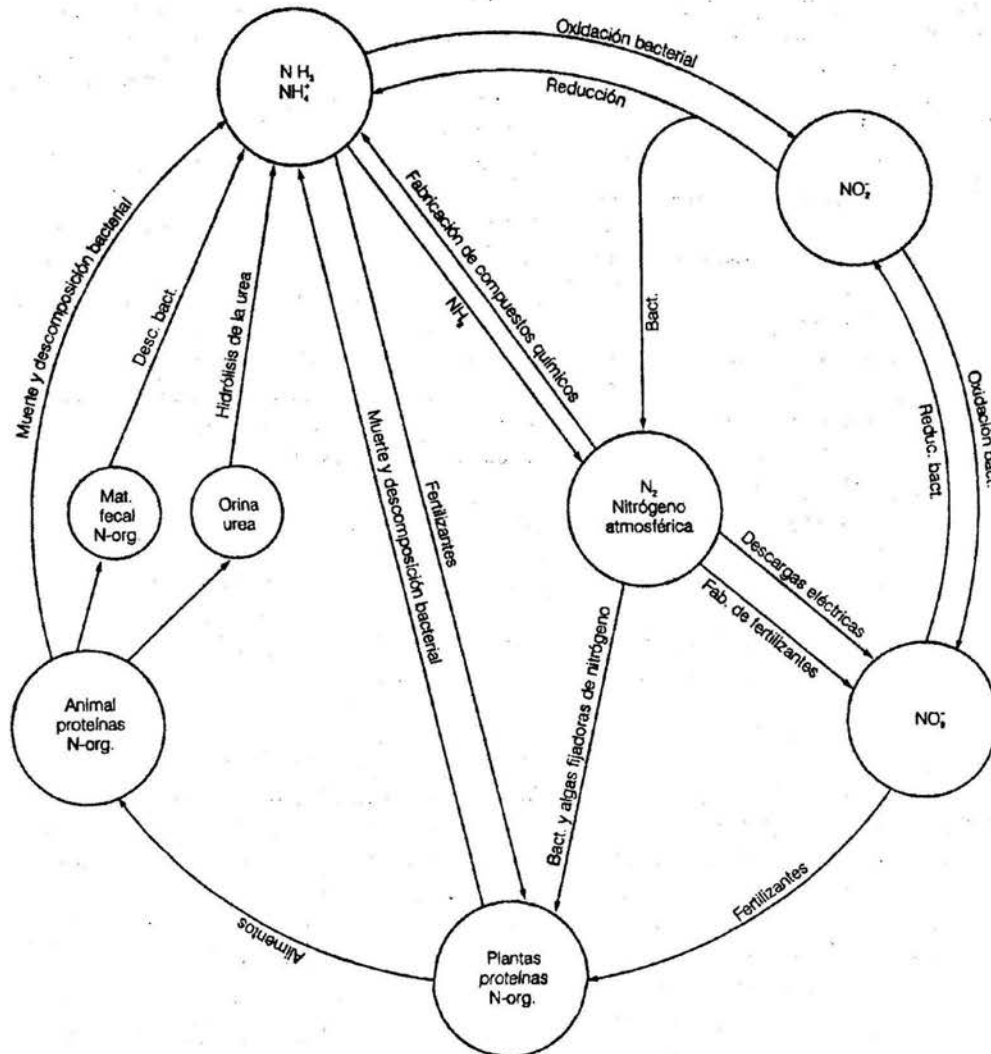
Dividiendo la ecuación suma por un factor 2 tenemos:



Estas ecuaciones químicas indican que se produce una demanda de oxígeno. En consecuencia, se consume el oxígeno disuelto presente en las aguas receptoras, causando de esta forma un efecto perjudicial sobre el medio ambiente, la flora y la fauna. Los microorganismos nitrosomonas y nitrobacter se denominan en forma general bacterias nitrificantes. Estas bacterias están clasificadas como microorganismos autótrofos, debido a que utilizan carbón inorgánico (CO_2 ó HCO_3^-) como fuentes de carbón. Por otra parte, la población bacteriana asociada con los lodos activos convencionales utilizan como fuentes de carbono compuestos orgánicos relativamente complejos y se denominan microorganismos heterótrofos; la presencia de N-NH_4^+ en un agua residual conduce a la formación de cloraminas y tricloruro de nitrógeno por reacción con el cloro utilizado como desinfectante. Como estos compuestos tienen un poder desinfectante considerablemente inferior al del propio cloro, esta situación resulta indeseable. Más aún, las cloraminas y el tricloruro de nitrógeno pueden ser responsables de olores y sabores desagradables en las aguas potables; el N-NH_4^+ es tóxico para la vida acuática. Conforme las reglamentaciones ambientales se hacen más estrictas, se hace más necesaria la eliminación de los compuestos nitrogenados de las aguas residuales con objeto de cumplir los estándares de calidad del efluente.

El nitrógeno en el agua residual es encontrado como nitrógeno orgánico, amoniacal y nitrato. Cantidades menores de nitritos también pueden estar presentes. Cuando está presente como nitrógeno orgánico o amoniacal, el nitrógeno ejerce una demanda de oxígeno. Se necesitan 4.6 mg de oxígeno por cada mg de nitrógeno amoniacal oxidado a nitrógeno en forma de nitrato.

De acuerdo con esto es evidente que la demanda de oxígeno nitrogenada de un residuo puede ser una fracción grande de la demanda total de oxígeno, ya que el nitrógeno total Kjeldahl (NTK), compuesto por amonio más nitrógeno orgánico, en aguas residuales asciende de 20 a 30 mg/l en promedio. La figura 3.2 muestra el ciclo del nitrógeno.



Fuente: Calidad del agua, Jairo A. Romero Rojas 1999.

Figura 3.2 Ciclo del nitrógeno.

El nitrógeno en la forma de amoníaco es también tóxico para algunos peces; su efecto depende en parte de las concentraciones de bióxido de carbono y oxígeno disuelto, el pH y la temperatura como también de la concentración del amoníaco. Se han registrado niveles tóxicos tan bajos mínimo de 0.01 mg/l.

La mayor parte del nitrógeno que entra al ambiente eventualmente será oxidado a nitratos, en cuyo estado puede ser usado como un nutriente por parte de plantas microscópicas y macroscópicas. Las cantidades excesivas de nitrógeno en cualquier forma pueden así contribuir a la eutroficación de aguas superficiales. Además, el nitrato es un contaminante en los sistemas de abastecimiento de agua potable.

De acuerdo con el sitio de descarga y la norma de calidad de agua aplicable, las plantas de tratamiento deben cumplir con: los límites en descarga de nitrógeno, de amoníaco o NTK o ambos o un límite en nitrógeno total.

El nitrógeno puede ser removido por técnicas biológicas y químicas. Las técnicas de remoción biológica comprenden la asimilación y la nitrificación-desnitrificación. El primer paso en el último proceso, la nitrificación, es adecuado para lograr la superación de algunas limitaciones de calidad del agua, ya que la demanda de oxígeno nitrogenéa es satisfecha y el amoníaco (que puede ser tóxico) es convertido en nitratos.

La asimilación biológica ocurre hasta cierto punto en cualquier proceso de tratamiento biológico, ya que todas las células vivientes contienen proteínas y, por tanto, tomarán nitrógeno de la solución. Los cultivos de algas incorporan nitrógeno, dióxido de carbono y trazas de nutrientes para formar masas celulares de algas. Las algas pueden producir también oxígeno suficiente para la estabilización de la materia orgánica, aunque este proceso denominado algas activadas no ha sido demostrado en aplicaciones de tamaño natural. La asimilación bacteriana puede ser fortalecida por el suministro de materia carbonácea proporcionalmente con el contenido de nitrógeno (DBO: N relación aproximada de 100:5). Las desventajas de la asimilación bacteriana incluyen el costo de la fuente de carbono por lo general metanol o glucosa, y el costo del manejo de grandes cantidades de lodos producidos. El lodo no puede ser digerido o térmicamente tratado, ya que producirá liberación del nitrógeno en la masa celular. Los procesos de asimilación, en sí mismos no son de ordinario prácticos, aunque alguna asimilación ocurrirá en cualquier proceso de tratamiento biológico. La asimilación bacteriana puede ser maximizada a una edad de lodos corta, maximizando así la producción de sólidos.

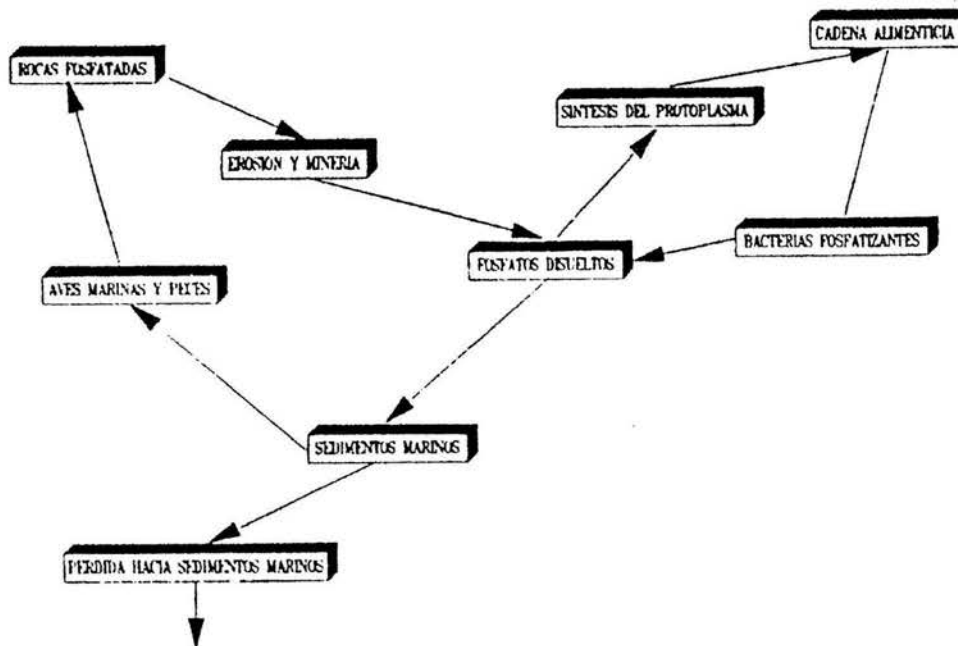
III. 3. 2 Remoción del fósforo

El fósforo, como el nitrógeno, es un nutriente de plantas microscópicas y macroscópicas, en consecuencia, puede contribuir a la eutroficación de aguas superficiales. No obstante, es importante establecer que la concentración de fósforo necesaria para el florecimiento de algas es sólo de 0.005 a 0.05 mg/l como P, y que este nivel puede ser excedido por fuentes naturales en muchas aguas superficiales. En tales circunstancias, el tratamiento del residuo para remover fósforo no impedirá el crecimiento de algas.

El fósforo puede ser removido biológica y químicamente. En algunas instancias, los químicos pueden ser añadidos a reactores biológicos en vez de ser usados en procesos separados, mientras, en otros, el fósforo concentrado biológicamente puede ser precipitado en forma química. Las bacterias y las algas requieren fósforo para sus actividades metabólicas en una relación de cerca de 1 parte de fósforo por 100 partes de carbono, por tanto, es posible anticipar cierta remoción de fósforo en cualquier proceso biológico. En consecuencia, la remoción no excede 20 a 40 %. Los procesos de lodos activados y asimilación bacteriana tienen el potencial de remoción adicional de fósforo, pero si las relaciones estequiométricas son mantenidas, sería necesario añadir carbono y nitrógeno al proceso de asimilación. La masa resultante de lodo residual de cualquiera de los procesos sería quizá de 5 veces la producida en una planta ordinaria.

El fósforo está presente en el agua residual en forma de ortofosfatos (PO_4^{-3}), y polifosfatos (P_2O_7) y formas orgánicas del fósforo.

Los dos últimos términos engloban hasta el 70% del fósforo contenido en el agua residual. Los microbios utilizan el fósforo para la síntesis celular y en el transporte de energía. Como consecuencia de ello, entre el 10% y el 30% del fósforo presente se elimina durante el tratamiento biológico secundario. Para conseguir niveles de fósforo bajos en el efluente, es necesario eliminar más cantidades de la estrictamente necesaria para el mantenimiento y síntesis celular. Bajo ciertas condiciones aerobias, los microorganismos pueden consumir más fósforo del necesario. Las células pueden liberar fósforo en condiciones anóxicas. La eliminación biológica del fósforo se consigue generando en 190s reactores las condiciones ambientales adecuadas de manera secuencial. La figura 3.3 se presenta un esquema de este proceso.



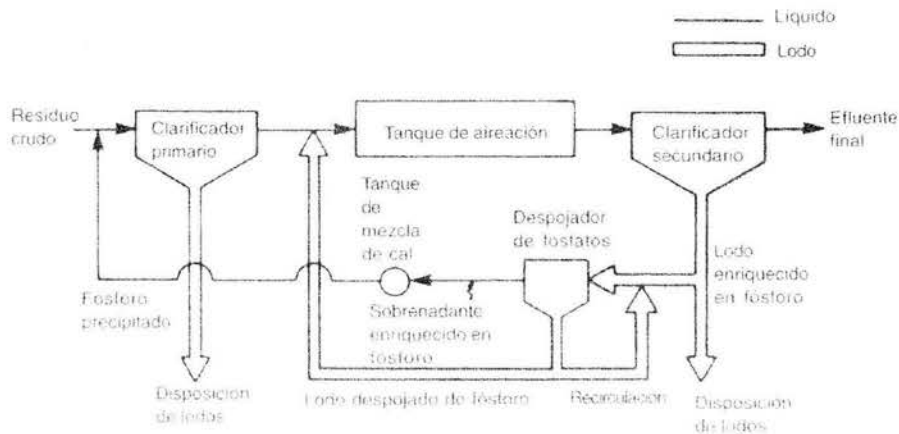
Fuente: Impacto Ambiental, Enrique César y Alba Vázquez 1988.

Figura 3.3 Ciclo del fósforo.

La remoción mejorada sin ninguna adición química puede obtenerse en procesos similares que emplean una zona anóxica o anaerobia previa a la aireación. Cuando es operado a la remoción máxima de fosfatos, este sistema algunas veces denominado reactor de secuencia funciona con un paso extra en el cual el lodo se deja en reposo por un periodo después de que se extrae el líquido tratado. La operación de este tipo de sistema es severamente afectada por la presencia de nitratos, lo cual permite a otras poblaciones de bacterias metabolizar los productos de la fermentación anóxica, eliminando de este modo la ventaja de las especies que almacenan fosfatos y limitando su crecimiento.

La remoción química del fósforo puede ser efectuada por precipitación en una variedad de formas, siendo de los ordinarios la menos costosa la que utiliza sales de aluminio, hierro o calcio.

El fósforo en el agua residual puede existir como fosfato orgánico, polifosfato u ortofosfato, el último compuesto con cuatro formas diferentes. Para simplificar, se considera que el fosfato está presente como ión fosfato (PO_4^{-3}) y las reacciones químicas se presentan sobre esa base. La Figura 3.4 se muestra el proceso de remoción de fosfatos químico-biológicos.



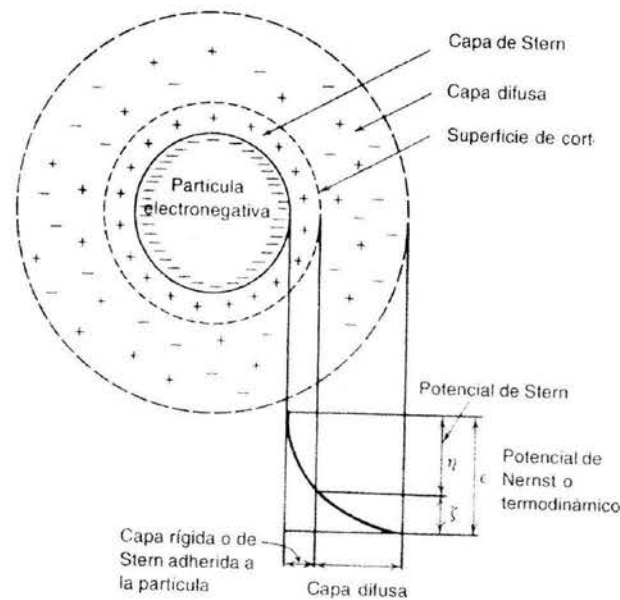
Fuente: Ingeniería Ambiental, McGhhe, 1999

Figura 3.4 Procesos de remoción de fosfatos químico-biológicos.

III. 3. 3 Remoción de sólidos finos suspendidos

Los sólidos finos suspendidos en agua residual tratada son en parte coloidales y en parte disueltos; su tamaño varía desde 10^{-3} hasta $100 \mu m$. Ninguno de estos materiales sedimenta fácilmente. La coagulación química seguida por sedimentación o flotación con aire disuelto, los microtamices, los filtros en tierra diatomáceas, los filtros en medios granulares y la ultrafiltración son técnicas que se han aplicado a la reducción de sólidos finos suspendidos en efluentes secundarios.

La coagulación es una técnica química dirigida hacia la desestabilización de partículas coloidales. Por su pequeño tamaño, las partículas coloidales tienen una relación muy grande de área superficial a volumen. Por ejemplo, 1 cm^3 de material, si se divide en cubos de 0.1 mm en un lado (el tamaño de arena fina), tendría una superficie de 0.06 m^2 mientras que si se divide en cubos de 10^{-5} mm en un lado (el punto medio del rango coloidal), tendría una superficie de 600 m^2 . Como resultado de esta extensa área, los fenómenos químicos de superficie son muy importantes. La adsorción preferencial de iones de una solución sobre la superficie coloidal y la ionización de grupos químicos en la superficie producen cargas netas en las partículas. La figura 3.5 es una representación esquemática del estado coloidal resultante.



Fuente: Ingeniería Ambiental, McGhhe, 1999

Figura 3.5 Modelo coloidal Guoy-Stern.

La mayoría de las partículas coloidales en el agua están cargadas negativamente como se mostró. La capa estacionaria cargada en la superficie está rodeada por una capa adherida de agua, en la cual los iones de carga opuesta sacados de la solución gruesa producen una rápida caída en potencial. Esta caída dentro de la capa de agua adherida es llamada potencial de Stern. Una caída más gradual, llamada potencial de zeta, ocurre entre la superficie de corte de la capa de agua adherida u el punto de electro neutralidad en la solución. La carga de superficie en partículas coloidales es el elemento que más contribuye a la estabilidad de éstas a largo plazo. Las partículas que podrían de otra manera sedimentarse o aglutinarse son mutuamente repelidas por sus cargas iguales. La coagulación del agua generalmente incluye la adición de químicos, bien sea electrolitos hidrolizantes o polímeros orgánicos. Entre los químicos comúnmente usados en la coagulación están la cal, alumbre, sales de hierro y polímeros.

La elección es impuesta por el costo relativo y la efectividad en aguas particulares. La remoción de contaminantes específicos en procesos de coagulación pueden ser afectadas por factores tales como la temperatura, el pH, la alcalinidad y la elección del coagulante.

La remoción de sólidos después de la coagulación puede ser efectuada en procesos de contacto de sólidos o en tanques de sedimentación simple. Para obtener muy bajos niveles de sólidos suspendidos se requiere algún tipo de filtración. La coagulación y la sedimentación de efluentes secundarios producen concentraciones de sólidos suspendidos entre 3 y 25 mg/l. Se espera que la flotación con aire disuelto de agua residual coagulada produzca un efluente algo mejor que los procesos de sedimentación simple.

Los microtamices constan de tambores accionados por motor, los cuales giran alrededor de un eje horizontal en un tanque que recolecta el filtrado. La superficie del tambor es cubierta por un tamiz fino con aberturas que varían de 23 a 60 μm . Las partículas que son más grandes que las aberturas son retenidas por el tamiz cuando el agua residual fluye desde el interior del barril a los alrededores del tanque. A medida que el tambor gira, los sólidos tamizados son transportados a la parte superior, donde son lavados desde el tamiz por un pulverizador de retrolavado de alta velocidad. El retrolavado es recolectado en una canaleta y recirculado a través de la planta. El tamaño de la malla, la sumergencia, la pérdida de cabeza disponible y la velocidad rotacional son parámetros de diseño. Se espera que los sólidos suspendidos efluentes de microtamices en plantas de lodos activados y filtros percoladores varíen desde 2 a 21 mg/l, lo cual representa una reducción de 43 a 85% del nivel en el influente del proceso. Las cargas hidráulicas usuales son 0.06 a 0.44 m/min en el área sumergida.

El flujo de retrolavado es comúnmente constante y varía hasta 5% del agua producida. Cerca del 50% de ésta pasa realmente a través del tamiz y puede recircularse. El resto baja hacia la salida del tamiz y se mezcla con el filtrado. La figura 3.6 es una representación esquemática de un microtamiz.



Fuente: Ingeniería Ambiental, McGhhe, 1999

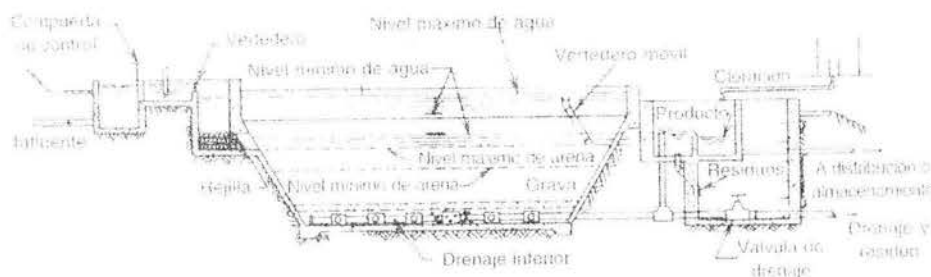
Figura 3.6 Microtamiz (1)Engranajes para soportes del tambor; (2)Elevador del tambor; (3) Canaleta de tamizados; (4)Pulverizador de retrolavado; (5)Manejo; (6)Rejilla; (7)Efluente; (8) Influyente y (9)Retorno de tamizado.

El filtro lento de arena fue desarrollado en Gran Bretaña a principios del siglo XIX y ha sido ampliamente empleado a través del mundo.

En los Estados Unidos se halló que tales filtros eran inadecuados para las aguas que poseían arcillas turbias de los principales ríos de Estados Unidos, y el filtro rápido de arena, o filtro americano, fue desarrollado como respuesta a esta necesidad especial.

Los filtros lentos de arena son por lo general aplicados a aguas que tienen un nivel de turbiedad muy bajo, no siendo necesario así su pretratamiento. En la Figura 3.7 se muestra una sección transversal de un filtro lento. La tasas de filtración en filtros es inferior a los 0.40 m/h (0.16 gal/min.pie²), aunque las tasa de hasta 1.5 m/h (0.6 gal/min.pie²) han sido usadas recientemente en algunos sistemas experimentales. La maduración, o desarrollo de una cubierta de superficie gelatinosa de crecimiento biológico es importante para la operación adecuada del filtro. La operación óptima se obtiene después de un periodo que varía entre 6 horas y 30 días, durante el cual la cubierta superficial denominada *schmutzdecke*, es acumulada. Se ha hallado que la cubierta es más efectiva cuando consta principalmente de algas filamentosas, mientras que ofrece mayor resistencia al flujo, requiriendo entonces limpieza más frecuente, cuando predominan algas unicelulares. Los filtros son operados con el agua producida, la cual es desechada en inicio de la carrera hasta que el requisito de calidad es logrado. Aunque se considera que la arena fina es preferible, se ha probado que materiales más gruesos, los cuales pueden estar presentes, también son satisfactorios. Los filtros lentos de arena pueden tener cualquier forma, aunque los diseños rectangulares son los más comunes. Las unidades individuales pueden llegar a ser hasta de 6000m².

El Tamaño de las unidades individuales está regido por los requerimientos de caudal cuando por lo menos una unidad se encuentre fuera de servicio para el lavado o mantenimiento. Las paredes laterales pueden ser verticales o inclinadas y son construidas en concreto o mampostería. La arena esta sostenida por una capa de grava de cerca de 0.3 m de espesor, la cual es graduada desde un tamaño efectivo de aproximadamente 5 mm en la parte superior hasta 50 mm en el fondo. Los drenajes inferiores, normalmente construidos con tubería perforada, son colocados hacia el inferior de la grava de soporte para recoger el filtrado. Las pérdidas por fricción en los drenajes inferiores deben ser bajas con el objeto de que la distribución del flujo sobre el lecho sea uniforme. En climas fríos, los filtros lentos de arena pueden ser cubiertos para minimizar la posibilidad de congelamiento.

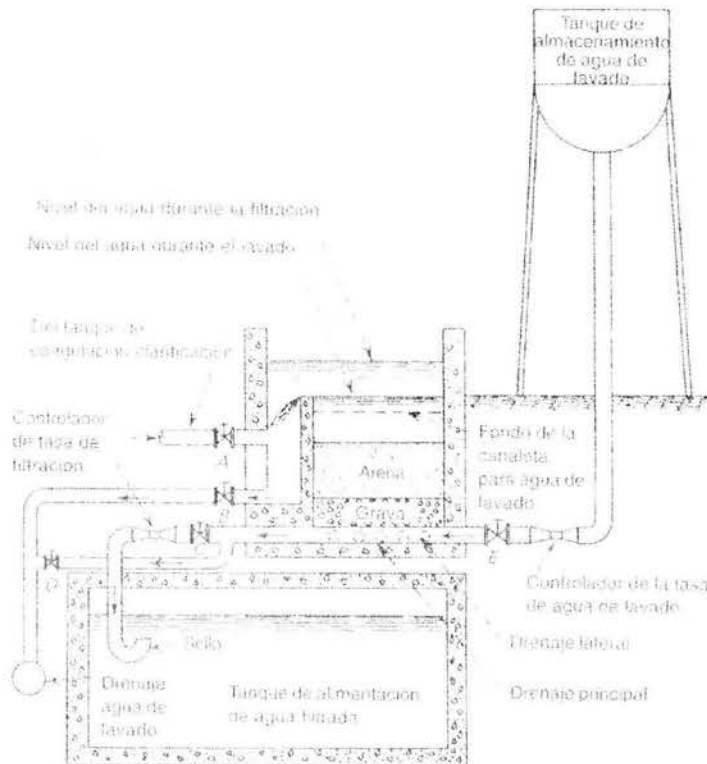


Fuente: Ingeniería Ambiental, McGhhe, 1999

Figura 3.7 Sección transversal de un filtro lento de arena.

Un filtro rápido contiene un lecho de medio granular tal como la arena, cuya profundidad varía entre 300 mm y varios metros. En la Figura 3.8 se muestra una sección esquemática de un filtro rápido. La cinética de remoción de las partículas de tamaño más pequeño que las aberturas de los poros del lecho es extremadamente compleja y depende mucho del acondicionamiento químico adecuado. La remoción misma ha sido descrita con procesos de transporte y adherencia. El transporte hacia la superficie del medio del filtro puede ser producido por difusión, interceptación, sedimentación, choque, o mediante el transporte hidrodinámico. El proceso de transporte es ayudado por la floculación en los intersticios del filtro y por el transporte corto requerido para remoción por sedimentación. La adherencia de las partículas luego de su contacto con el medio es de naturaleza química y está influenciada por el pH, la composición iónica del agua, la edad del floculo, la naturaleza y la dosificación del coagulante y la composición y condición superficial del medio.

Tanto el medio del filtro como las partículas suspendidas en el influente pueden soportar cargas superficiales que pueden bien sea ayudar o inhibir la adherencia. Estas cargas superficiales son alteradas por cambios en el pH y por la adición de coagulantes.



Fuente: Ingeniería Ambiental, McGhhe, 1999

Figura 3.8 Sección esquemática de un filtro rápido.

La remoción de partículas en un filtro granular resulta de los procesos de transporte y adherencia antes descritos. La remoción tiende a ocurrir inicialmente en el estrato superior del lecho con las partículas que penetran a mayor profundidad con el progreso de la carrera. Cuando los intersticios del lecho son llenados, la velocidad superficial del agua aumenta, generando la resuspensión de algunas partículas, la pérdida de presión incrementada en el lecho y la creación de canales de flujo relativamente grandes en la parte superior de la superficie. Si la pérdida de carga en el lecho se torna demasiado grande, se puede crear un vacío parcial, produciéndose la formación de burbujas de gases tomados de la solución.

Este fenómeno, llamado formación de bolsas de aire, restringe aún más el área de flujo, incrementa la velocidad y la pérdida de carga, y puede provocar que partículas sean transportadas a través del filtro.

Las partículas de flóculos fuertes y grandes tenderán a ser removidas en las capas superiores del filtro, produciendo alta pérdida de carga con poca penetración del lecho, en particular si el medio es fino. Las partículas de flóculos más pequeñas, en especial las que están sobre un medio granular, penetrarán más lejos dentro del lecho, distribuyendo la reducción en la capacidad de flujo y produciendo menor pérdida de carga equivalente para la remoción durante periodos de tiempo iguales. Los lechos de filtro de medio granular son en general más profundos para suministrar una mayor penetración de flóculo de lo que se esperaba.

Para lograr una penetración más profunda sin transportar sólidos a través del filtro, el flóculo debe ser pequeño y relativamente fuerte. Esto puede obtenerse por el uso de periodos cortos de floculación y de gradientes de velocidad relativamente altos.

Los filtros de tierras diatomáceas fueron desarrollados por el ejército para el tratamiento del agua bajo condiciones de combate. Dado que estas unidades son pequeñas, también han sido aplicadas al uso de piscinas y han demostrado ser efectivas en la remoción de un protozoario como la *Giardia*, que puede producir gastroenteritis, que es uno de los microorganismos más resistentes a la desinfección.

El medio filtrante ideal deberá ser de un tamaño tal que suministre un efluente satisfactorio, retenga una cantidad máxima de sólidos con una pérdida de carga mínima y sea fácilmente limpiado con una cantidad mínima de agua.

El tamaño y la uniformidad de los medios filtrantes están especificados por el tamaño efectivo y el coeficiente de uniformidad. El tamaño efectivo es el tamaño en milímetros del tamiz que permite pasar el 10% del medio en peso. El coeficiente de uniformidad es la relación entre el tamaño del tamiz que permite pasar el 60% en peso y el tamaño efectivo. Los materiales finos producen una pérdida de carga mayor, pero suministran una mejor protección contra el paso de las partículas pequeñas. Los materiales uniformes permiten una penetración más profunda del flóculo y una mejor utilización de la capacidad de almacenamiento del lecho. Los materiales granulares requieren de velocidades de retrolavado más altas para fluidización (si ésta es producida por el flujo de agua), pero es menos probable que formen aglomerados grandes llamados bolas de barro durante el retrolavado.

Los lechos de los filtros pueden ser contruidos de un solo medio, de los medios de características diferentes o de una mezcla de más de dos medios. Éstos son denominados monomedio, medio doble, y multimedio, respectivamente.

La arena es normalmente el medio filtrante más barato. La arena usada en filtros rápidos debe estar libre de mugre, ser dura y resistente a la abrasión y se prefiere que sea de cuarzo o cuarcita. No debe perder más de 5% en peso después de una inmersión de 24 horas en un 40% de ácido hidroclicórico. En la práctica actual, en filtros rápidos se usa arena con un tamaño efectivo de 0.45 a 0.55 mm y un coeficiente de uniformidad de 1.2 a 1.7.

La antracita es un carbón duro que ha sido usado como un sustituto para la arena en filtros monomedio y a menudo es usada como un componente de los diseños de medio doble y multimedio. La antracita triturada usada en filtros tiene un tamaño efectivo de 0.7 mm o más y un coeficiente de uniformidad de menos de 1.75.

La arena granate y la limenita son materiales en particular densos [densidad relativa d.r.≈4.2] que pueden ser utilizadas como componentes de filtros multimedio. El costo relativamente alto y la disponibilidad limitada de estos materiales hacen que su uso como un monomedio sea poco práctico.

Otros materiales que pueden ser utilizados son el vidrio triturado, la escoria, los minerales metálicos, y aun la cáscara de coco cortado y la cáscara de arroz quemado, han sido utilizados como medios filtrantes, al igual que el carbón activado. Estos últimos medios tienen efectos sobre la calidad del agua diferentes a aquellos relacionados con los procesos de filtración simple. Los materiales de mayor interés para la ingeniería están limitados a arena y antracita.

Una vez que han sido retrolavados, los filtros granulares ordinarios se sedimentaran con las partículas más finas sobre la parte superior y las más gruesas sobre el fondo. Este acomodo es desfavorable por cuanto las partículas suspendidas tenderán a ser removidas en la parte superior, estrato más fino, produciendo pérdida de carga más alta que si estuviesen distribuidas con mayor uniformidad a través del lecho. El fenómeno descrito puede ser reversible, hasta un cierto grado, mediante el empleo de dos o más medios de diferentes densidades seleccionadas, de tal forma que las partículas más gruesas sedimentarán más lentamente que las más finas y así estarán en la parte superior después del retrolavado.

III. 3. 4 Remoción de organismos patógenos

Los organismos patógenos que se encuentran en las aguas residuales pueden proceder de desechos humanos que estén infectados o que sean portadores de una determinada enfermedad. Las principales clases de organismos patógenos presentes en las aguas residuales son: las bacterias, los virus, los protozoos y el grupo de los helmintos. Los organismos bacterianos patógenos que pueden ser excretados por el hombre causan enfermedades del aparato intestinal como la fiebre tifoidea y paratifoidea, la disentería, diarreas y cólera.

Debido a la alta infecciosidad de estos organismos, cada año son responsables de gran número de muertes en países con escasos recursos sanitarios, especialmente en zonas tropicales.

Los organismos patógenos se presentan en las aguas residuales y contaminadas en cantidades muy pequeñas y, además, resultan difíciles de aislar y de identificar. Por ello se emplea el organismo coliforme como organismo indicador, puesto que su presencia es mas numerosa y fácil de comprobar. La presencia de organismos patógenos representa peligro para la salud del hombre, siendo necesaria su remoción, los métodos comúnmente usados son los siguientes:

Dióxido de cloro

El dióxido de cloro: se usa como oxidante en las industrias, siendo peligroso su manejo por ser corrosivo, su preparación se hace en el sitio de aplicación a base de cloro gaseoso y clorito de sodio. El dióxido tiene un potencial de oxidación extremadamente alto, lo cual puede explicar su potencial germicida.

Luz ultravioleta

Luz ultravioleta: al pasar rayos de luz ultravioleta en capas delgadas de agua con características claras se lleva a cabo la eliminación de organismos patógenos y virus. La radiación ultravioleta constituye, más bien, un agente desinfectante físico.

Debido a que solo son efectivos los rayos ultravioleta que alcanzan a las bacterias, es conveniente que el agua este libre de turbiedad, que podría absorber la radiación ultravioleta y actuar como escudo de las bacterias.

Una apropiada dosis de radiación ultravioleta (UV) ha mostrado ser un efectivo bactericida y virucida, además de no contribuye a la formación de compuestos tóxicos. Actualmente la lámpara de arco de mercurio de baja presión es la principal forma de generar UV usada para la desinfección. La luz ultravioleta es un agente físico desinfectante que se puede utilizar en lugar de los agentes químicos, la radiación penetra la pared celular de los microorganismos y es absorbida por el material celular, incluyendo el DNA y RNA.

Ozonación

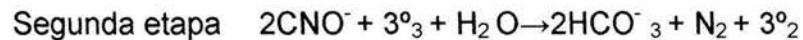
Ozonación: este proceso se utiliza generalmente como un paso final en el tratamiento de aguas, ya que es bastante efectivo como bactericida además de remover virus. Debido a que el ozono es químicamente inestable, se descompone a oxígeno muy rápidamente después de su generación, lo cual obliga a un proceso de generación in situ. El ozono se genera a partir del aire, o de oxígeno puro, al hacer circular una corriente de alto voltaje entre dos electrodos separados por un espacio muy pequeño. La corona de alta energía que se produce en este sistema permite disociar una molécula de oxígeno para, al juntarse con otras dos, producir dos moléculas de ozono.

La oxidación química con ozono es un método efectivo para tratar las aguas residuales, basándose en los siguientes factores: el ozono reacciona fácilmente con los productos

orgánicos no saturados presentes en las aguas residuales; la tendencia a la formación de espuma de las aguas residuales se reduce después con el tratamiento de ozono; la ruptura de los anillos y la oxidación parcial de los productos aromáticos deja a las aguas residuales más susceptibles de tratamiento convencional biológico; el ozono presente en el efluente se convierte rápidamente a oxígeno una vez que ha servido sus fines.

Este oxígeno es beneficioso para las corrientes receptoras y ayuda a mantener la vida acuática. Por el contrario, el cloro (es el agente más ampliamente usado para eliminar las bacterias) permanece en el efluente y se convierte en contaminante. Eckenfelder y Ford describen un equipo de laboratorio de ozonación para evaluar la factibilidad del proceso en su aplicación en las aguas residuales.

El ozono puede sustituir al cloro en el tratamiento de las aguas residuales que contienen cianuro. La oxidación tiene lugar en dos etapas de acuerdo con las siguientes ecuaciones:



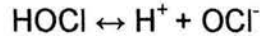
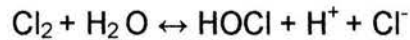
Cloración

Cloración: es uno de los métodos más usados en México para la destrucción de organismos patógenos; la desinfección con cloro tiene el inconveniente de formar compuestos cancerígenos, ya que reacciona con compuestos como el nitrógeno y la materia orgánica, produciendo entre otras sustancias los llamados trihalometanos. Los compuestos de cloro más comúnmente empleados en las plantas de tratamiento de aguas residuales son el cloro gas, el hipoclorito de sodio, el hipoclorito de calcio y el dióxido de cloro.

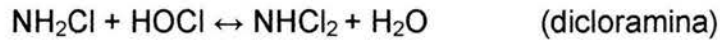
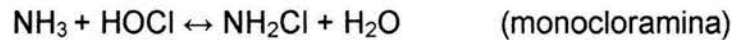
La cloración es un proceso muy usado en el tratamiento de aguas residuales industriales y urbanas. Algunos efluentes industriales que normalmente se cloran antes de sus descargas a las aguas receptoras son los procedentes de las plantas de azúcar de caña, de azúcar de remolacha, de centrales lecheras, de las fábricas de pasta y papel, de las plantas textiles, de las de curtido, de las petroquímicas, de las farmacéuticas, y de las de acabado superficial de los metales.

Los objetivos de la cloración se resumen como: desinfección, fundamentalmente el cloro es un desinfectante debido a su fuerte capacidad de oxidación, por lo que destruye o inhibe el crecimiento de bacterias y algas; reducción de la DBO el cloro produce una reducción de la DBO por oxidación de los compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales; eliminación o reducción de colores y olores, las sustancias que producen color y olor presentes en las aguas residuales se oxidan mediante el cloro; oxidación de los iones metálicos, los iones metálicos que están presentes en forma reducida se oxidan por el cloro (por ejemplo ferroso a férrico y manganeso a mangánico) y la oxidación de los cianuros a productos inocuos.

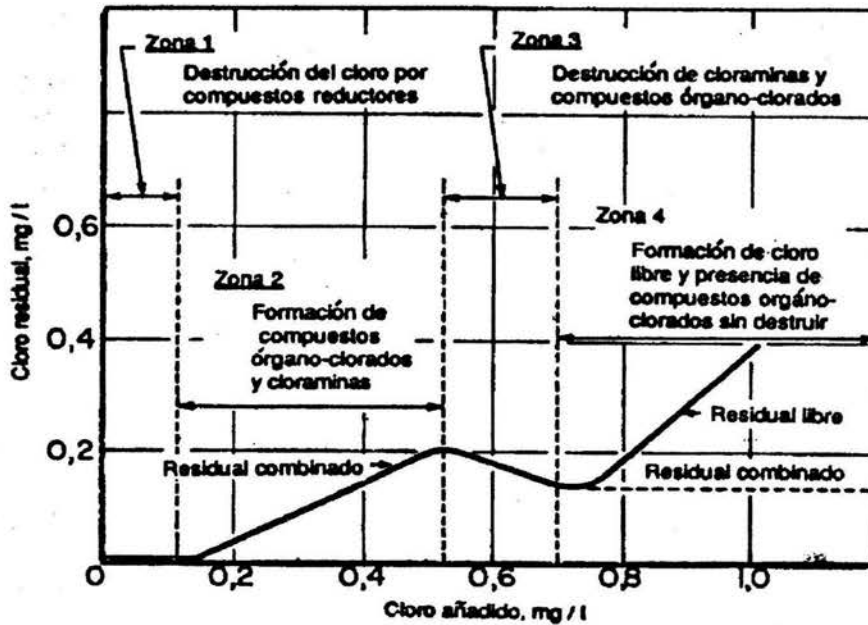
Cuando se añade cloro al agua, bien como gas o como solución, el cloro reacciona para formar ácido hipocloroso (HOCl), que subsecuentemente se disocia de acuerdo con las siguientes reacciones químicas:



Como el HOCl es un ácido débil, una parte importante del cloro residual está formada por HOCl sin disociar. En presencia de amoníaco, el ácido hipocloroso reacciona para formar monocloramina, dicloramina y tricloruro de nitrógeno. Las proporciones relativas de estos compuestos dependen del pH y de la concentración del amoníaco presente. Las ecuaciones químicas correspondientes son:



Estos compuestos son responsables de olores y sabores desagradables en el agua. Asimismo, la capacidad desinfectante de estos compuestos es menor que la del cloro. La figura 3.9 muestra las reacciones del cloro en el agua. La cantidad inicial de cloro añadida se reduce por los compuestos que reaccionan rápidamente con él (por ejemplo Fe^{2+} y Mn^{2+}). Esto corresponde a la zona 1 en la cual el cloro residual es prácticamente cero. La adición continua de cloro conduce a la presencia de residual en la forma de compuestos orgánicos clorados o cloraminas (residual combinado). El cloro residual es siempre menor que el cloro añadido. Esto corresponde a la zona 2 de la curva. Añadiendo más cloro, los compuestos órgano-clorados se oxidan: la molécula se rompe y se libera cloro. Esto conduce a la disminución del cloro residual esto corresponde a la zona 3. Finalmente, cuando todos los compuestos reductores han sido oxidados, la cantidad adicional de cloro añadido al agua produce una cantidad equivalente de cloro residual esto corresponde a la zona 4 que presenta una línea recta a 45° para el residual libre, y una línea recta paralela a las abscisas para el residual combinado constante.



Fuente: Tratamiento de aguas residuales, R.S. Ramalho, 1993

Figura 3.9 Reacciones del cloro en el agua

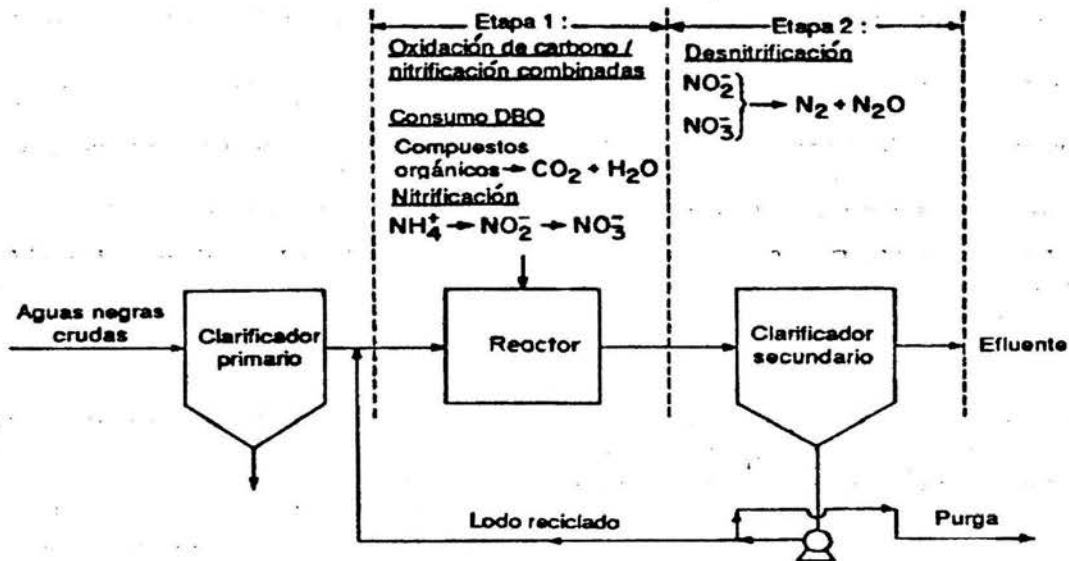
III. 3. 5 Nitrificación

La nitrificación es un proceso biológico en el cual el amoníaco es convertido a nitritos y de nitritos a nitratos por las especies nitrosomonas y nitrobacter, respectivamente. El proceso de nitrificación depende de la edad de los lodos, al igual que otros sistemas biológicos, pero también es fuertemente afectado por la temperatura, la concentración de oxígeno disuelto, la concentración final de amonio y el pH.

La reacción es aumentada en niveles más altos de pH, de temperatura y de oxígeno disuelto. Para obtener una nitrificación satisfactoria en procesos de crecimiento suspendido se requiere un mínimo de oxígeno disuelto de al menos 2 mg/l en caudal y carga pico, aunque bajo algunas circunstancias la nitrificación ocurrirá en niveles más bajos. El proceso principal encaminado específicamente a la eliminación del nitrógeno es el de nitrificación-desnitrificación, el cual es una modificación del proceso convencional de lodos activados y tiene lugar en dos fases: nitrificación y desnitrificación.

Fase de nitrificación esta fase consiste en la aireación, utilizando un tiempo de retención en el reactor biológico considerablemente superior al que suele emplearse en el caso del proceso convencional de lodos activados. Los compuestos orgánicos de carbono se oxidan (eliminación de la DBO) así como los compuestos nitrogenados que se convierten en nitritos y finalmente en nitratos en presencia de bacterias nitrificantes. Esta fase puede diseñarse para que transcurran en una etapa única (proceso combinado de oxidación del carbono y de nitrificación) o en dos etapas (proceso en etapas separadas de oxidación del carbono y de nitrificación).

La figura 3.10 muestra un diagrama de flujo típico del proceso combinado de la etapa única del proceso oxidación de carbono/nitrificación. Si el agua residual contiene compuestos que son tóxicos para las bacterias nitrificantes, como metales pesados, cianuros, compuestos halogenados, fenoles, mercaptanos, guanidinas y tiourea, el proceso combinado oxidación del carbono- nitrificación puede resultar inviable, ya que estas sustancias tóxicas impiden el desarrollo de bacterias nitrificantes. Sin embargo, en ausencia de esas condiciones de inhibición de la formación de bacterias, con el proceso combinado oxidación del carbono/nitrificación puede alcanzarse un efluente con niveles de N-NH_4^+ menores de 10 mg/l.



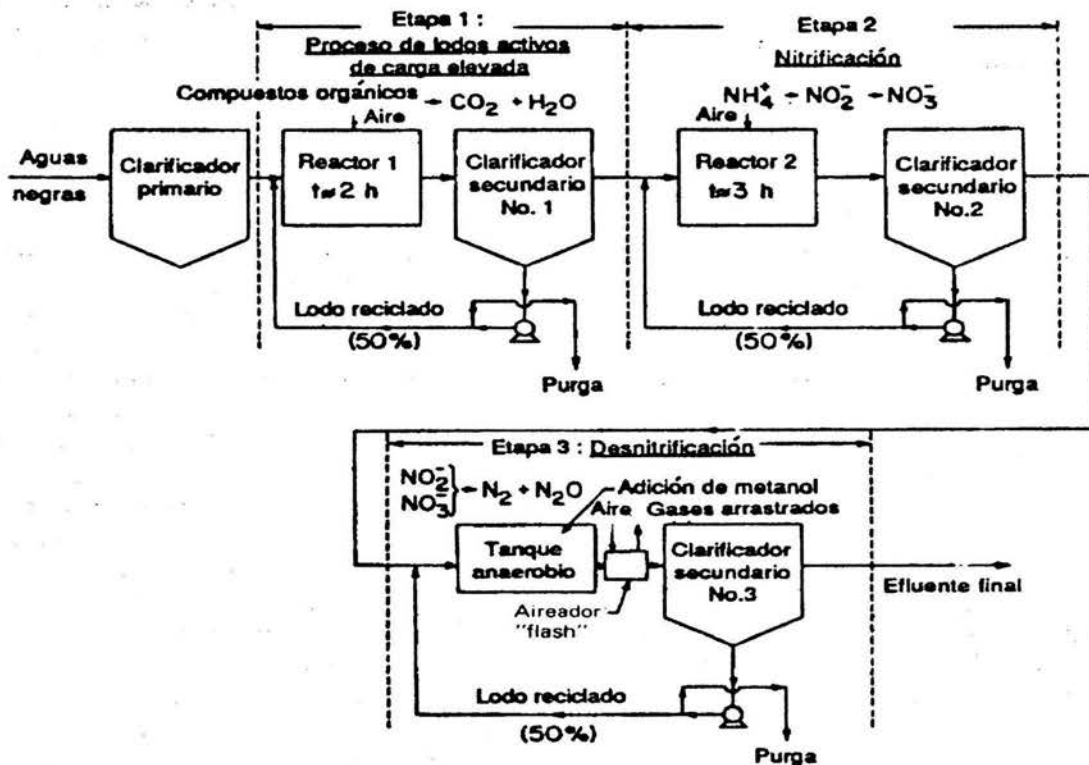
Fuente: Tratamiento de aguas residuales, R.S. Ramalho, 1993

Figura 3.10 Diagrama de flujo del proceso único oxidación de carbono/nitrificación

Si hay presentes en el agua residual inhibidores de la nitrificación, se eliminan en gran cantidad en la etapa 1 que es un proceso de lodos activados de carga elevada, en el que se elimina del 75 al 85% de los compuestos de carbono. El tiempo de retención en el reactor biológico en la etapa 1 es corto (≈ 2 h). La etapa 2 es una nitrificación selectiva en presencia de un cultivo enriquecido en bacterias nitrificantes. El tiempo de retención en el reactor biológico en la etapa 2 es de 3 h aproximadamente. En general, si se desea obtener un efluente con niveles de N-NH_4^+ inferiores a 5 mg/l, se recomienda el proceso de etapas separadas incluso aunque la inhibición en la formación de bacterias nitrificantes no constituya a un grave problema. Debido a que la eliminación de los compuestos de carbono y nitrógeno se llevan a cabo en etapas independientes, es posible optimizar cada una individualmente. Las condiciones óptimas para la eliminación de los compuestos de carbono y para la nitrificación son diferentes, y en consecuencia el proceso combinado representa necesariamente una situación de compromiso.

III. 3. 6 Desnitrificación

La fase de desnitrificación es un proceso anaerobio en el que los nitritos y nitratos resultantes de la fase de nitrificación, se convierten en presencia de bacterias desnitrificantes (microorganismos facultativos heterótrofos) en nitrógeno gas y óxido de Nitrógeno. Aunque la presencia de nitritos y nitratos en un efluente es menos cuestionable que la del nitrógeno amoniacal, se hace necesario eliminarlos si se aplican reglamentaciones estrictas para permitir la evacuación del efluente. La peligrosidad de los nitratos en los efluentes, en relación con la aparición de metehemoglobinemia infantil. La figura 3.11 muestra un diagrama de flujo típico del proceso en etapas separadas oxidación de nitrificación-desnitrificación. La desnitrificación se produce en un tanque anaerobio seguido por un clarificador secundario. La aireación tiene por objeto desgasificar los flocos anaerobios, de forma tal que el nitrógeno y los óxidos de nitrógeno se liberan durante la desnitrificación y pueden escapar produciendo unas condiciones mejoradas de sedimentación en el clarificador secundario. En ausencia de las aireación, las burbujas de gas que ascienden en el clarificador secundario tenderían a hacer flotar los sólidos en suspensión produciendo la presencia indeseable de dichos sólidos en el rebosadero del clarificador.



Fuente: Tratamiento de aguas residuales, R.S. Ramalho, 1993

Figura 3.11 proceso de nitrificación-desnitrificación

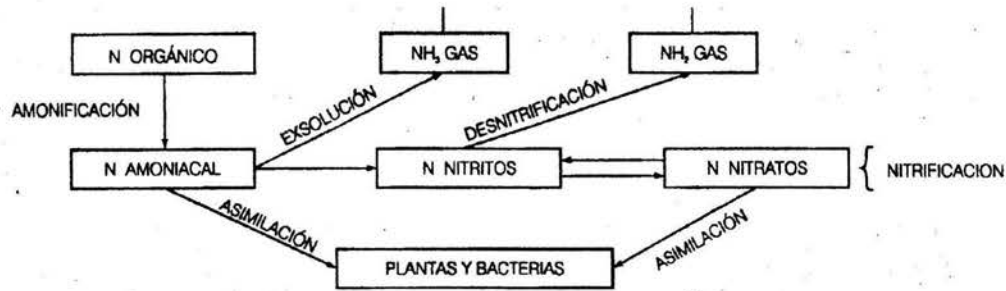
Debido que se ha producido una disminución considerable de la DBO en la fase de nitrificación, podría ocurrir que hubiera poco carbono orgánico en la fase de desnitrificación. Ya que las bacterias desnitrificantes son microorganismos heterótrofos, requieren una fuente de carbono orgánico para la síntesis de nuevas células, por lo que puede resultar necesario añadir carbono orgánico. El metanol ha sido la fuente externa de carbono más utilizada en la desnitrificación debido a su bajo costo, y a su contenido elevado en carbono.

La desnitrificación puede llevarse a cabo incluso sin adición de una fuente externa de carbono orgánico para mantener las exigencias de las bacterias desnitrificantes. La respiración endógena puede proporcionar estos requisitos aunque la adición de esa fuente externa de carbono es conveniente. Pueden utilizarse asimismo algunas aguas residuales industriales como fuente externa de carbono en la etapa de desnitrificación. Conviene advertir que el reactor situado a continuación de las etapas de desnitrificación sirve también para separar aeróbicamente el exceso de metanol o de otros productos orgánicos utilizados como fuente externa. Sirve también para aumentar el nivel de oxígeno disuelto con objeto de que no se produzca desnitrificaciones adicionales en el clarificador final.

Los nitratos formados sirven como fertilizantes para las plantas. El proceso se conoce con el nombre de nitrificación y se usa como primera etapa en el tratamiento de aguas residuales que contienen nitrógeno amoniacal, cuando se requieren remoción biológica de nitrógeno.

En condiciones anaerobias, los nitratos son reducidos a nitritos y estos a gas nitrógeno por bacterias. El proceso se conoce con el nombre de desnitrificación y se supone ocurre en dos pasos sucesivos: La reducción inicial de los nitratos en nitritos y la de estos en nitrógeno gaseoso.

La desnitrificación es la segunda etapa de la eliminación del nitrógeno mediante el proceso de nitrificación-desnitrificación. La eliminación del nitrógeno en forma de nitrato por conversión en nitrógeno gas se puede conseguir biológicamente bajo condiciones anóxicas (sin oxígeno), el proceso se conoce con el nombre de desnitrificación. La conversión del nitrógeno, en forma de nitratos, a formas más rápidamente eliminables se puede llevar a cabo gracias a la acción de diversos géneros de bacterias. Estas bacterias son heterótrofas capaces de la reducción disimilatoria del nitrato, que es un proceso de dos etapas. El primer paso consiste en la conversión de nitrato en nitrito, y a continuación se produce óxido nítrico, óxido nitroso y nitrógeno gas, éstos últimos compuestos son gaseosos, y se pueden liberar a la atmósfera. En la figura 3.12 se muestran los cambios en forma del nitrógeno.



Fuente: Calidad del agua, Jairo A. Rojas 1999.

Figura 3.12 Transformación del nitrógeno.

III. 3. 7 Remoción de compuestos tóxicos y compuestos orgánicos

En los últimos años se ha prestado mayor atención a la sustancias tóxicas por sus efectos sobre la salud pública y el ambiente. Los compuestos orgánicos refractarios son compuestos resistentes a la degradación microbiana, tanto en procesos de tratamiento biológico convencionales, como en el medio natural.

Para el tratamiento de compuestos tóxicos se pueden emplear diversos métodos de tratamiento. Debido a la compleja naturaleza de la toxicidad los métodos de tratamiento deben tener en cuenta las características específicas del agua residual y la naturaleza de los compuestos tóxicos. El cuadro 3.13 se presentan los procesos de tratamiento empleados para la remoción de compuestos tóxicos.

Cuadro 3.13 Procesos de tratamiento empleados en la remoción de compuestos tóxicos

PROCESO	APLICACIÓN DE ELIMINACION
Absorción sobre carbón activado.	Compuestos orgánicos naturales y sintéticos entre los que se incluyen los pesticidas; COVs: (compuestos orgánicos volátiles), los PCBs y metales pesados.
Lodos activados y carbón activado en polvo.	Metales pesados; amoniaco; determinados contaminantes prioritarios refractarios.
Arrastre con aire.	Compuestos orgánicos volátiles (COVs) y amoniaco.
Coagulación química, sedimentación y filtración.	Metales pesados y los PCBs.
Oxidación química.	Amoniaco; compuestos refractarios y compuestos tóxicos alifáticos y aromáticos halogenados.
Tratamiento biológico convencional (lodos activados, filtros percoladores).	Fenoles; PCBs.; hidrocarburos hidrogenados seleccionados.

Fuente: Ingeniería de aguas residuales, Metcalf y Edy 1998.

La absorción sobre carbón activado, es un método de tratamiento avanzado del agua residual que se emplea para la eliminación, tanto de los compuestos orgánicos refractarios, como de las concentraciones residuales de compuestos inorgánicos como nitrógeno, sulfuros y metales pesados. Normalmente, aguas arriba de los lechos de carbón activado se disponen filtros de medio granular, con el objeto de eliminar la materia orgánica soluble asociada a los sólidos suspendidos presentes en efluentes secundarios.

La adsorción es la colección y concentración selectiva sobre la superficie sólida de moléculas de tipos particulares contenidas en un líquido o en un gas. A través de esta operación unitaria los gases o líquidos de sistemas mezclados, aún a muy bajas concentraciones, pueden ser selectivamente capturados y eliminados de las corrientes gaseosas y líquidas usando una gran variedad de materiales específicos conocidos como adsorbentes. El material que es adsorbido sobre el adsorbente es llamado adsorbato. Existen dos mecanismos involucrados en la adsorción: la adsorción física y la adsorción química.

Cuando las moléculas gaseosas o líquidas alcanzan la superficie de un adsorbente y permanecen sin ninguna reacción química, el fenómeno es conocido como adsorción física. El mecanismo por el cual se aplica la adsorción física pueden ser las fuerzas electrostáticas intermoleculares o de Vander Waals, o puede depender en la configuración física del adsorbente como en el caso de la estructura de los poros del carbón activado.

III. 3. 8 Remoción de sustancias inorgánicas disueltas

Los tratamientos avanzados se definen como el tratamiento adicional necesario para eliminar las sustancias suspendidas y disueltas que permanecen después de un tratamiento secundario clásico. Estas sustancias pueden ser materia orgánica o sólidos suspendidos, o pueden variar de iones relativamente simples, tales que el potasio, el calcio, el sulfato, el nitrato y el fosfato hasta los cada vez más complejos compuestos orgánicos más sintéticos. Estas operaciones y procesos que merecen especial atención son la precipitación química, el intercambio iónico, la ultrafiltración, la ósmosis inversa y la electrodiálisis.

Precipitación química

La precipitación del fósforo contenida en el agua residual se suele conseguir con la adición de coagulantes como la alúmina, la cal o sales metálicas, y polímeros. Simultáneamente la adición de estos productos químicos para la eliminación del fósforo también elimina varios iones inorgánicos, especialmente algunos metales pesados.

En los casos en los que se tratan conjuntamente aguas residuales domésticas e industriales, puede ser necesario añadir reactivos a la decantación primaria, especialmente si las operaciones de pretratamiento se muestran ineficaces. En los casos en los que se incorpore la precipitación química, puede no ser viable, la estabilización de los lodos por digestión anaerobia debido a la toxicidad de los metales pesados precipitados.

Una de las desventajas de la precipitación química es el incremento neto en el contenido de sólidos disueltos del agua residual a tratar. Otra desventaja es el gran volumen de lodos a tratar que, además, puede contener compuestos tóxicos que dificulten su tratamiento y evacuación.

Intercambio iónico

El intercambio iónico es un proceso unitario en el que los iones de las diferentes especies en disolución desplazan a los iones insolubles de un determinado material de intercambio. El uso más extendido de este proceso es el ablandamiento de aguas residuales domésticas, en el que los iones sódicos de la resina catiónica de intercambio sustituyen los iones de calcio y magnesio presentes en el agua, reduciendo por lo tanto su dureza. Para la reducción de los sólidos disueltos totales, es necesario utilizar tanto resinas de intercambio aniónico como resinas de intercambio catiónico.

Primeramente, el agua residual se hace circular a través de un intercambiador de cationes, en el que los iones positivos se sustituyen por iones hidrógeno. El efluente del intercambio catiónico se hace pasar por una resina de intercambio iónico, proceso en el que los iones aniónicos se sustituyen por iones hidroxilo. Por lo tanto, los sólidos en suspensión se sustituyen por iones hidrógeno y hidroxilo que reaccionan para formar moléculas de agua.

Los intercambiadores de iones suelen ser del tipo columna con flujo descendente. El agua residual entra por la parte superior de la columna sometida a una cierta presión, circula en sentido descendente a través del lecho de resina, y se extrae por la parte inferior. Cuando se agota la capacidad de la resina, la columna se somete a un ciclo de lavado a contracorriente para eliminar los sólidos atrapados y proceder a la posterior regeneración. La resina de intercambio catiónico se regenera con un ácido fuerte, como el sulfúrico o el hidroc্লórico. El regenerador de resinas aniónicas más comúnmente empleado es el hidróxido de sodio.

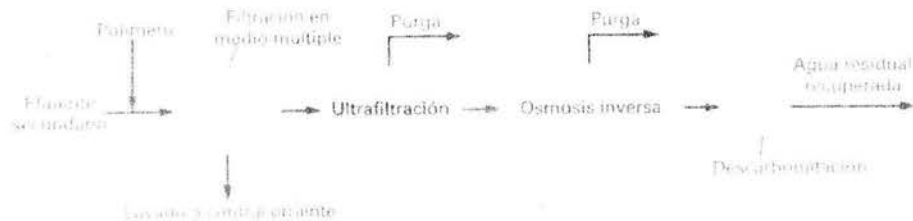
Una de las desventajas son las elevadas concentraciones de sólidos en suspensión en el agua que entra en las unidades de proceso ya que pueden taponar los lechos de intercambio iónico, provocando grandes pérdidas de carga y bajos rendimientos. La obturación de las resinas puede ser producida por la presencia de materia orgánica residual en los efluentes de tratamientos biológicos.

No todos los iones disueltos se eliminan por igual; cada resina de intercambio iónico se caracteriza por una serie selectiva, y algunos de los iones del final de la serie tan solo se eliminan parcialmente.

Ultrafiltración

Los sistemas de ultrafiltración son operaciones que emplean membranas porosas para la eliminación de materia disuelta y coloidal. Estos sistemas se diferencian de los sistemas de osmosis inversa en que requieren presiones relativamente bajas, normalmente inferiores a 1.034 kN/m^2 . La ultrafiltración se suele emplear para eliminar materia coloidal y moléculas de gran tamaño con pesos moleculares superiores a 5000.

Las aplicaciones de la ultrafiltración incluyen la eliminación de aceites de cursos de agua, y la eliminación de la turbiedad provocada por los coloides causantes de color. Las investigaciones recientes indican que los efluentes de la ultrafiltración que utiliza elementos de estructura espiral son adecuados como fuente alimentadora de la ósmosis inversa. La figura 3.14 muestra el diagrama de flujo de los procesos de ultrafiltración.



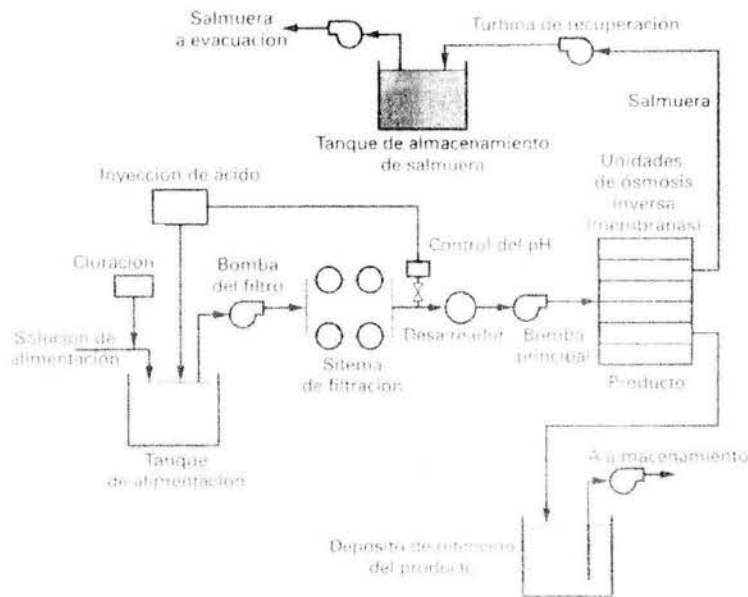
Fuente: Ingeniería de aguas residuales, Metcalf y Eddy 1998.

Figura 3.14 Diagrama de flujo de los procesos de ultrafiltración.

Ósmosis inversa

La ósmosis inversa es un proceso en el que se separa el agua de las sales disueltas en disolución mediante la filtración a través de una membrana semipermeable a una presión superior a la presión osmótica provocada por las sales disueltas en el agua residual. La ósmosis inversa presenta la ventaja de eliminar la materia orgánica disuelta que no es susceptible de ser eliminada con otras técnicas de desmineralización. Las principales limitaciones de la ósmosis inversa son su elevado costo y la escasa experiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas. La figura 3.15 muestra un diagrama de flujo típico del proceso de ósmosis inversa.

Los componentes principales de una unidad de ósmosis inversa son la membrana, una estructura de soporte de la membrana, un recipiente contenedor, y una bomba de alta presión. Como materiales de membrana se han utilizado el acetato de celulosa y el nylon. Se han empleado cuatro sistemas de soporte de la membrana: tejido espiral, tubular y de fibra hueca. La presencia de material coloidal en el efluente puede provocar fallos en las membranas de las unidades de ósmosis inversa. Suele ser necesario hacer un pretratamiento del efluente secundario por decantación química y filtración con medio múltiple o por filtración con medio múltiple y ultrafiltración. Además, en ocasiones es necesario eliminar el hierro y el manganeso para reducir el potencial de aparición de incrustaciones carbonatadas. El pH del efluente se deberá limitar al intervalo comprendido entre 4 y 7.5 para evitar la formación de incrustaciones carbonatadas.



Fuente: Ingeniería de aguas residuales, Metcalf y Eddy 1998.

Figura 3.15 Diagrama de flujo típico del proceso de ósmosis inversa.

Electrodiálisis

En el proceso de electrodiálisis los componentes iónicos de una solución se separan mediante el uso de membranas semipermeables selectivas de iones. La aplicación de un potencial eléctrico entre los dos electrodos origina una corriente eléctrica que atraviesa la solución, la cual, a su vez, da lugar a una migración de cationes hacia el electrodo negativo y de aniones hacia el electrodo positivo. Dada la disposición alternada de las membranas permeables a los cationes y aniones, se forman células de sales concentradas y diluidas.

El agua residual se bombea a través de las membranas que están separadas por unos espaciadores y dispuestas en pilas. El agua residual se retiene generalmente durante 10 a 20 segundos aproximadamente en cada pila individual o etapa. Las eliminaciones de sólidos disueltos varía con: la temperatura del agua residual, la corriente eléctrica que se hace circular, el tipo y cantidad de iones presentes, la selectividad de la membrana, el potencial de producir obturaciones e incrustaciones del agua residual, los caudales de agua residual, y el número y configuración de las etapas.

Este proceso puede funcionar tanto en modo continuo como en discontinuo. Las unidades se pueden disponer en paralelo para obtener la capacidad hidráulica necesaria o bien en serie para alcanzar el grado de desmineralización deseado.

Los problemas relacionados con el proceso de la electrodiálisis para la renovación del agua residual incluyen la precipitación química de sales de poca solubilidad en la superficie de la membrana y la obstrucción de esta por la materia coloidal residual de los efluentes de las plantas de tratamiento.

Para reducir la obturación de las membranas, se tiene que llevar a cabo un pretratamiento con carbón activado, posiblemente precedido por precipitación química y alguna forma de filtración en medio múltiple.

CAPITULO IV

DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS AVANZADOS EN LA PLANTA PILOTO “CERRO DE LA ESTRELLA” DEL D.F.

Capítulo IV

Descripción de los procesos avanzados en la planta piloto “Cerro de la Estrella” del D. F.

IV. 1 Justificación de la planta

La experiencia práctica en el tratamiento avanzado de aguas residuales en nuestro país es relativamente escasa; por lo que, debido a la importancia que día a día va cobrando este rubro, ha sido necesario realizar investigaciones acordes a las características del agua residual producidas por el sector industrial, comercial, de servicios, domésticos, etc., de la gran urbe de la Ciudad de México. Siendo una preocupación pues la sobreexplotación de los acuíferos del Valle de México y los altos costos de importación de agua potable de otras cuencas, se confirma la necesidad de tener presente el que las aguas residuales sean un recurso valioso, el cual puede ser reutilizado, previo tratamiento, en diferentes actividades del hombre.

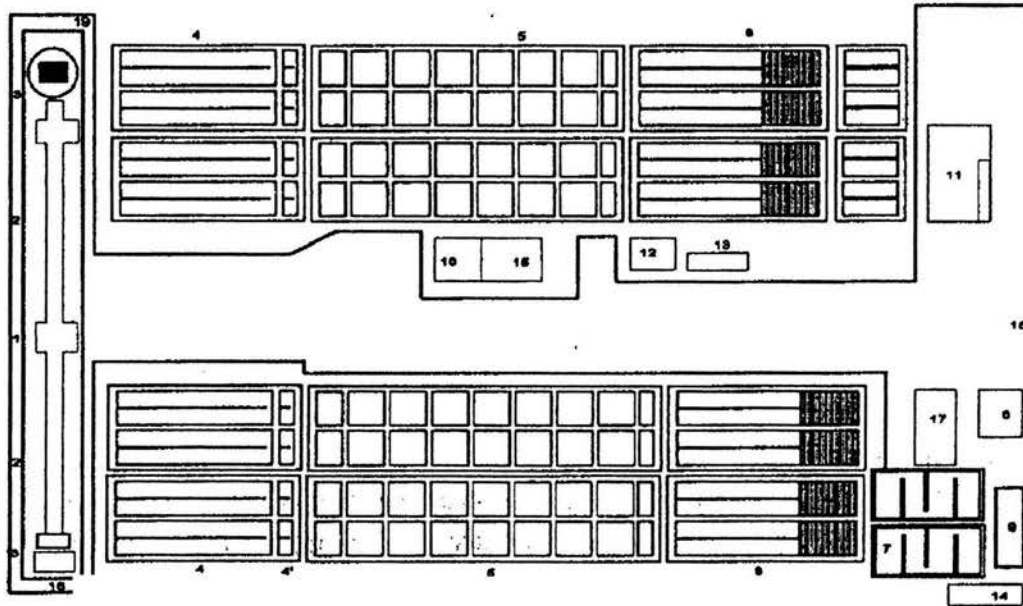
Por estas razones, el Departamento del Distrito Federal a través de la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (D.G.C.O.H.), construyó en 1984 los Dispositivos Experimentales de Tratamiento Avanzado de Aguas Residuales, en terrenos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Cerro de la Estrella”

IV. 2 Descripción de la planta

La planta de tratamiento Cerro de la Estrella inició su operación en el año de 1971, produciendo un caudal de nivel secundario de 2 000 litros por segundo que se usaba para el riego agrícola en Tlahúac y Xochimilco, así como para los canales de la zona turística.

Más tarde, la necesidad de agua residual tratada se diversifica y aumenta. Los sectores industrial y comercial se incorporan al uso del agua residual tratada. Asimismo, la creación del programa de rescate de las zonas lacustres de Mixquic, Tlahúac y Xochimilco, en el año de 1989, se basa fundamentalmente en la aportación de caudales adicionales de agua tratada de mejor calidad, por lo que las autoridades del Departamento del Distrito Federal a través de la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, construyen los módulos 3 y 4, así como las unidades de filtración para alcanzar una producción de 4 000 litros por segundo de agua a nivel terciario. La Figura 4.1 muestra el tren de procesos de la Planta Cerro de la Estrella

El tratamiento terciario en la planta Cerro de la Estrella, abrió la posibilidad de llevar a cabo la recarga artificial del acuífero con agua de calidad apropiada para este fin. Esta actividad se viene realizando con éxito desde el año de 1992, y durante 1994 inicia la recarga artificial del acuífero con 1 000 litros por segundo, a través de lagunas de infiltración, en las estribaciones de la sierra de Santa Catarina.



1	CAJA DE LLEGADA	2	CANAL PARSHALL	3	CAJA PARTIDORA
4	SEDIMENTADOR PRIMARIO	4'	ESPUMADOR	5	AIREADOR
6	SEDIMENTADOR SECUNDARIO	7	DESINFECCIÓN	8	SALA DE CLORACIÓN
9	CARCAMO DE BOMBEO	10	SALA DE SOPLADORES	11	OFICINAS Y LABORATORIO
12	CUARTO DE CONTROL	13	SUBESTACIÓN	14	CONTROL DE BOMBAS
15	SALA DE SOPLADORES (U-3)	16	TANQUE DE CLORO	17	DETAAR
18	CASETA DE VIGILANCIA	19	DET B		

Fuente: Sistemas de Aguas del D. F., Rodrigo Figueroa 1998.

Figura 4.1 Tren de procesos de la Planta Cerro de la Estrella

IV.3 Tren de procesos

Las aguas residuales que recibe la planta de tratamiento Cerro de la Estrella, provienen de un alcantarillado combinado que recolecta aguas de tipo doméstico (en su mayoría), aguas pluviales y una proporción mínima de aguas industriales, las cuales son enviadas a la planta desde la estación de bombeo Aculco situada en el cruce de las avenidas del río Churubusco y de Apatlaco en la delegación Iztacalco, de donde se conducen hasta la planta de tratamiento, a través de una tubería de 1.83 metros de diámetro y una longitud de 8 mil metros.

El tratamiento de las aguas residuales en la planta Cerro de la Estrella se efectúa mediante el proceso biológico convencional de lodos activados y filtración con arena, grava, y antracita, más desinfección con cloro.

Pretratamiento

El agua residual que recibe la planta Cerro de la Estrella, proviene del colector Apatlaco. Es captada en un cárcamo ubicado en la estación de bombeo Aculco, donde se eliminan los sólidos de gran tamaño por medio de un sistema de rejillas, para proteger los equipos de bombeo. En esta planta se encuentran instaladas 3 bombas con capacidad de 1 000 l/s cada una las que son accionadas por 3 motores eléctricos verticales de 500 HP cada uno.

El agua se bombea y es conducida hasta la caja de llegada de la planta, donde desemboca en dos canales abiertos. La velocidad del influente se disminuye mediante un salto hidráulico. En cada canal se encuentra un medidor Parshall para determinar el caudal. Al final de los canales se ubica una caja que conduce el agua hacia los sedimentadores primarios.

Sedimentación primaria

Las aguas que llegan a la planta reciben un tratamiento primario que consiste en la decantación por gravedad de una parte de la materia en suspensión y el retiro de grasas, aceites y natas sobrenadantes. Para esto se cuenta con estructuras que contienen un sistema de recolección de sólidos, constituidos por rastras, que se mueven lentamente para concentrar el material sedimentado en el fondo de los tanques, hacia tolvas ubicadas al inicio para su posterior extracción. También las rastras recogen el sobrenadante hacia los desnatadores que se encuentran en el extremo final. El efluente del sedimentador primario se conduce por medio de canaletas, hasta el tanque de aireación, para iniciar el tratamiento secundario.

Tratamiento secundario

Este proceso se integra por dos unidades. En la primera, se lleva a cabo el desdoblamiento de la materia orgánica, utilizando la acción biológica de la naturaleza en un medio aerobio, es decir, el tanque de aireación recibe el agua presedimentada, bacterias y protozoarios (que realizan la tarea más importante al desintegrar la materia orgánica), lodos de los sedimentadores para mantener en equilibrio el proceso y aire disperso en el fondo del tanque para garantizar el oxígeno necesario para la reproducción y desarrollo de los microorganismos. La segunda unidad, sedimentador secundario, recibe el agua del aireador con la materia digerida y microorganismos que se precipitan y concentran, mediante rastras, a tolvas para recircularlos nuevamente al aireador o enviarla al drenaje.

Tratamiento terciario

El efluente del sedimentador secundario se somete a un proceso adicional para obtener agua de mejor calidad, creando el tratamiento terciario, que consiste en hacerla circular a través de filtros empacados con grava, arena y antracita.

Desinfección

El último proceso al que se somete el agua; consiste en pasarla por un tanque de contacto de cloro, que está provisto de una serie de mamparas cuya función es garantizar el tiempo necesario para que se lleve a cabo la destrucción de microorganismos patógenos y materia orgánica remanente en el agua. Al final de la desinfección pasa a un cárcamo de donde se bombea hasta los diferentes usuarios del sistema tratamiento y reúso.

Dispositivo experimental de tratamiento

La planta de tratamiento de aguas residuales de Cerro de la Estrella cuenta con instalaciones para desarrollar, evaluar y probar tecnologías de tratamiento avanzado del aguas residuales (dispositivo experimental de tratamiento avanzado DETAAR) en las cuales la DGCOH decidió estudiar experimentalmente las posibilidades de dar tratamiento avanzado al efluente secundario de la planta de Cerro de la Estrella con miras a complementar el suministro de agua a la ciudad de México.

Entre los usos potenciales considerados por la DGCOH para el agua efluente de la planta de tratamiento avanzado se cuentan los siguientes: recarga de acuíferos con inyección directa en los pozos de los acuíferos sobre-explotados de la zona sur-oriente, reúso industrial en enfriamiento, reúso industrial para procesos y renovación de agua para una mezcla eventual con fuentes actuales de suministro de agua potable.

La planta piloto cuenta con nueve procesos unitarios de tratamiento que pueden ser interconectados en diferentes secuencias de procesamiento con las cuales se puede simular diferentes alternativas para alcanzar un mismo objetivo de calidad, estos procesos son: espumación, tratamiento químico, desorción del amoníaco, recarbonatación, filtración, desorción con carbón activado, ozonación, ósmosis inversa y cloración.

El proceso de espumación tiene como objetivo la remoción de sustancias superficialmente activas, específicamente los detergentes. El proceso se localizará después de la sedimentación primaria y antes del tanque de aireación.

El tratamiento químico es un proceso unitario de acondicionamiento de calidad frecuentemente empleado cuando se precisa controlar la turbiedad, el color, las concentraciones de compuestos como el fósforo, metales pesados y del material orgánico complejo.

La operación unitaria asociada a la remoción del amoníaco del agua se denomina desorción, consiste en separar un soluto gaseoso (amoníaco) contenido en una mezcla líquida (agua), poniendo ésta en contacto con un gas inerte (aire).

El proceso de recarbonatación tiene como objetivo la estabilización de los carbonatos por medio de la adición de bióxido de carbono para evitar las incrustaciones en las tuberías o instalaciones de proceso.

La filtración es un proceso unitario básico en el tratamiento de agua para usos diversos, consiste en pasarla a través de un lecho poroso, para retener la materia en suspensión o en estado coloidal.

El proceso de adsorción con carbón activado es valioso para la eliminación del sabor, olor, y color de las aguas, así como para la remoción de compuestos refractarios al tratamiento biológico de aguas residuales.

El ozono es un oxidante de amplio espectro, ya que oxida compuestos orgánicos, inorgánicos y biológicos, por lo que también se emplea como desinfectante, además de facilitar la remoción de compuestos solubles ya que oxida la mayor parte de elementos y compuestos a su estado mas elevado de oxidación como los orgánicos refractarios (detergentes, pesticidas, fenoles, etc.).

En forma general, la ósmosis inversa es un proceso natural que consiste en el paso de un líquido de menor concentración a otro de mayor concentración a través de una membrana semipermeable, la cual es de los componentes de la solución, usualmente el solvente puede pasar a través de ella y no los sólidos disueltos. La dirección del flujo del solvente es determinada por el potencial químico de la solución, el cual está en función de la temperatura, la presión y la concentración de los sólidos disueltos.

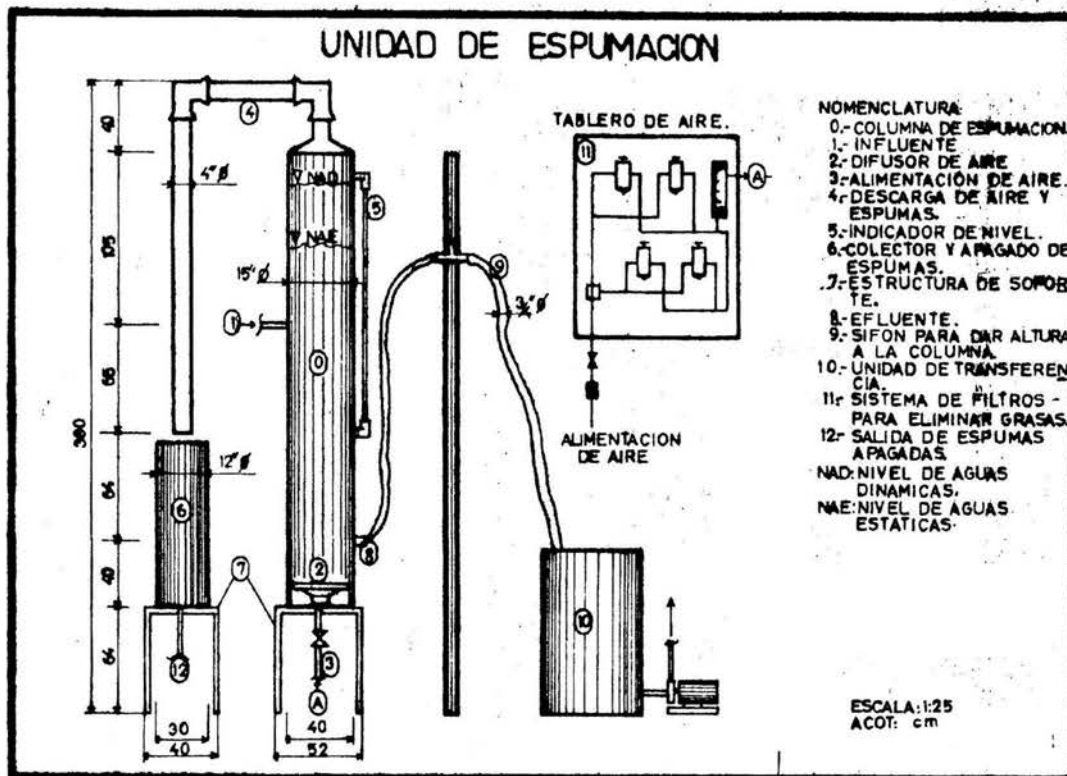
El último proceso al que se somete el agua, consiste en pasarla por un tanque de contacto de cloro, que esta provisto de una serie de mamparas cuya función es garantizar el tiempo necesario para que se lleve a cabo la destrucción de microorganismos patógenos y materia orgánica remanente en el agua.

IV. 3.1 Espumación

El proceso de espumación tiene como objetivo la remoción de sustancias superficialmente activas, específicamente los detergentes. El uso de detergentes duros en México se detecta mediante la técnica analítica "Sustancias Activas al Azul de Metileno" (S.A.A.M.).

Las altas concentraciones de detergentes en las plantas a nivel secundario dan aspecto antiestético al agua y crean problemas en los cuerpos receptores, además de reducir la eficiencia de los procesos biológicos. La unidad de espumación en el tratamiento avanzado tiene como objetivo eliminar los detergentes de las descargas domésticas e industriales.

Asociados a los detergentes se tienen cantidades apreciables de fosfatos que contribuyen a contaminar las aguas residuales. También mediante la espumación se reducen cantidades pequeñas de materia orgánica.



Fuente: Sistemas de Aguas del D. F., Rodrigo Figueroa 1998.

Figura 4.2 Unidad de espumación del dispositivo experimental de tratamiento avanzado de aguas residuales de la planta Cerro de la Estrella.

El proceso consiste en la inyección de aire mediante difusión, ya sea burbuja gruesa o fina. Para burbujear el agua y eliminar las espumas aprovechando la presión de inyección de aire para arrastrarlas al exterior. La Figura 4.2 muestra la unidad de espumación del dispositivo experimental de tratamiento avanzado de aguas residuales de la planta Cerro de la Estrella.

La unidad consta de una columna circular de 40.6 cm de diámetro y una altura de 2.5 m. La alimentación del agua se realiza por la parte superior sumergida en el nivel estático del agua; la inyección del aire, por la parte inferior con un difusor para garantizar un tamaño adecuado de la burbuja; el agua tratada sale por la parte lateral del fondo de la columna; la eliminación de los detergentes espumados se lleva a cabo por la parte superior de la columna al reducirse la sección.

Para la inyección del aire se tiene un regulador de presión, un filtro para evitar contaminar las aguas con aceite proveniente del aire del compresor y un rotámetro para la medición del caudal de aire.

Los parámetros que controlan el proceso de espumación son: la eficiencia de remoción de detergentes (S.A.A.M.), la relación aire / agua, el tiempo de retención; en forma indirecta la altura de la columna de agua y el tamaño de la burbuja.

IV. 3.2 Tratamiento químico

Las aguas residuales son una fuente de aportación de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo que en cantidades excesivas provoca efectos en los cuerpos receptores (lagos, ríos, estanques, etc.) como es el crecimiento de plantas acuáticas y el contribuir a la eutroficación, que en la mayoría de los casos limita el aprovechamiento de los recursos de lagos y embalses. El tratamiento avanzado se utiliza para remover contaminantes que se encuentran presentes en las aguas residuales como partículas disueltas coloidales o suspendidas dependiendo del tamaño de la partícula; pues algunas son muy pequeñas no siendo posible sedimentarlas, por lo que surge la alternativa de aglutinar y separarlas por gravedad.

El tratamiento químico consta de tres etapas para la remoción de contaminantes:

Coagulación

Consiste en la adición de un agente químico a una dispersión coloidal, la cual resulta de desestabilizar las partículas disminuyendo la carga eléctrica de las partículas coloidales y formando hidróxidos complejos, es decir aquí se utilizan fuerzas electrostáticas o inter iónicas.

Uno de los objetivos principales del tratamiento químico es disminuir los compuestos de fósforo, determinar dosis mínimas de productos químicos, establecer las condiciones de operación de máxima economía, obtener la mayor eficiencia de remoción de fosfatos ($P-PO_4$); de sólidos suspendidos (S.S.T.); materia orgánica como (D.Q.O.) soluble; de turbiedad, color y algunos metales pesados como el hierro y el manganeso.

La remoción del fósforo como nutriente es una importante operación. El fósforo se encuentra en tres formas: ortofosfatos, polifosfatos y fósforo orgánico.

La amplia gama de reactivos químicos a usar depende de la economía y de su efectividad; los más empleados son: cloruro férrico ($FeCl_3$); cal química (CaO); alumbre ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$) o sulfato de aluminio; combinaciones de hierro (Fe^{3+}) – cal (CaO); sulfato de aluminio (Al^{3+})- ($Al(CaO)$); polímeros catiónicos y aniónicos, algunos no iónicos, arcillas y otras ayudas.

Coagulación con cal

La cal reacciona con la alcalinidad de bicarbonatos, o compuestos ortofosfóricos para formar los precipitados insolubles de carbonato de calcio o hidroxapatita.

El fosfato de calcio o hidroxapatita es un precipitado cristalino de composición variable. La solubilidad del fosfato de calcio baja al incrementarse el pH, incrementándose así la remoción. La dosis de cal para alcanzar una remoción de fosfatos dada la turbidez está en función de la alcalinidad del agua.

A un pH de 9.5, la mayoría del fósforo se precipita como hidroxapatita, esto se acompaña por la alta turbidez que es común con precipitados de calcio y por partículas coloidales dispersas de compuestos de calcio.

A un pH mayor de 9.5, los compuestos de magnesio tienden a producir un efluente altamente clarificado, el hidróxido de magnesio que se forma es de naturaleza gelatinosa y dificulta su disposición final, la presencia de magnesio afecta la calidad del efluente y el manejo del lodo específico.

Coagulación con compuestos de Aluminio

Los iones aluminio entran en una serie de reacciones hidrolíticas con el agua para formar especies multivalentemente cargadas. Estas especies tienen un rango de compuesto positivo a bajo pH, negativos a alto pH.

Los fosfatos se remueven por acomplejamiento con el aluminio o por absorción sobre flocúlos de hidróxido de aluminio. Si las reacciones de hidrólisis no se efectúan, se puede requerir aproximadamente de 0.87 kg de aluminio por kg de fósforo removido. El sulfato de aluminio es la sal más común usada para la coagulación de las aguas residuales.

Coagulación con Fierro

Al igual que el aluminio las sales de fierro, particularmente el cloruro férrico, presenta reacciones similares utilizándose aproximadamente 1.8 kg de fierro por cada kg de fósforo removido, más aproximadamente 10 mg/l de fierro, para formación de hidróxido.

Mezcla rápida

Es un proceso unitario en el cual al agregar agentes químicos al agua se reducen las fuerzas que mantienen separadas las partículas en suspensión, por lo cual se desestabilizan las partículas suspendidas y la precipitación de las disueltas siendo importante balancear la rapidez de dispersión y los tiempos de contacto de los agentes químicos con las partículas del agua, pues un mal mezclado propicia zonas pobres y pH irregulares.

Los tipos de mezcladores existentes son dos: hidráulicos y mecánicos. Los hidráulicos pueden ser de un salto hidráulico en un parshall, en un canal con sección reducida y en un vertedor; algunas consideraciones de diseño para tener un mezclado rápido y eficiente son: que el régimen de flujo sea turbulento, para el cual se puede medir por el número de Froude considerándose entre 4.5 y 9.0; el tiempo de mezclado sea menor de 1 segundo, la potencia disipada en el cambio de régimen sea de 3.5 a 7.0 H.P. por cada m^3/s de capacidad y finalmente el gradiente de velocidad sea de 300 a $1500 s^{-1}$.

Los mecánicos se llevan a cabo con paletas tipo propela, con paletas planas y con propelas insertadas en un conducto cerrado como en una tubería. Los parámetros que rigen el mezclado son el número de Reynold, el cual debe tener un flujo turbulento con un valor mayor a 100,000 unidades; el tiempo de contacto de los reactivos con el seno del líquido de 30 a 120 s y que el gradiente de velocidad se encuentre entre 300 y $1500 s^{-1}$, en el mezclado rápido el gradiente de velocidad es una medida directa de la velocidad de coalición entre partículas y resultado del movimiento del fluido en una disipación de energía provocada por la velocidad de la partícula y la fuerza de atracción.

Algunas otras consideraciones de diseño son el evitar esfuerzos cortantes que formen vórtices los cuales reducen el efecto de la coagulación para esto es necesario colocar deflectores en tanques circulares; en los tanques rectangulares los vértices funcionan como deflectores. También se recomienda que la colocación de la flecha sea vertical, que el impulsor se coloque a un diámetro de la misma del fondo del tanque y que su diámetro propiamente no exceda $1/3$ el diámetro del mezclado.

Floculación

Implica la adsorción y la formación de enlaces partícula-partícula formando así conglomerados (flóculos), los cuales entrapan los contaminantes formando complejos insolubles precipitándolos en la solución y separándolos por gravedad (sedimentación, flotación o filtración).

Después de la coagulación le sigue la floculación que consiste en la aglomeración de las partículas inducidas por su movimiento relativo, es decir ya dispersados los coagulantes es necesario aglutinarlos mediante una agitación lenta, ya que esto induce al crecimiento de las partículas con peso específico superior al del agua y es aquí donde se compactan los flóculos que se formaron produciendo una concentración volumétrica baja. Los movimientos producidos entre las moléculas se deben a su energía térmica, llamada movimiento del agua inducido por energía hidráulica o mecánica. Dentro de los floculadores generalmente se dividen en dos: hidráulicos y mecánicos.

Los floculadores hidráulicos son dispositivos que utilizan la energía hidráulica disipada por el flujo del agua a través de un conducto como un canal o un tanque y se agrupan en floculadores de pantalla de flujo horizontal o de flujo vertical. En el primero el movimiento es de vaivén; y en el segundo la corriente circula en flujo ascendente y descendente, existen otros tipos como los helicoidales en los cuales la energía hidráulica es generada para usar movimiento helicoidal inducido por su ingreso tangencial en la cámara de floculación. Algunas consideraciones de diseño son: velocidad igual a 0.40 m/s aguas arriba del floculador, velocidad igual a 0.15 m/s a la salida del floculador, la distancia de la primera pantalla sea igual a 1.5 veces el espaciamiento entre pantallas. Aquí la velocidad debe estar entre 0.30 y 0.10 m/s y por último el tiempo de retención hidráulico esté entre 20 y 40 minutos.

Los floculadores mecánicos a diferencia de los hidráulicos utilizan energía externa, que provoca movimiento vertical y horizontal mediante una potencia aplicada al agua por una paleta de área "A" desplazándose a una velocidad "V" con respecto a una distancia "r" de su eje y por una unidad de volumen del tanque de floculación "V", y por una fuerza que se interpone de arrastre C_d .

La unidad de floculación tiene un volumen de 0.24 m³ en tres cámaras cuyo tiempo de retención es de 24 minutos para un caudal de 0.51 l/s. Los gradientes de velocidad van en forma decreciente $60,40$ y 20 s⁻¹ en promedio para evitar el rompimiento de los flóculos formados y aglutinados. Cada cámara, deberá estar equipada con cuatro impulsores de paletas con un montaje horizontal y con su eje de rotación perpendicular al flujo.

Cada impulsor se compone de cuatro paletas de 2.7 m de largo por 0.25 m de ancho, con una distancia al centro de la flecha al centro de la primera paleta de 1.825 m y 1.4 al de la segunda paleta. La velocidad relativa de las primeras paletas es de 0.764, 0.573 y 0.382 m/s, y 0.586, 0.440 y 0.293 m/s para las segundas paletas con los impulsores girando a 4, 3 y 2 rpm para la primera, segunda y tercera cámaras respectivamente, se recomienda que los equipos motrices se especifiquen para operar en un rango de velocidades de 1 a 5 rpm para permitir una mayor flexibilidad de operación, las velocidades de las paletas se encuentran entre los rangos recomendados de 0.3 a 0.9 m/s por lo que se considera un diseño aceptable. Con lo anterior se busca una variación de un 20 al 40% entre compartimentos, la agitación se lleva a cabo mediante un sistema mecánico de engranes para reducir la velocidad angular en cada cámara.

Clarificación

Es un proceso en el cual se separan y precipitan los flóculos del agua mediante sedimentadores. Finalmente al producto del precipitado se le dispone, ya sea para su tratamiento o como relleno sanitario.

Las aguas residuales contienen partículas sólidas y coloidales en suspensión, de las cuales algunas son inestables, debidas a su tamaño, densidad y características. Algunas partículas se someten a fuerzas gravitacionales y sedimentan fácilmente, otras se someten a fuerzas electrostáticas y microhidrodinámicas, las cuales son estables, otras son termodinámicamente inestables pero con pequeña velocidad de agregación respecto a la suspensión y por lo tanto pueden flocularse o coagularse.

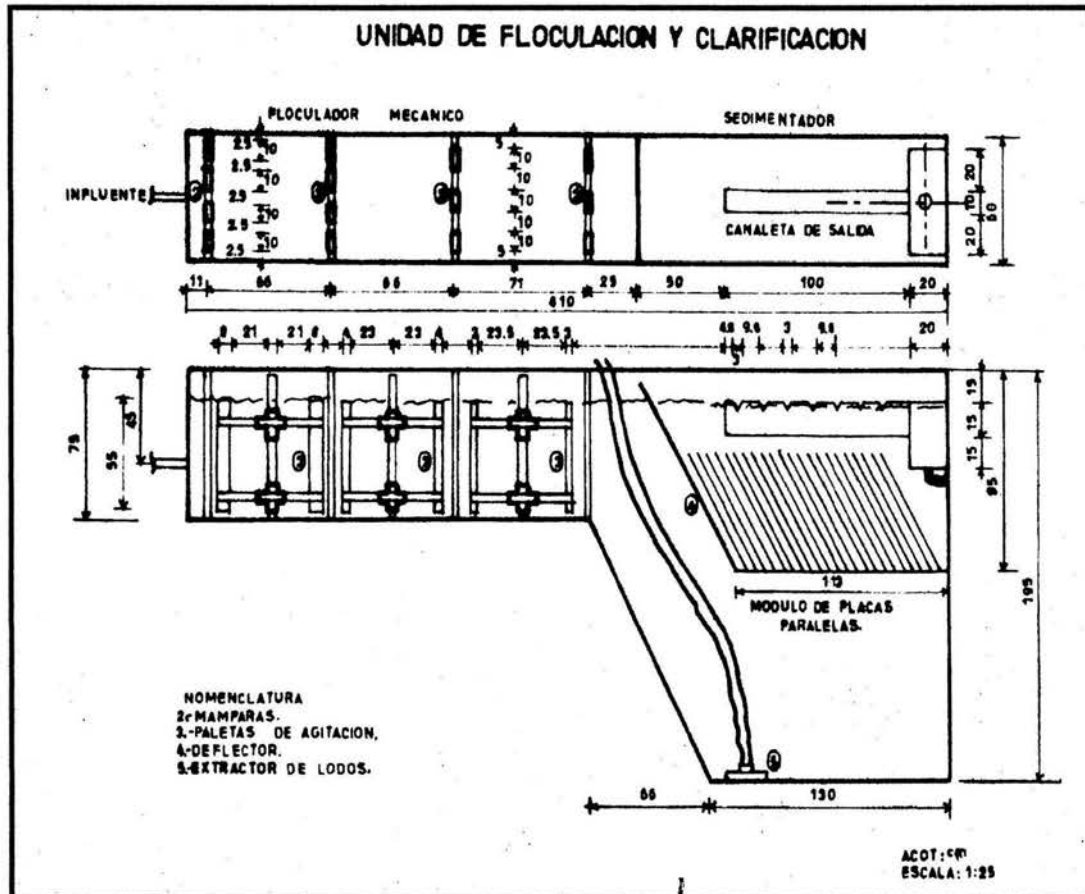
La separación por sedimentación gravitacional es una técnica efectiva que depende de varios factores: la concentración de la suspensión, las características de las partículas.

La clarificación es la operación unitaria en la cual se utiliza la fuerza de gravedad para separar las partículas con peso específico superior al del agua. La agregación de partículas para formar flóculos de mayor tamaño esta en función de la concentración de las partículas, su peso, el tamaño y la viscosidad del líquido, sin embargo no proporciona un método cuantitativo para ser aplicado al diseño de equipo, por esta razón es conveniente analizar el funcionamiento del clarificador considerándolo como un tanque de sedimentación ideal utilizando el modelo de sedimentación de partículas discretas.

Un tanque de sedimentación continuo esta dividido en cuatro zonas: una zona de entrada en la que el flujo y la materia suspendida se dispersan a través de la sección transversal en ángulo recto al eje longitudinal; una zona de sedimentación, en donde las partículas en suspensión se sedimentan dentro del agua sujeta a flujo; una zona de fondo, en donde los sólidos removidos se acumulan, y se extraen de ahí como flujo inferior y por último la zona de salida, en la que el flujo y las partículas en suspensión remanentes se llevan a llevar al conducto del efluente.

El diseño del clarificador de la planta de Cerro de la Estrella, se realizó basándose en el principio de la máxima carga hidráulica superficial la cual es numéricamente igual al flujo entre el área plana longitudinal del clarificador, pero la cual físicamente representa la velocidad de sedimentación de la partícula que se separa 100% a través de una profundidad de la zona de sedimentación, en el tiempo de retención, esto significa que todas las partículas con velocidad de sedimentación se separan, y las partículas con velocidad de sedimentación menores serán removidas.

Algunos factores que influyen en la eficiencia de la sedimentación son: corrientes inducidas por la inercia del fluido de alimentación, gradientes de velocidad y temperatura; así la pérdida de sólidos puede provenir de un arrastre del fondo o de la carga en vertedor pues al excederse tiende a arrastrar los sólidos sedimentados. Otros factores que hay que cuidar son la estructura de entrada para distribuir uniformemente la suspensión de alimentación y evitar turbulencia, y la estructura de salida para evitar cortos circuitos o resuspensión de lodos. La Figura 4.3 muestra la unidad de floculación y clarificación del dispositivo experimental de tratamiento avanzado de aguas residuales de la planta Cerro de la Estrella.



Fuente: Sistemas de Aguas del D. F., Rodrigo Figueroa 1998.

Figura 4.3 Unidad de floculación y clarificación del dispositivo experimental de tratamiento avanzado de aguas residuales de la planta Cerro de la Estrella.

IV. 3.3 Desorción del amoniaco

La operación unitaria asociada a la remoción del amoniaco del agua se denomina desorción, consiste en separar un soluto gaseoso (amoniaco) contenido en una mezcla líquida (agua), poniendo ésta en contacto con un gas inerte (aire).

El aire es arrastrado a contracorriente con el agua renovada a través de torres empacadas con material sólido irregular a fin de obtener la velocidad máxima de desorción.

Desde el punto de vista económico es aún más conveniente si previamente se trata el influente con cal (coagulación) y se clarifica, ya que simultáneamente se precipita el fósforo, se remueven sólidos suspendidos y se eleva el pH, obteniéndose así beneficios adicionales. Además debido al arrastre físico por el aire extraído a contra corriente en las torres de desgasificación o desorción, se pueden extraer orgánicos purgables (hidrocarburos aromáticos y alifáticos halogenados), algunos plaguicidas y policlorobifenilos residuales.

En las aguas residuales municipales, una cantidad importante del nitrógeno presente se encuentra en forma amoniacal (NH_3), que dependiendo del pH y la temperatura puede estar ionizado o en forma molecular. Al aumentar el pH y la temperatura, aumenta la fracción de amoniaco molecular (NH_3). Los valores mínimos recomendables tanto económica como técnicamente son a pH 10 y temperatura entre 10 y 20°C para una remoción eficiente del amoniaco.

El sistema de remoción se basa en la transferencia del amoniaco gaseoso de la fase líquida a la atmósfera, por medio de un intercambio de gases; dicha transferencia sólo tiene lugar en función del amoniaco molecular, no del ionizado.

Por lo anterior se recomienda usar cal como coagulante en el tratamiento químico y aprovechar el pH alto, pasar por las columnas de remoción del amoniaco, antes de recarbonatar y filtrar las aguas residuales en proceso de acondicionamiento.

Las condiciones de equilibrio de concentración del amoniaco molecular en el agua y el aire se expresan por medio de la Ley de Henry, que expresa "La cantidad de un gas disuelto en un líquido a una temperatura determinada es directamente proporcional a la presión parcial del gas en el líquido" y se expresa matemáticamente por:

$$\chi = \frac{P}{H}$$

donde:

χ es la concentración del gas en el líquido
P es la presión parcial del gas sobre el líquido
H es el coeficiente de absorción (constante de Henry)

Los coeficientes de absorción o constantes de Henry son función del sistema gas - líquido y la temperatura del agua.

Cuanto mayor sea la presión parcial de un gas sobre un líquido, mayor cantidad de gas absorberá el líquido. A menor temperatura la capacidad del líquido para absorber gases aumenta, por el contrario con el aumento de temperatura el líquido disminuirá su capacidad para absorber gases. También la naturaleza de los líquidos es un factor importante, ya que unos son capaces de absorber más gas que otros.

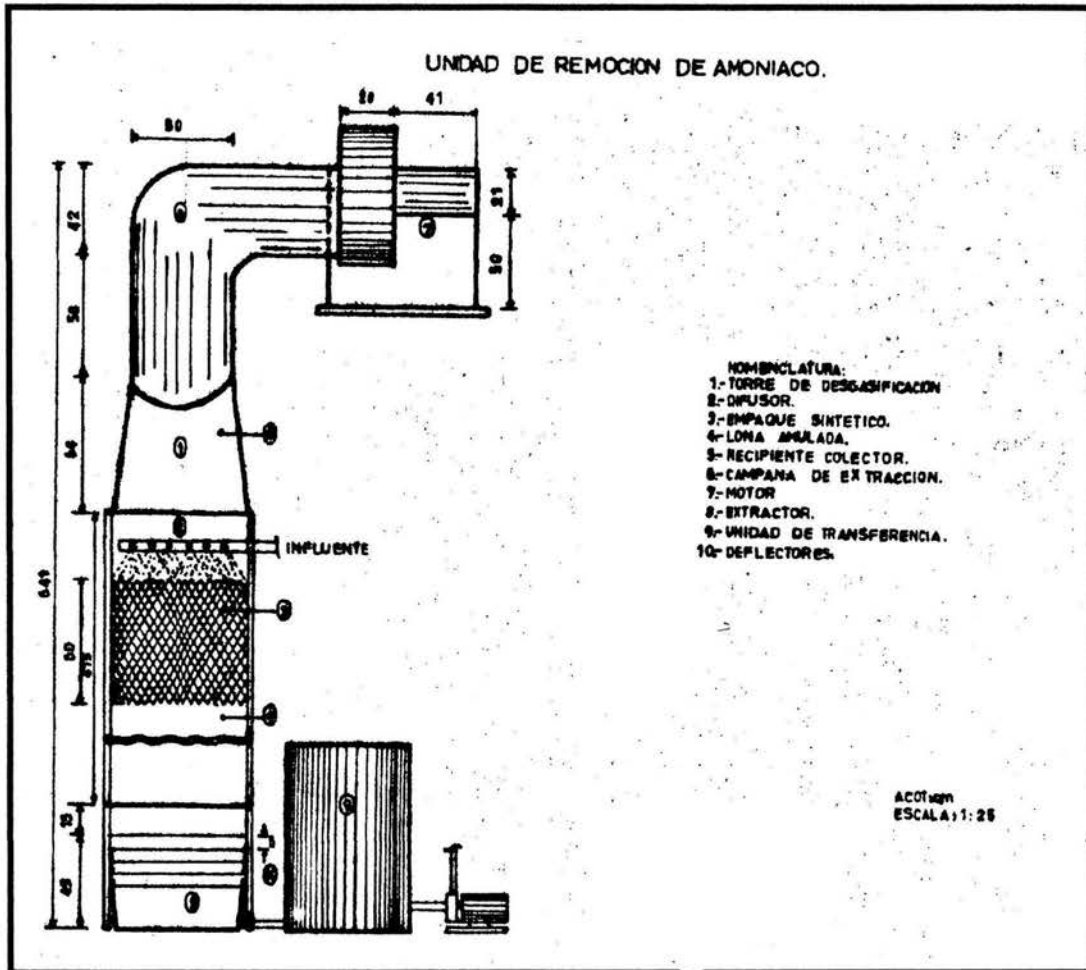
El aparato más frecuentemente utilizado en la desorción de gases y también en otras operaciones es la torre de relleno, que consta esencialmente de una columna o torre, prevista de una entrada y una cámara de distribución de gas en la parte inferior; salidas para el gas y el líquido en la cima y en el fondo respectivamente y un lecho de partículas sólidas inertes que rellenan la columna y que recibe el nombre de relleno. Las principales características de un relleno son: químicamente inertes para los fluidos que circulan en la torre, tener suficiente resistencia mecánica sin un peso excesivo, permitir un paso adecuado de ambas corrientes sin originar una retención de líquido o una caída de presión excesivas, proporcionar un buen contacto entre las fases y tener un costo relativamente bajo.

La mayoría de los rellenos se construyen con materiales baratos, inertes y relativamente ligeros como arcilla, porcelana, grafito o plástico; (también pueden hacerse metálicos de pared delgada, construidos en acero o aluminio). Mediante unidades de relleno de formas irregulares o huecas se consiguen grandes espacios vacíos, con una porosidad del 60% o superior, que permiten flujos elevados de las fases.

El contacto entre el líquido y el gas se realiza mediante películas descendentes sobre la superficie del relleno, estas tienden a hacerse más gruesas por zonas de forma que el líquido tiende a unirse formando pequeños arroyuelos que circulan a través de trayectorias localizadas en el lecho. Para bajas velocidades del líquido, una gran parte de la superficie del relleno puede estar seca o, mejor, recubierta de una película estancada de líquido. Este efecto se conoce como canalización.

En torres de tamaño moderado, la canalización se hace mínima cuando el diámetro de la torre es superior a ocho veces el diámetro del relleno. Si la relación entre el diámetro de la torre y el del relleno es inferior a 8:1, el líquido tiende a circular por el exterior del relleno y descender por la pared de la columna.

La altura de una torre de relleno está en función de la velocidad de desorción que, por otra parte depende de la velocidad de transferencia de materia a través de las fases de líquido y gas. La velocidad de desorción puede explicarse si el componente A, que es el soluto gaseoso que se transfiere desde el líquido al gas, tiene que pasar en serie a través de 2 resistencias difusionales correspondientes al gas y al líquido, la teoría de esta transferencia también recibe el nombre de teoría de la doble película o capa. En la remoción del amoníaco, esta cruza la interfase, mientras que el componente B que es el aire es inerte y estacionario con respecto a la interfase.



Fuente: Sistemas de Aguas del D. F., Rodrigo Figueroa 1998.

Figura 4.4 Unidad de remoción de amoniaco del dispositivo experimental de tratamiento avanzado de aguas residuales de la planta Cerro de la Estrella.

La unidad cuenta además, con un distribuidor tipo antena para la aspersion del agua en la parte superior, sistema de recolección de agua tratada y unidad de transferencia para su operación en serie y paralelo. La Figura 4.4 muestra la unidad de remoción de amoniaco del dispositivo experimental de tratamiento avanzado de aguas residuales de la planta Cerro de la Estrella.

Los parámetros que controlan el proceso de desorción del amoniaco son la remoción de nitrógeno amoniacal, la altura de empaque, la relación aire/agua, el pH y la temperatura del agua.

IV. 3.4 Recarbonatación

El efluente del proceso de tratamiento químico generalmente presenta un alto pH, (de 10 a 11.5), debido al uso de cal como coagulante primario, convirtiendo los bicarbonatos y carbonatos a hidróxidos, siendo conveniente la inyección de CO_2 al agua para disminuir el pH, siendo este el propósito básico de la Recarbonatación.

Cuando el proceso se lleva a cabo apropiadamente, se obtiene el equilibrio del carbonato de calcio en el agua evitándose problemas de depósitos e incrustaciones de tuberías, así como el acondicionamiento de las aguas para procesos posteriores como filtración y absorción en carbón activado; ya que de no reducir a un pH menor a 7, se afecta de manera negativa la eficiencia de los mismos.

La dureza presente en el agua generalmente se debe a la presencia de compuestos de calcio y magnesio, iones metálicos como estroncio, hierro y manganeso, combinados con iones divalentes (carbonatos y sulfatos), monovalentes (bicarbonatos, cloruros y nitratos). La dureza atribuible a los carbonatos de calcio y magnesio se conoce como dureza de carbonatos, mientras que la ocasionada por los sulfatos, cloruros o nitratos de calcio y magnesio recibe el nombre de dureza de no carbonatos, en algunas aguas esta medición puede incluir también alguna alcalinidad del sodio, si la alcalinidad total es superior a la dureza total.

En el proceso de Recarbonatación, el dióxido de carbono (CO_2) reacciona con hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), para formar carbonato de calcio (CaCO_3), el cual se precipita, realizándose posteriormente una post-recarbonatación, en la cual el carbonato de calcio (CaCO_3) se reduce a bicarbonato de calcio ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$).

La aplicación de algunos de los principios físico-químicos como la ley de acción de masas, la interpretación de los análisis del agua y de los equilibrios del carbonato, permitieron desarrollar el índice de saturación del carbonato de calcio (índice de Langelier). Este índice relaciona el pH del agua analizada con el pHs que es el pH de saturación para las condiciones de dureza de calcio y la alcalinidad de bicarbonatos del agua, por lo que puede expresarse como:

$$\text{pH} = \text{pH}_s = \log(k_s/k_2) - \log(\text{Ca}^{2+}) - \log(\text{HCO}_3^-)$$

Donde

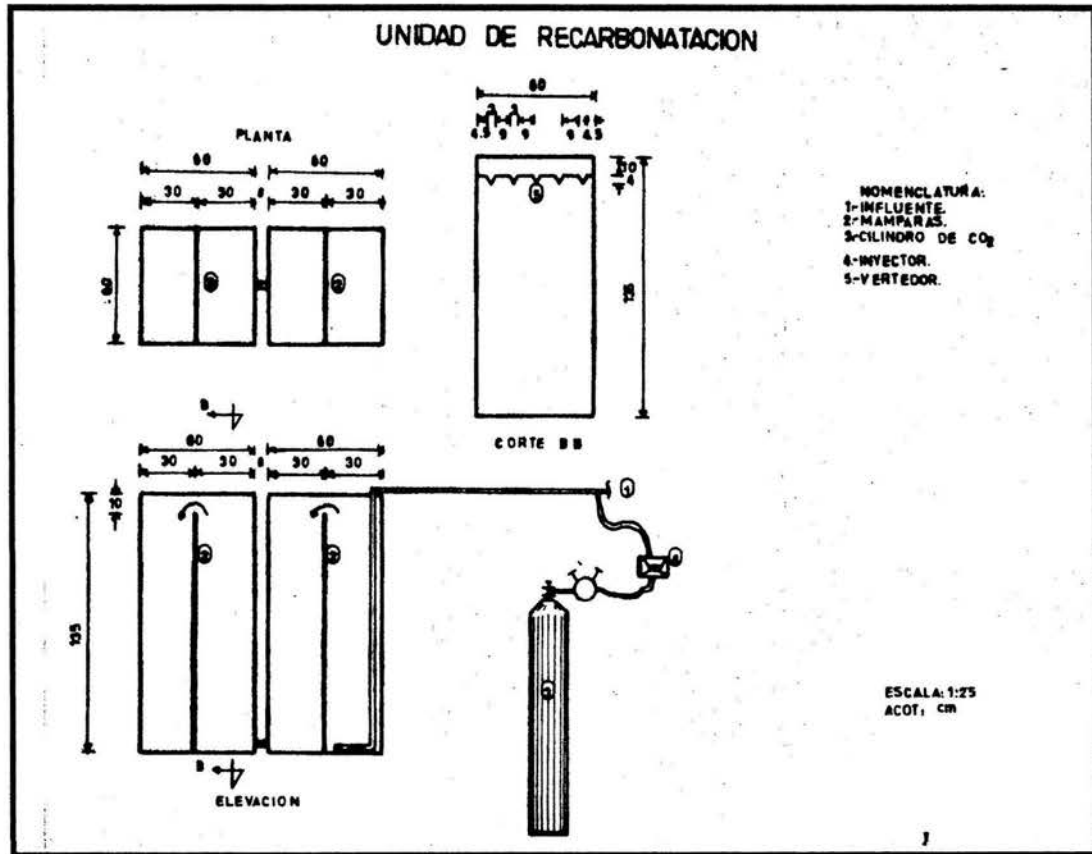
$$k_s: \text{ es la constante de solubilidad } (\text{CaCO}_3) = (\text{Ca}^{2+}) (\text{CO}_3^{2-})$$

$$k_2 = \text{ es la constante de equilibrio } (\text{HCO}_3^-) = \frac{(\text{CO}_3^{2-}) (\text{H}^+)}{(\text{HCO}_3^-)}$$

Por lo que el índice del Langelier se define como:

$$I = \text{pH} - \text{pH}_s$$

Si $I = 0$ el agua se encuentra en equilibrio; si $I > 0$ el agua esta sobresaturada de carbonato de calcio CaCO_3 y es incrustante; si $I < 0$, el agua esta subsaturada y es corrosiva.



Fuente: Sistemas de Aguas del D. F., Rodrigo Figueroa 1998.

Figura 4.5 Unidad de recarbonatación del dispositivo experimental de tratamiento avanzado de aguas residuales de la planta Cerro de la Estrella.

La unidad se construyó con dos cámaras una de reacción y una contacto para garantizar el buen mezclado entre el bióxido de carbono CO₂ y el agua. El tiempo de retención es de 12 minutos para cada cámara.

Además se construyeron vertedores triangulares en cada cámara para propiciar un flujo laminar y evitar turbulencias en el agua. La Figura 4.5 muestra la unidad de recarbonatación del dispositivo experimental de tratamiento avanzado de aguas residuales de la planta Cerro de la Estrella.

IV. 3.5 Filtración

La filtración es un proceso unitario básico en el tratamiento de agua para usos diversos, consiste en pasarla a través de un lecho poroso, para retener la materia en suspensión o en estado coloidal. Las variantes de la filtración incluyen: tasas de filtración y retrolavado, tiempos de retrolavados ya sea con aire y agua o con agua solamente, tipo y granulometría de lecho simple (arena), doble (arena y antracita), triple (arena, antracita y grava) , tipo de flujo (puede ser lento o rápido), por gravedad o a presión, en sentido ascendente o descendente.

Recientemente con objeto de reducir los costos de inversión se han incrementado las tasas de filtración. En la actualidad se emplean en forma más amplia la filtración rápida con lecho doble cuyo material va del fino al grueso y con tasas de filtración de 83 a 450 l/m² min. La aplicación del filtro se hace con base a las teorías físicas, las cuales consideran las características del lecho (diámetro y espesores), la tasa de filtración (C.H.S.) y la suspensión a filtrar.

En la filtración se presentan dos fenómenos: el primero de transporte debido a un mecanismo físico hidráulico antes de llegar al empaque, y el segundo, es el de adhesión de las partículas del material para resistir la fuerza de corte de líquido en movimiento. Es decir, en este proceso permanecen fijas unas partículas y otras en suspensión. La adhesión de una partícula suspendida en la interfase sólido líquido que presenta el filtro se atribuye a dos fenómenos: acción recíproca de las fuerzas electrostáticas y de Van Der Waals en la doble capa de los granos del medio. La unión química de la partícula y la superficie del medio por un material de enlace.

El parámetro que se busca optimizar en la filtración es la pérdida de carga. La pérdida de carga se mide en función del gradiente hidráulico y es mínimo cuando se tiene un depósito uniforme en todo el espesor del filtro.

Se debe procurar el balance en la operación del filtro para optimizar resultados, así el gradiente hidráulico debe mantener una relación directa del tamaño del medio con el depósito específico, por lo que se tendrá más depósito en los poros más grandes, manteniendo un gradiente hidráulico constante a través de la profundidad del lecho, observándose menores pérdidas de carga y velocidades de filtración más altas. La remoción de la turbiedad permanente de las capas gruesas se hará en la zona del medio más fino. El problema práctico de la filtración se puede plantear considerando las concentraciones de la turbiedad o color de las aguas a filtrar para así darles tratamiento previo o como paso anterior de algún proceso biológico o físico-químico.

La filtración se utiliza para remover flóculos biológicos residuales de un tratamiento secundario, sólidos remanentes de una coagulación química, antes de un paso de adsorción con carbón activado o de intercambio iónico. La filtración remueve precipitados de fosfatos con sales de aluminio, hierro o cal, remoción de materia suspendida previo al tratamiento con micro-coagulantes.

Para elevar la eficiencia de remoción de contaminantes es necesario optimizar los parámetros que rigen la filtración: duración de la carrera de filtración entendiéndose como el tiempo de duración del filtro en operación que va de 6 a 8 horas y no más de 36 a 48 horas para controlar la descomposición anaerobia del lecho, lo que determina la producción de agua tratada por unidad de área del filtro, y afecta la carga hidráulica superficial o tasa de filtración. Con base en estos parámetros se determina la pérdida de carga debida a la granulometría del filtro, la tasa de retrolavado y el volumen de agua de retrolavado. Otra variable importante es el espesor y granulometría del lecho, pues de ésta depende la retención, la cantidad y la filtrabilidad de los sólidos.

La interrelación entre el tamaño, espesor y la tasa de filtración define la calidad del filtrado y la pérdida de carga. En la granulometría se debe especificar el tamaño efectivo y el coeficiente de uniformidad del lecho.

El tamaño efectivo por definición es el tamaño del grano, tal que el 10% de su peso son mas pequeñas y 90% son más grandes; el coeficiente de uniformidad determina la relación del tamaño que tiene 60% de la muestra más fina al tamaño efectivo. Es necesario elegir adecuadamente la granulometría del lecho para facilitar el proceso de filtración, pues el retrolavado se favorece con coeficientes de uniformidades bajos, ya que a mayor coeficiente de uniformidad se requiere mayor tasa de retrolavado para fluidizar los granos más gruesos.

La tasa de filtración, es la relación de la fuerza de impulso a la resistencia del filtro. La fuerza de impulso es la carga hidráulica disponible, mientras que la resistencia la da el lecho propiamente y los sólidos que se van reteniendo; la tasa de filtración se divide: filtración a presión constante, filtración a tasa constante y filtración a tasa variable declinante.

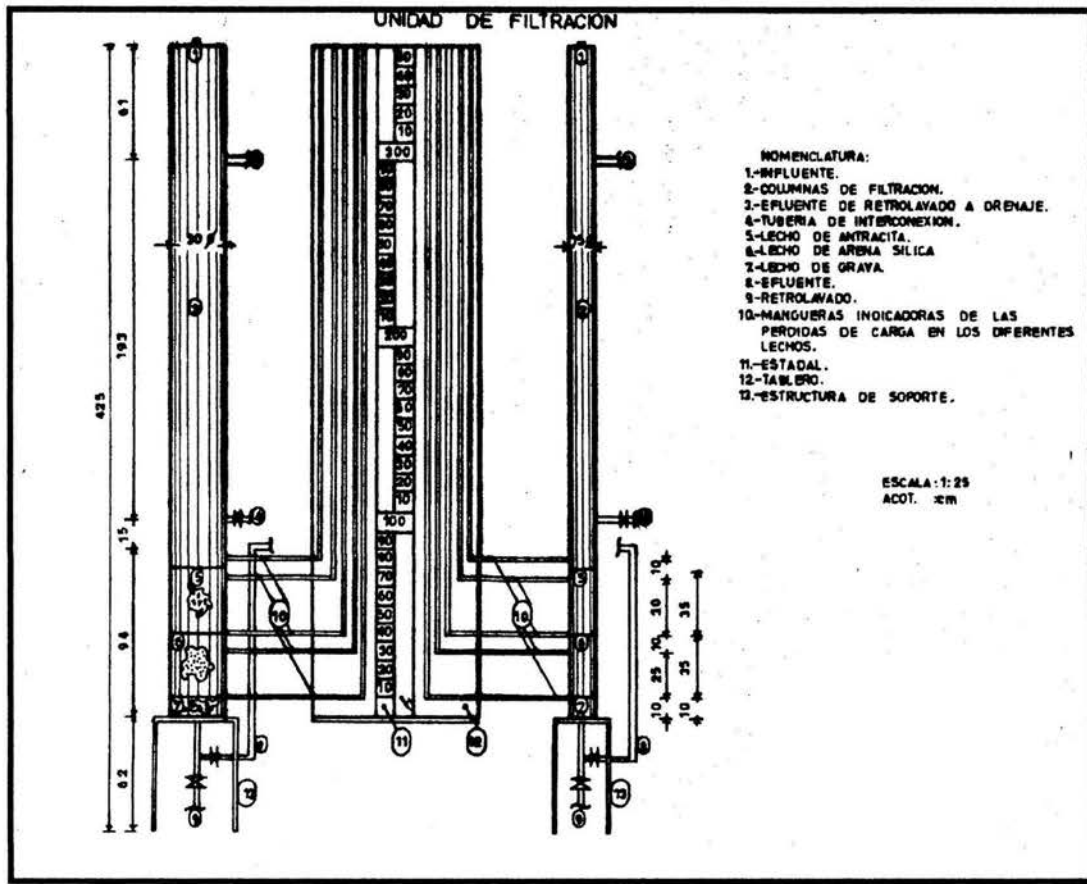
Filtración a presión constante, es la fuerza de impulso o carga hidráulica y se aplica durante toda la carrera a medida que se va saturando el filtro se incrementa la resistencia y como la carga hidráulica permanece constante, la tasa de filtración decrece.

Filtración a tasa constante, requiere de grandes almacenamientos aguas arriba del filtro y de un sistema automático en la válvula de control, ya que a medida que el filtro se tapona con sólidos, se debe abrir lentamente hasta su apertura total, en este punto termina la carrera del filtro.

Filtración a tasa variable declinante, la tasa variable declinante nos proporciona una producción de agua constante, pues a medida que un filtro pierde carga, los demás la amortiguan, siendo necesario para esto conectar los filtros por arriba del nivel del lecho.

Por último, el retrolavado es más difícil por los problemas de aglomeración en la superficie y fractura del lecho, por lo que el retrolavado con agua no es eficiente, siendo necesario aplicar aire como auxiliar de la agitación.

La alimentación del agua se realiza por la parte superior; el efluente se recolecta en el fondo de las columnas y por la parte superior de los lechos se interconectan los filtros con la finalidad de operar con tasa constante y tasa declinante. La Figura 4.6 muestra la unidad de filtración del dispositivo experimental de tratamiento avanzado de aguas residuales de la planta Cerro de la Estrella.



Fuente: Sistemas de Aguas del D. F., Rodrigo Figueroa 1998.

Figura 4.6 Unidad de filtración del dispositivo experimental de tratamiento avanzado de aguas residuales de la planta Cerro de la Estrella.

IV. 3.6 Adsorción con carbón activado

El proceso de adsorción fue observado primeramente para gases en el año de 1773 por C. W. Scheele y luego para soluciones por Lowitz en 1785; actualmente se reconoce como un fenómeno importante para la mayor parte de los procesos físicos naturales, biológicos y químicos. La adsorción sobre sólidos particularmente carbón activado, ha llegado a utilizarse ampliamente para la purificación de aguas y aguas residuales.

El carbón activado es valioso para la eliminación del sabor, olor, y color de las aguas, así como para la remoción de compuestos refractarios al tratamiento biológico de aguas residuales.

En general, la adsorción varía en razón directa de la presión y en razón inversa de la temperatura. Puede decirse que todos los materiales comerciales que muestran desde el punto de vista de la ingeniería la máxima capacidad adsorbente efectiva en las condiciones en que se emplean, se activan fácilmente y se desprende de ellos con facilidad el adsorbato.

La adsorción como operación unitaria podría considerarse como complementaria o suplementaria de otros procesos, cada uno de los cuales tiene limitaciones concretas con respecto a las pequeñas concentraciones de sustancias que habrían de eliminarse. Las características del carbón empleado son un dato fundamental para el diseño de las unidades de proceso. En términos generales los carbones utilizados son de origen mineral, aunque también pueden emplearse carbones vegetales.

Los parámetros básicos que definen la eficiencia del proceso son: las concentraciones de equilibrio en la superficie del carbón y en el aire, y la velocidad de transferencia de los contaminantes del agua al carbón.

La adsorción en un sistema sólido - líquido proviene de la separación del soluto de la solución y su concentración en la superficie de un sólido hasta que se establece un equilibrio dinámico en la superficie, entre la concentración de soluto que permanece en solución y la concentración superficial del soluto, en el equilibrio. Existe una distribución definida de soluto entre las fases líquida y sólida, la relación de distribución es una medida de la posición del equilibrio en el proceso de adsorción y puede ser una función de la concentración del soluto, concentración y naturaleza de los solutos competitivos.

La adsorción es un fenómeno superficial, como tal, el grado de adsorción es proporcional al área superficial específica, la cual puede definirse como la porción del área total que esta disponible para la adsorción. Por lo tanto, la cantidad adsorbida por peso unitario de adsorbente sólido es tanto mayor cuanto más finamente dividido y poroso este el sólido.

Al considerar la adsorción de una solución debemos tener en cuenta el hecho de que la solubilidad del soluto influye en gran parte en el control del equilibrio de adsorción.

En general, podemos anticipar una dependencia inversa entre el grado de adsorción de un soluto y su solubilidad en el disolvente a partir del cual ocurre la adsorción.

El pH influye en la adsorción ya que gobierna el grado de ionización de los compuestos ácidos o básicos, el cual es factor determinante para la adsorción. En general, la adsorción de los contaminantes orgánicos típicos del agua aumenta al disminuir el pH.

Las reacciones de adsorción son normalmente exotérmicas; por tanto el grado de adsorción suele aumentar al disminuir la temperatura; además, las variaciones pequeñas de temperatura no alteran grandemente el proceso de adsorción.

La naturaleza físico-química del adsorbente puede tener efectos profundos sobre la velocidad y la capacidad de adsorción respectivamente cada sólido es un adsorbente potencial; actualmente el carbón activado es el adsorbente de mayor interés.

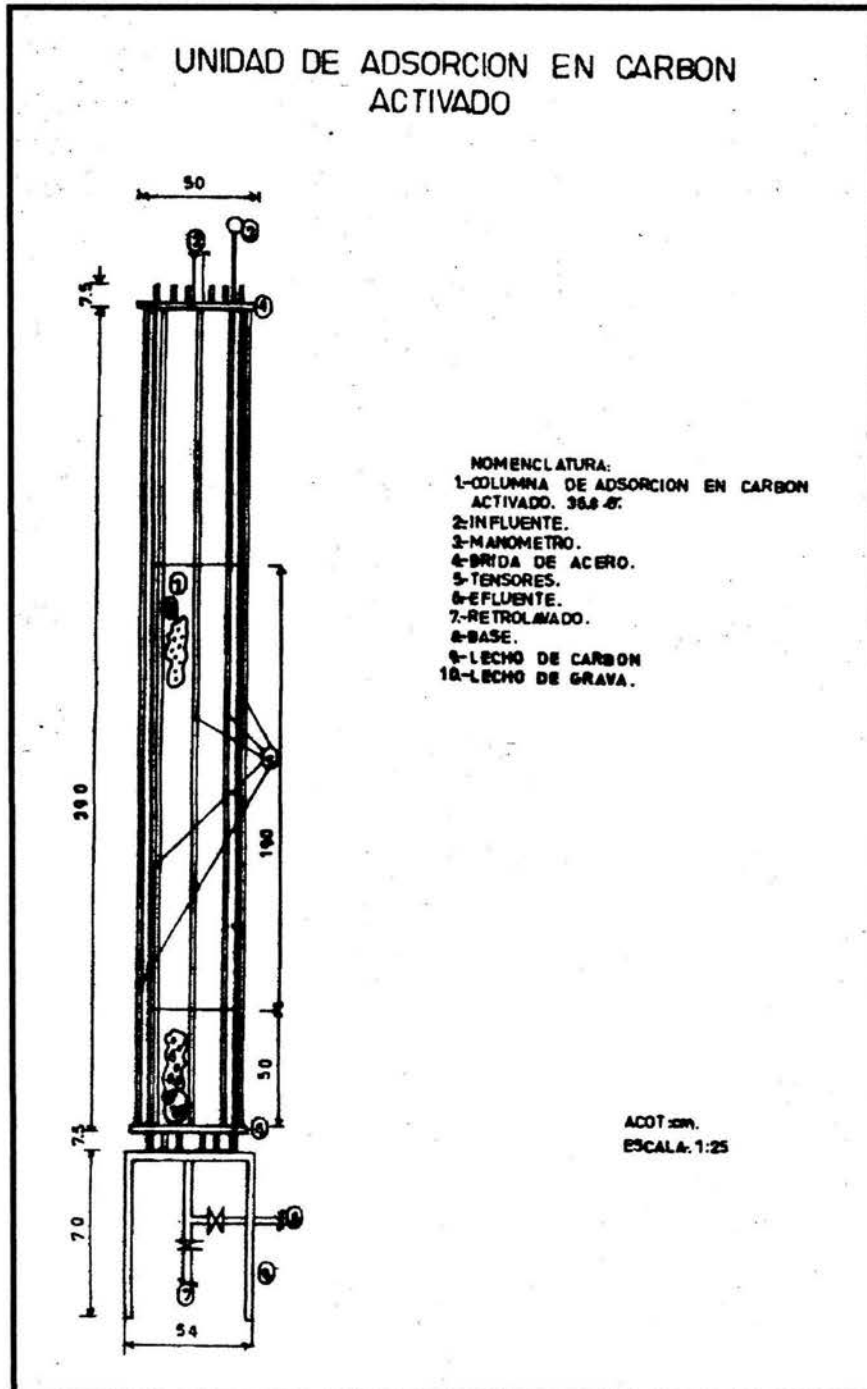
El retrolavado consiste en someter la columna empacada a un flujo de fluido suficiente para remover sólidos acumulados en el lecho. La velocidad y frecuencia del retrolavado depende de la carga hidráulica, la naturaleza y concentración de los sólidos suspendidos en el agua residual, el tamaño de partícula del carbón y el método de contacto.

La frecuencia del retrolavado se puede fijar arbitrariamente a diario con un tiempo específico o por criterio de operación pérdida de presión o turbidez , su duración puede ser de 10 a 15 minutos. Una de las alternativas para los sistemas de contacto de cloro es el flujo descendente de agua residual a través del lecho de carbón.

La razón principal para utilizar un contacto de flujo descendente. Es usar el carbón con un propósito doble: adsorción de los orgánicos y filtración de materia suspendida.

Una desventaja de este sistema de flujo es que la provisión debe ser hecha de manera periódica para el retrolavado y en consecuencia relevar la pérdida de presión asociada con la acumulación de sólidos suspendidos. La operación continua por algunos días sin retrolavado puede ocasionar compactación o falta de lecho. La remoción de sólidos atrapados en un lecho empacado ascendente puede requerir dos etapas, la obturación de la superficie del fondo debe realizarse por operación temporal de lecho de manera descendente, y los sólidos suspendidos atrapados a la mitad del lecho pueden ser removidos por expansión.

Cuando se retrolavan los filtros de flujo ascendente, se requiere más tiempo y proporcionalmente mayor volumen de agua de una calidad mayor para evitar obturaciones en el fondo de los lechos. A veces el contra flujo de los contactos del empaque de carbón ascendente precedido por filtración, meramente consiste del doble de la velocidad del contacto normal de 10 a 15 minutos. La granulometría del carbón es importante desde el punto de vista de operación hidráulica de las unidades, a menor tamaño de partícula mayores pérdidas de carga, pero la superficie activa es prácticamente independiente del diámetro medio de los gránulos, pues mas del 99% de las superficie activa se localiza en poros internos de las partículas de carbón, por lo que la superficie externa de la partícula es irrelevante.



Fuente: Sistemas de Aguas del D. F., Rodrigo Figueroa 1998.

Figura 4.7 Unidad de adsorción en carbón activado del dispositivo experimental de tratamiento avanzado de aguas residuales de la planta Cerro de la Estrella.

La planta piloto del Cerro de la Estrella fue diseñada con dos columnas en serie, con flujo descendente, un espesor total del lecho de 3.6 metros, con una carga hidráulica por unidad de superficie de 3.86 l/s $-m^2$ equivalente a un tiempo de contacto en cama vacía de 15.8 minutos. La unidad fue empacada con carbón mineral 8*30 (8% mayor que la apertura de la maya U. S."A". y 30% menor que la apertura de la maya U. S."B"). Las columnas son de 40 cm de diámetro, un bordo libre de 21 cm una expansión del lecho de 40%. En la planta piloto del Cerro de la Estrella se empleo carbón de origen mineral, de procedencia americana. La Figura 4.7 muestra la unidad de adsorción en carbón activado del dispositivo experimental de tratamiento avanzado de aguas residuales de la planta Cerro de la Estrella.

IV. 3.7 Ozonación

Las propiedades físicas y químicas del ozono se han aprovechado de manera práctica ya que es un fuerte oxidante, siendo una forma alotrópica del oxígeno, con un átomo más que la molécula natural.

El empleo de la ozonación en el tratamiento de aguas residuales es reciente y se utiliza con varios propósitos. Como ayuda de coagulación en la filtración directa de las aguas, acondicionamiento químico de las aguas para el proceso de carbón activado; para anticipar una posible degradación de la calidad de las aguas y una disminución en la capacidad de adsorción de dicho proceso. Se puede también diseñar la capacidad de transferencia del ozono como ayuda de oxidación de orgánicos. Contribuye además a promover la conversión biológica del amoníaco presente a formas oxidadas del nitrógeno (nitratos y nitritos). También elimina: color, sabor, olor, fierro, manganeso y cianuro. El ozono es un oxidante de amplio espectro, ya que oxida compuestos orgánicos, inorgánicos y biológicos, por lo que también se emplea como desinfectante, además de facilitar la remoción de compuestos solubles ya que oxida la mayor parte de elementos y compuestos a su estado mas elevado de oxidación como los orgánicos refractarios (detergentes, pesticidas, fenoles, etc.).

El ozono es producido comercialmente por la excitación del oxígeno en una corona dieléctrica, es decir se propicia una descarga eléctrica en el dieléctrico. El oxígeno alimentado puede ser puro o combinado (aire). En el caso de alimentación de oxígeno puro las concentraciones de ozono logradas son aproximadamente del doble de las logradas si la unidad generadora se alimenta con aire. Para la producción de la corona tradicionalmente se han utilizado dieléctricos de vidrio, pero la tendencia actual es el empleo de elementos de cerámica, por su mayor eficiencia en términos de energía consumida en la producción de ozono, reducción potencial en el tamaño de las unidades, y una concentración mayor de ozono en la mezcla de gases.

Las solubilidad del ozono en el agua depende principalmente de la temperatura y la presión parcial del O_3 en la fase gas también el curso y grado de las oxidaciones por ozono puede variar considerablemente de un caso a otro, dependiendo de factores tales como: la naturaleza y concentración de los reactivos, temperatura, pH y tiempo de contacto.

El ozono se destaca por su mayor capacidad de adsorción del carbón activado en la remoción de materia orgánica disuelta, mayor vida útil del carbón hasta tres años antes de su regeneración; mayor efectividad en la combinación, pre-ozonación-carbón activado-ozonación y por último reduce la demanda de cloro para la desinfección final.

En términos generales las dosis de ozono recomendable para el tratamiento de agua en combinación con carbón activado es proporcional a la concentración de carbón orgánico disuelto, esta proporción varía de 0.5 a 2.5 mg de ozono por mg de carbón orgánico disuelto.

Otra opción de tratamiento es colocar la unidad de ozonación entre los procesos de filtración y carbón activado. La ventaja de esta opción es la de reducir la demanda de ozono, pues una parte de los compuestos que demandan ozono serían removidos en los filtros.

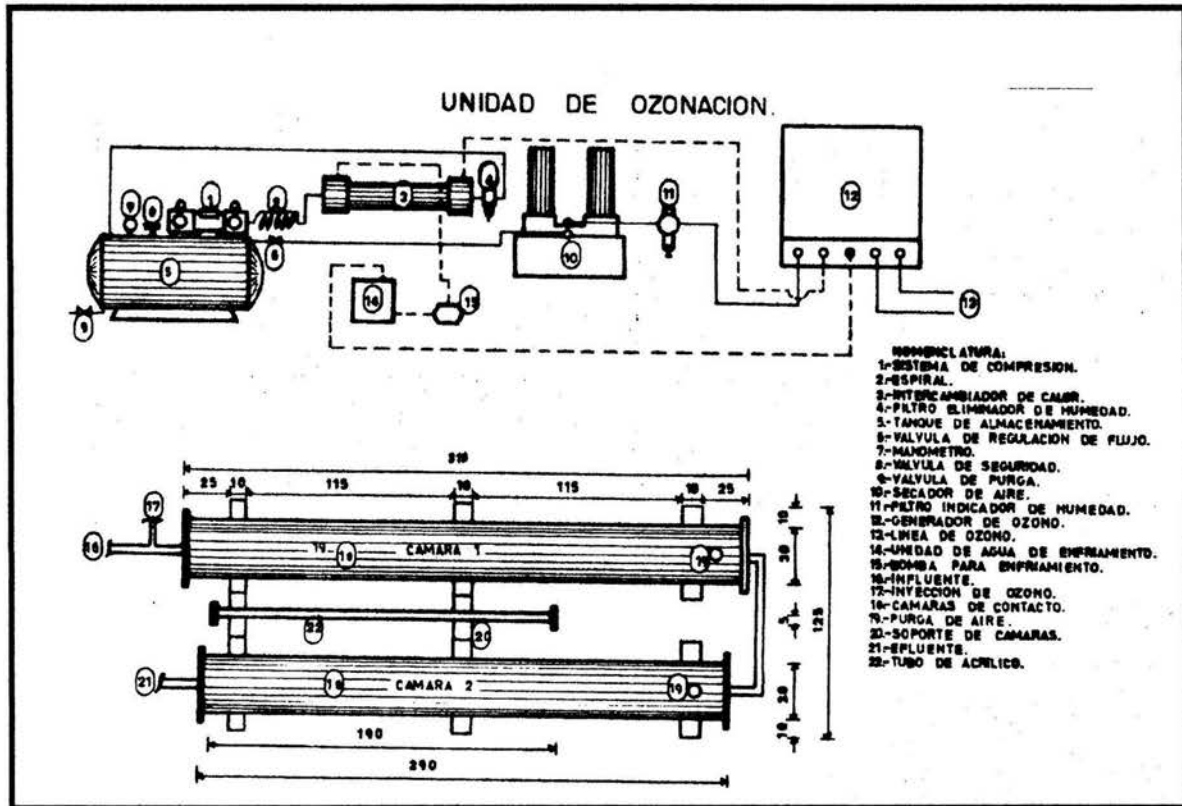
Las características de los equipos generadores de ozono, así, como sus costos varían considerablemente según la tecnología empleada por cada fabricante; algunos conceptos pragmáticos útiles para evaluar la adquisición de equipo son: para los generadores con dieléctricos de cerámica, el consumo de energía es del orden de 13.8 watts-hora sobre gramo ozono generado (alguno de los fabricantes de equipo mencionan eficiencias del orden de 10 watts-hora/ gramo ozono producido).

El volumen de gas manejado varía considerablemente, en términos generales si se emplea aire en el generador de ozono, la concentración de ozono en la mezcla es del orden de 18 gr/h m^3 , si se emplea oxígeno la concentración puede llegar a ser de 75 gr ozono/m^3 . La capacidad de los difusores deberá ser por lo tanto ajustada a la concentración de ozono que produzca el equipo escogido.

El equipo seleccionado para la planta piloto Cerro de la Estrella, como generador de ozono es el que genera 32 gr/h de ozono al pasar aire seco por unos dieléctricos de cerámica (óxido de titanio, en los cuales se genera una descarga eléctrica de 12,000 volts para descomponer la molécula de aire. La Figura 4.8 muestra la unidad de ozonación del dispositivo experimental de tratamiento avanzado de aguas residuales de la planta Cerro de la Estrella.

La inyección del ozono en el agua para un buen mezclado se realiza usando un medidor Venturi, en el cual se reduce el diámetro de una sección para incrementar la velocidad y crear una presión negativa, por lo que ahí se genera la succión y la mezcla del gas (ozono) con el agua. La unidad cuenta con 2 cámaras de contacto circulares de 30 cm de diámetro y de 3.10 m de longitud cuyo volumen es de 217 litros con un tiempo de retención de 7.20 minutos, a gasto de diseño de 30 l/min y en la práctica se podrán variar los tiempos de contacto en 7.20 y 14.40 minutos.

La generación del aire se realiza por medio de un compresor que opera a base de grafito como lubricante para evitar la humedad del aire y la saturación de la alúmina.



Fuente: Sistemas de Aguas del D. F., Rodrigo Figueroa 1998.

Figura 4.8 Unidad de ozonación del dispositivo experimental de tratamiento avanzado de aguas residuales de la planta Cerro de la Estrella.

IV. 3.8 Ósmosis inversa

La ósmosis inversa se aplica en sistemas de baja presión para potabilizar aguas contaminadas. Como pretratamiento antes de intercambio iónico, para aguas salobres, de mar, en plataformas marinas, en aguas para calderas y procesos. Últimamente se esta dando auge en las aguas residuales ya sean domésticas o industriales. Utilizándose como pulimento del agua previamente tratada con procesos convencionales, controlando el contenido de sales disueltas, trazas orgánicas, virus, color, turbiedad, metales, etc.

Su desventaja es el alto costo de adquisición del equipo y de operación, pero es mejor en comparación con otros procesos como la electro-diálisis y el intercambio iónico. Pues la osmosis inversa remueve del 85% al 99% de contaminantes.

En la ósmosis inversa se aplica presión para extraerle agua a una solución concentrada a través de una membrana semipermeable al ir aplicando presión hasta llegar el flujo a ser cero denominándose presión osmótica, el agua de alimentación se divide en dos flujos; producto (agua purificada) con baja concentración de sales y el rechazo con alta concentración de sales. Las membranas actúan como una barrera al flujo de moléculas o iones, estas membranas se constituyen por polímeros que forman áreas amorfas y áreas cristalinas.

Los espesores de las membranas varían, pero algunas tienen espesores de 100 micrones (0.10 mm). Siendo del tipo asimétricas como las de acetato de celulosa; poliamidas aromáticas a base de fibras huecas.

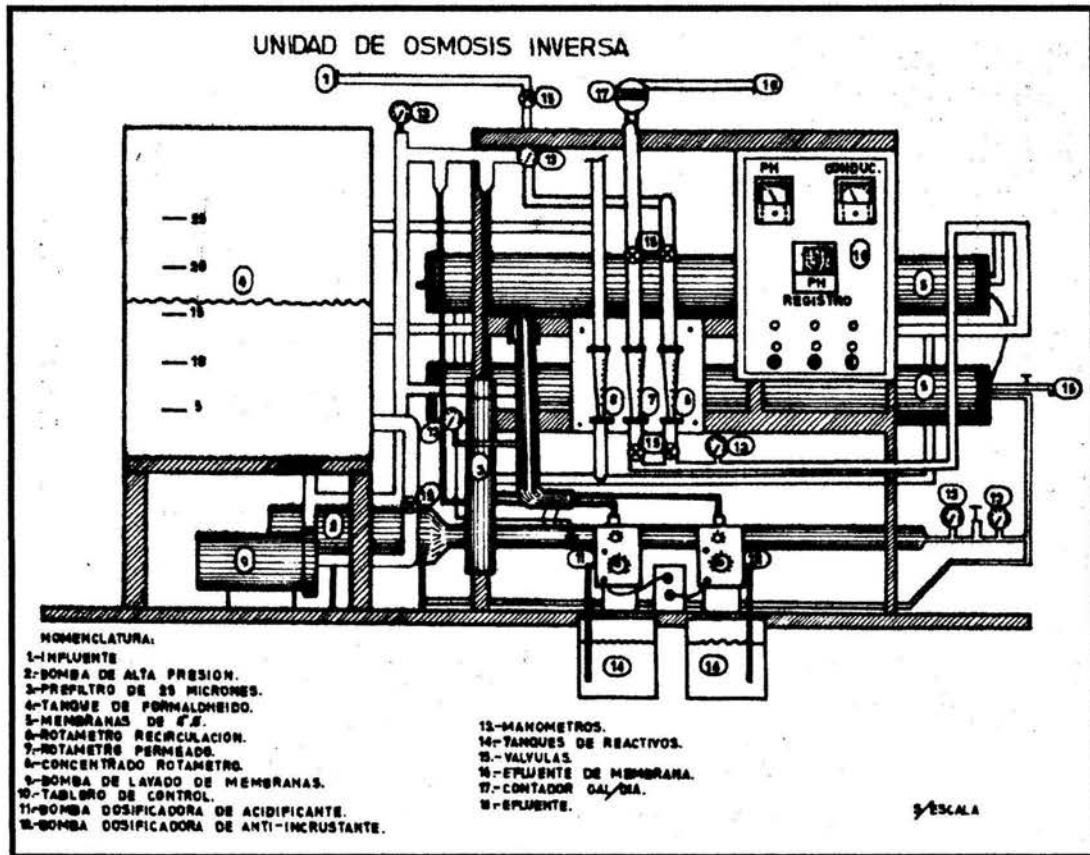
La alteración de las membranas al estar expuestas a la alta presión produce la compactación de estas por lo que disminuirá el flujo de agua producto al paso del tiempo. Otro factor que daña a las membranas es la acumulación de sales rechazadas, formando una capa estable que se llama efecto de polarización de la concentración de sales en la superficie de las membranas y en el seno de la solución incrementándose la presión osmótica. Las membranas al paso del tiempo pierden capacidad de producción por el efecto de la hidrólisis del acetato de celulosa, para reducir este efecto se debe trabajar el sistema a pH de 5 unidades y no más de 5.5. Para ajustar el pH al requerido se utiliza ácido sulfúrico o ácido clorhídrico (muriático) grado industrial. Al inyectar ácido sulfúrico al agua se forma ácido carbónico o ácido sulfhídrico. Este se removerá mediante aireación del agua y además se estabilizará el pH del agua de 5.5 a 6.5.

Otro factor importante es el depósito excesivo de partículas de sulfato de calcio, ya que este se incrusta en las membranas ocasionando taponamiento, para evitar esto se inyecta hexameta-fosfato de sodio para mantener en suspensión dichas partículas.

Al pasar el agua por ósmosis inversa esta será pura; dependiendo de su utilidad final se diluirá con agua que no ha pasado por este proceso realizándose un balance de masas para obtener las concentraciones requeridas de la composición del agua.

Se utilizó un equipo para producir 0.2 l/s con membranas de acetato de celulosa. El equipo consta de 4 elementos pudiéndose experimentar el paso de 4 tratamientos con diferentes porcentajes de recuperación al variar la recirculación y el rechazo. La unidad cuenta con una bomba de alta presión; una bomba para el lavado de las membranas de 5 H.P. , una serie de manómetros para controlar y regular las presiones, así también se tienen tres rotámetros para la medición del permeado, concentrado y la recirculación. Además el equipo cuenta con un sensor para medir el pH y la conductividad eléctrica. El sensor de pH esta conectado al sistema automático, de tal manera que si se incrementa el pH el sistema se para. Cabe mencionar que si le falta agua de alimentación o presión de entrada el sistema el sistema se para por succión de baja presión. La Figura 4.9 muestra la unidad de osmosis inversa del dispositivo experimental de tratamiento avanzado de aguas residuales de la planta Cerro de la Estrella.

La unidad cuenta con un filtro cartucho que funciona como prefiltro para eliminar las impurezas del agua y que no dañen las membranas. Por último se tiene una columna de 3.6 metros de altura empacada con material sintético modular, un extractor para eliminar el ácido sulfhídrico y estabilizar el pH; a esta operación se le conoce como descarbonatación.



Fuente: Sistemas de Aguas del D. F., Rodrigo Figueroa 1998.

Figura 4.9 muestra la unidad de ósmosis inversa del dispositivo experimental de tratamiento avanzado de aguas residuales de la planta Cerro de la Estrella.

IV. 3.9 Cloración

El cloro se ha aplicado ampliamente tanto en el tratamiento de agua residual como en el tratamiento de agua potable, ya que puede ejercer acción bactericida y oxidante, lo cual permite remover contaminantes biológicos, orgánicos e inorgánicos. De las muy diferentes aplicaciones el cloro continua siendo la más importante la desinfección. Para el caso particular de la desinfección, el cloro es quizá el más utilizado en el mundo, ya que reúne la mayoría de las características de un desinfectante ideal.

Los compuestos de cloro mas frecuentemente utilizados son el hipoclorito de sodio, de calcio y gas cloro. La elección del método de desinfección se efectúa en base a las medidas de seguridad que deben seguirse, la disponibilidad, el costo y la capacidad de almacenamiento.

CAPITULO V

CONCLUSIONES

Capítulo V

Conclusiones

Las aguas residuales deben de ser tratadas en forma eficiente antes de ser descargadas o reusadas para satisfacer la: protección de los cuerpos receptores de la contaminación fecal, ya que muchos de ellos son utilizados como fuentes de abastecimiento superficial de agua para consumo humano o en el caso de las aguas costeras para protección de las actividades pesqueras. También se procura la protección de los cuerpos receptores de la disminución del oxígeno disuelto y por lo tanto del daño a la ecología del sistema y la de producir efluentes microbiológicamente seguros para diversos reúsos.

La evolución y el desarrollo de las tecnologías de tratamiento para obtener la calidad del agua deseada para el uso a que se destine el agua tratada ha tenido grandes avances. Si es para descargar a un cuerpo receptor, que no afecte el medio ambiente y que se cumpla con la normatividad aplicable al tipo de cuerpo receptor.

Uno de los factores de mayor peso en la decisión del sistema de tratamiento a seleccionar es el de los costos, complejidad de operación y el de la eficiencia del tratamiento requerido según el uso o destino final del efluente.

Para los países en desarrollo la selección de las tecnologías a usar deben ser las apropiadas por las bondades que estas poseen. La mayoría de los procesos convencionales usados en el tratamiento de agua residual en las ciudades e industrias tienen que tener al menos un proceso de tratamiento secundario. El propósito del tratamiento secundario consiste generalmente en la conversión biológica de compuestos orgánicos disueltos y coloidales en biomasa, misma que puede ser removida a continuación por sedimentación. En la mayoría de los casos, es suficiente el tratamiento secundario de las aguas residuales municipales para que el efluente cumpla con la normas oficiales mexicanas. Sin embargo, en algunos casos puede requerirse tratamiento adicional.

La materia orgánica en aguas residuales, generalmente medida como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) proporciona nutrientes a los microorganismos de las corrientes, los cuales se multiplican rápidamente y consumen las reservas limitadas de oxígeno disuelto (OD) en éstos. Si la disminución del oxígeno disuelto es drástica, puede también ocasionar olores desagradables o inclusive la muerte de los peces.

La necesidad de sistemas de tratamiento adecuados y apropiados es obvia. Tales sistemas deben de ser a bajo costo, fáciles de operar y mantener y ser eficientes en la remoción de la materia orgánica y de los microorganismos patógenos.

El agua residual proveniente del uso doméstico o de los procesos industriales puede ser descargada a corrientes de agua superficiales (ríos o arroyos), a cuerpos de agua estacionarios continentales (lagos y presas) o a los mares u océanos. También el agua residual se puede disponer en el suelo, incorporándose al ciclo hidrológico mediante infiltración y evaporación.

Las aguas residuales industriales se descargan al alcantarillado municipal, mediante el cual se transportan frecuentemente sin tratamiento en conjunto con el agua residual doméstica hasta el cuerpo receptor.

Los requerimientos de calidad de las aguas residuales que se descargan a cuerpos receptores, alcantarillado y reúso se definen en el país por medio de las Normas Oficiales Mexicanas. La **NOM-001-CNA-1996**, establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

La **NOM-002-CNA-1996**, establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado y la **NOM-003-CNA-1997**, establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

Un sistema de tratamiento está compuesto por una combinación de operaciones y procesos unitarios diseñados para reducir ciertos constituyentes del agua residual a un nivel aceptable. Se pueden hacer muchas combinaciones de operaciones y procesos unitarios. No obstante que prácticamente todos los sistemas de tratamiento de aguas residuales son únicos en algunos aspectos, a través de los años ha evolucionado un agrupamiento general de operaciones y procesos unitarios de acuerdo con los contaminantes que constituyen el blanco del tratamiento. La combinación de los diferentes procesos unitarios desde los basados en las leyes físicas como la sedimentación (tratamiento primario), los procesos biológicos (tratamiento secundario), y la remoción específica de contaminantes a través del tratamiento terciario, permitan obtener un efluente con la calidad deseada.

En la actualidad, se tienen diferentes usos del agua residual tratada en la ciudad, los cuales se mencionan a continuación: a) riego de áreas verdes, los estudios acerca de la demanda potencial de agua residual ha localizado 71 zonas en las que el riego mediante el empleo de aguas residuales es factible, abarcando una superficie de 3865 ha, ubicándose en su mayoría al sur, suroeste y poniente de la ciudad; los criterios fundamentales que rigen las normas existentes de calidad de agua residual en actividades agrícolas incluyen la protección de los trabajadores del campo y del público en general pues se deberá garantizar que no exista peligro bacteriológico o viral en su empleo, la salinidad del agua deberá ser suficientemente baja para mantener una presión osmótica adecuada para que las plantas puedan absorber el agua necesaria para su crecimiento, no contener iones, como sodio y boro, que ocasionen daños a los cultivos y al mismo suelo. b) El uso de aguas tratadas para la recarga de acuíferos ha sido empleado en regiones en donde la sobreexplotación de las aguas subterráneas ha causado serios problemas de abastecimiento, la recarga de acuíferos con aguas residuales ofrece un gran número de ventajas, ya que con este método se pueden mantener los niveles freáticos y proveer el almacenamiento del agua tratada para usos no potables como lo es el caso del riego agrícola, industrial y recreativo. c) El uso del agua residual tratada en la industria a gran escala representa uno de los campos con mejores expectativas, pues la industria es uno de los más grandes consumidores de agua, la mayoría del agua que se utiliza en la industria requiere de una calidad inferior a la potable y es muy común que la industria se localice dentro o cerca de las áreas urbanas que producen una gran cantidad de agua residual, entre los usos del agua

residual tratada en la industria destacan las operaciones de enfriamiento de calderas, lavado de materiales, en el lavado de los vehículos de transporte, en el enfriamiento y la producción de vapor.

Del caudal tratado en la planta de tratamiento de aguas residuales Cerro de la Estrella el 56% se emplea en el llenado de canales y lagos recreativos, así como en el riego agrícola en la zona chinampera de Mixquic, Tláhuac y Xochimilco (se riegan 6000 ha); 25% para la recarga del acuífero; 8% se utiliza en el sector industrial; 8% en el riego de áreas verdes, principalmente en la zonas de Iztapalapa, Tláhuac y Xochimilco, y el rescate 3%, se emplea en el sector comercial, básicamente para el lavado de automóviles, autobuses y carros del sistema de transporte colectivo metro.

Es importante considerar que la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales en asentamientos urbanos y centros industriales, implica la realización de inversiones considerables y grandes esfuerzos para mejorar la calidad del agua de las descargas, por lo que en la planeación de este tipo de obra tendremos que considerar varias alternativas de tratamiento del agua residual, sin olvidar la posibilidad de hacer modificaciones a los procesos de generación de las descargas o recuperación de los insumos, con la finalidad de seleccionar la solución que cumpla con los requerimientos de calidad establecidos para el efluente, al menor costo posible.

Tomar en cuenta que para tratar el agua residual no existen proyectos tipo, ya que la caracterización del agua del influente, la calidad requerida del agua tratada, los objetivos del tratamiento, el tipo de subsuelo, la topografía, los procedimientos constructivos y el presupuesto asignado, son características particulares de cada tipo de planta.

Ante la creciente necesidad de tratar el agua residual, se requiere continuar con los trabajos que permitan mejorar los procesos de tratamiento y ampliar la capacidad y calidad de las plantas de tratamiento existentes, tarea que ayudará a reforzar la nueva cultura del agua entre los usuarios de los servicios hidráulicos de la Ciudad de México.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Metcalf & Eddy, Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Editorial Mc Graw Hill. 1998.
- 2.- Gordon Maskew Fair, John Charles Geyer y Daniel Alexander Okun, Purificación de aguas, tratamiento y remoción de aguas residuales. Ingeniería sanitaria y de aguas residuales Volumen II, Editorial Limusa, 1989.
- 3.- Rubens Sette Ramalho, Tratamiento de aguas residuales, Editorial Reverté, S. A., 1993.
- 4.- Alba B. Vázquez González y Enrique Cesar Valdez, Impacto Ambiental, IMTA Facultad de Ingeniería, 1994.
- 5.- Alba B. Vázquez González y Enrique Cesar Valdez, Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales, Facultad de Ingeniería, 2001.
- 6.- Carlos Meléndez Martínez, Claudio A. Escalante y Luis A. Morales, Curso de capacitación: aguas residuales y plantas de tratamiento, BICTEC, 1987.
- 7.- Proyecto ejecutivo de procesos de la planta de tratamiento de aguas residuales de Cerro de la Estrella, Diseño hidráulicos y tecnología ambiental, 1987.
- 8.- D.G.C.O.H. Tratamiento avanzado del agua residual planta Cerro de la Estrella, 1991.
- 9.- Rodrigo Figueroa, Sistemas de Aguas del D. F., 1998.
- 10.- Jairo A. Romero Rojas, Calidad del agua, Editorial Alfaomega, 1999.
- 11.- McGhhe, Ingeniería Ambiental, 1999.
- 12.- Vicente Fuentes Guridi, Evaluación técnico-económica del tratamiento de las aguas residuales Municipales en México, 2001

-
- 13.- Velia Adriana Leyva Campos, Aspectos de Ingeniería Civil en las plantas de tratamiento de aguas residuales, 1998.
 - 14.- Comisión Nacional del Agua, El agua en México: retos y avances, 2001.
 - 15.- Comisión Nacional del Agua, Programa Nacional Hidráulico 2001-2006, 2001.
 - 16.- Comisión Nacional del Agua, Ley de Aguas Nacionales, 1992.
 - 17.- NOM-001-CNA-1996, Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, 1996.
 - 18.- NOM-002-CNA-1996, Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, 1996.
 - 19.- NOM-003-CNA-1997, Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, 1996.