



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DEL ESTADO DE MÉXICO  
FACULTAD DE QUÍMICA**



**“EVALUACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE PLANTAS DE  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UN  
MUNICIPIO DEL SURESTE DE MÉXICO”**

**TESINA**

**Que para obtener el título de:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**Presentan:**

**MAYTE MARGARITA RONCES ROBLES**

**Asesor académico:**

**DR. CÉSAR PÉREZ ALONSO**

**Toluca, México, 2018**

## Índice

INTRODUCCIÓN .....	6
1. ANTECEDENTES.....	7
1.1 AGUA RESIDUAL DE ENTRADA.....	7
1.1.1 RELACIÓN TRATAMIENTO Y CALIDAD DE AGUA DE ENTRADA .....	7
1.2 CALIDAD DEL AGUA .....	9
1.2.1 MARCO NORMATIVO.....	9
1.2.2 LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE DESCARGA.....	10
1.3 UNIDADES DE PROCESO QUE CONFORMAN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES .....	13
1.3.1 TRATAMIENTO PRELIMINAR.....	14
1.3.2 TRATAMIENTO PRIMARIO .....	15
1.3.3 TRATAMIENTO SECUNDARIO .....	17
1.3.4 CLORACIÓN .....	20
1.3.5 TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LOS LODOS .....	21
1.4 CRITERIOS DE DISEÑO.....	27
1.5 SEGURIDAD EN EL TRABAJO .....	29
1.6 MANTENIMIENTO DE LA PLANTA Y DEL EQUIPO .....	30
2. JUSTIFICACIÓN .....	32
3. OBJETIVOS .....	33
3.1 OBJETIVO GENERAL .....	33
3.2 OBJETIVOS PARTICULARES.....	33
4. METODOLOGÍA.....	34
4.1 TIPOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES .....	34
4.2 GUÍA DE EVALUACIÓN .....	36
4.3 EVALUACIÓN DE LAS UNIDADES DE PROCESO .....	41
5. RESULTADOS.....	48
5.1 CALIDAD DE AGUA DE SALIDA.....	48
5.2 EVALUACIÓN DEL DISEÑO DE LAS UNIDADES DE PROCESO .....	49
5.3 EVALUACIÓN FUNCIONAL DE PROCESOS. ....	51
5.4 EVALUACIÓN DE INFRAESTRUCTURA CIVIL. ....	54

5.5. EVALUACIÓN DE INFRAESTRUCTURA ELÉCTRICA Y EQUIPOS ELECTROMECÁNICOS.	56
5.6 PUNTOS CRÍTICOS .....	58
5.7 LODOS GENERADOS.....	59
5.8 ASPECTOS AMBIENTALES, SEGURIDAD E HIGIENE .....	60
5.9 INVERSIÓN A CORTO PLAZO .....	60
6. CONCLUSIONES.....	62
BIBLIOGRAFÍA .....	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema ejemplo de tren de proceso de tratamiento de aguas negras .....	14
Figura 2. Esquema de sedimentador rectangular. ....	16
Figura 3. Esquema de sedimentador circular.....	16
Figura 4. Esquema de filtros percoladores. ....	17
Figura 5. Diagrama del proceso de lodos activados en las plantas B-E.....	19
Figura 6. Diagrama de proceso de lodos activados en la planta A.....	19
Figura 7. Diagrama del proceso de digestión aerobio de lodos. ....	22
Figura 8. Esquema de lechos de secado. ....	24
Figura 9. Esquema de un equipo filtro banda. ....	25
Figura 10. Diagrama de proceso de una planta de tratamiento tipo filtros percoladores ..	35
Figura 11. Diagrama de proceso de una planta de tratamiento tipo lodos activados.....	35
Figura 12. Eficiencias de remoción de contaminantes.....	48

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Sólidos Suspendidos Totales .....	12
Ecuación 2. Caudal medio (L/s) .....	41
Ecuación 3. Coeficiente de Harmon .....	42
Ecuación 4. Caudal máximo (L/s).....	42
Ecuación 5. Velocidad del agua a flujo máximo (m/s).....	42
Ecuación 6. Tiempo de retención (s) .....	43
Ecuación 7. Velocidad horizontal o del agua (m/s) .....	43
Ecuación 8. Tiempo de retención (hr) .....	43
Ecuación 9. Carga Hidráulica Superficial a $Q_{med}$ ( $m^3/m^2d$ ) .....	43
Ecuación 10. Carga Hidráulica Superficial a $Q_{max}$ ( $m^3/m^2d$ ).....	43
Ecuación 11. Carga Hidráulica Superficial a $Q_{med}$ con recirculación ( $m^3/m^2d$ ).....	44
Ecuación 12. Carga Hidráulica Superficial ( $L/s/m^2$ ) .....	44
Ecuación 13. DBO entrada del biofiltro (mg/L) .....	44
Ecuación 14. Carga orgánica influente (kg/d) .....	45
Ecuación 15. Edad de lodos (días) .....	45
Ecuación 16. Relación F/M (kg DBO5/d /kg SSVLM) .....	45
Ecuación 17. Carga Orgánica Volumétrica ( $kg/m^3d$ ) .....	45
Ecuación 18. Tiempo de retención (h).....	46
Ecuación 19. Tiempo de retención (min) .....	46
Ecuación 20. Masa de DBO removida (kg/d).....	46
Ecuación 21. Masa de Lodo Seco (kg/d).....	46
Ecuación 22. Masa de Sólidos Totales (kg/d) .....	47
Ecuación 23. Volumen de lodos ( $m^3/d$ ).....	47
Ecuación 24. Tiempo de Retención (hr) .....	47
Ecuación 25. Carga Volumétrica de líquidos ( $kg/m^3d$ ).....	47
Ecuación 26. Área requerida ( $m^2$ ).....	47
Ecuación 27. Masa de lodos (kg/d).....	47
Ecuación 28. Masa de sólidos volátiles (kd/d).....	47
Ecuación 29. Masa de sólidos volátiles efluente (kd/d) .....	47

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición típica de agua residual doméstica. ....	8
Tabla 2. Límites máximos permisibles de los parámetros NOM-001-SEMARNAT-1996.....	10
Tabla 3. Principales procesos de tratamiento de agua residual municipal.....	19
Tabla 4. Tipos de desinfectantes de agua .....	21
Tabla 5. Factores o variables que influyen en los procesos. ....	27
Tabla 6. Parámetros de diseño para plantas de tratamiento de aguas residuales.....	28
Tabla 7. Relación de capacidad de diseño y tipo de tratamiento de las plantas de estudio	35
Tabla 8. Evaluación de proceso recorrido en la planta. ....	37
Tabla 9. Evaluación de infraestructura civil recorrido en la planta.....	39
Tabla 10. Evaluación de infraestructura eléctrica y equipos electromecánicos, recorrido en la planta. ....	40
Tabla 11. Resultados de calidad de agua de salida. ....	48
Tabla 12. Resultados de los criterios de diseño. ....	50
Tabla 13. Resultados de la evaluación funcional de procesos. ....	51
Tabla 14. Resultados de la evaluación infraestructura civil. ....	55
Tabla 15. Resultados de la evaluación infraestructura eléctrica y equipos electromecánicos. .....	56

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día en México, los problemas de contaminación de agua son muy grandes, sin embargo, muchas veces se sigue en la ilusión de un interminable abastecimiento de agua, por lo cual no se ha dado importancia a las soluciones de administración de este recurso creando una ética del agua para resolver estos problemas.

El agua al ser usada por el hombre, se convierte en agua de desecho, la cual debe ser tratada antes de ser regresada al medio ambiente, razón por la cual surge la necesidad dentro del servicio de saneamiento de una población, construir plantas de tratamiento de agua residual, con el objetivo de depurar la materia orgánica, reduciendo la carga contaminante que va a desembocar a las redes de drenaje o algún receptor de agua, devolviéndole a la naturaleza el vital líquido en buen estado y sin contaminación.

Uno de los grandes desafíos hídricos que se enfrentan a nivel global es dotar de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento a la población, debido, por un lado, al crecimiento demográfico acelerado y por otro, a las dificultades técnicas, cada vez mayores, que conlleva hacerlo. Contar con estos servicios en el hogar es un factor determinante en la calidad de vida y desarrollo integral de las familias.

Un sistema de agua de agua y saneamiento dentro de una entidad es responsable por la prestación de los servicios de potabilización, distribución de agua, drenaje sanitario y saneamiento. Esta tarea representa grandes retos, como lo es realizar su tarea de manera adecuada, generando pasivos y sobreviviendo de forma deficitaria con aportaciones de recursos federales e implementando la estrategia de pago anual anticipado para obtención de recursos inmediatos. Sin embargo, las crecientes demandas añadidas al sistema y los insuficientes recursos económicos dificultan el mantenimiento y conservación de la infraestructura, generando discontinuidad y mala calidad en los servicios prestados, por lo que era necesario tener más recursos económicos que permitieran brindar un servicio digno.

En este sentido se realizó un **Pre-Diagnóstico Técnico Integral** para evaluar rápidamente y redefinir los lineamientos y estrategias de acuerdo a las necesidades actuales de operación y mantenimiento del sistema de agua y saneamiento de un municipio del sureste del país, mostrando en este trabajo la evaluación de las cinco plantas de tratamiento de aguas residuales más grandes de este municipio con el fin de determinar si se encuentren diseñadas adecuadamente, y cuenten con una infraestructura más eficiente, segura y sustentable que cumpla con las normas de calidad.

## 1. ANTECEDENTES

### 1.1 AGUA RESIDUAL DE ENTRADA

Las aguas residuales son fundamentalmente las aguas de abastecimiento de una población, después de haber sido impurificadas por diversos usos.

Se pueden definir según su procedencia, por uso del hombre y la cantidad de sustancias y/o microorganismos, debido a que pueden llegar a representar un peligro y deben ser desechadas.

Dentro de este concepto se incluyen:

- *Aguas residuales domésticas o aguas negras*: son las que contiene desechos humanos, animales y caseros. También se incluye la infiltración de aguas subterráneas. Suelen contener gran cantidad de materia orgánica y microorganismos, así como restos de jabones, detergentes y grasas.
  - *Aguas blancas*: pueden ser de procedencia atmosférica (lluvia, nieve o hielo) o del riego y limpieza de calles, parques y lugares públicos. En aquellos lugares en que las precipitaciones atmosféricas son muy abundantes, éstas pueden de evacuarse por separado para que no saturen los sistemas de depuración.
  - *Aguas residuales industriales*: proceden de los procesamientos realizados en fábricas y establecimientos industriales y contienen aceites, detergentes, antibióticos, ácidos y grasas y otros productos y subproductos de origen mineral, químico, vegetal o animal. Su composición es muy variable, dependiendo de las diferentes actividades industriales.
  - *Aguas residuales agrícolas*: procedentes de las labores agrícolas en las zonas rurales.
- [1]

Para este estudio se revisaron las cinco plantas más grandes e importantes de un municipio del sureste de México. El agua residual de estas plantas de tratamiento es de origen doméstico, ya que proviene de 127 colonias que equivale a 364, 053 habitantes los cuales representan el 52 % de la población del municipio.

#### 1.1.1 RELACIÓN TRATAMIENTO Y CALIDAD DE AGUA DE ENTRADA

La calidad del agua de abastecimiento cambia de manera importante de una fuente a otra. Por ello, el tipo de tratamiento requerido para tratar agua también varía. Dependiendo de la problemática de la calidad del agua de abastecimiento es el grado de complejidad del tratamiento. El diseño de una planta de tratamiento eficiente y económica requiere de un estudio de ingeniería cuidadoso. Dicho estudio debe basarse en la calidad de la fuente y de la selección apropiada de los procesos y operaciones de tratamiento más adecuados y económicos para tratar el agua con la calidad requerida.

El parámetro de polución orgánica más utilizado y aplicable a las aguas residuales es la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). Supone esta determinación la medida del oxígeno disuelto utilizado por los microorganismos en la oxidación bioquímica de materia orgánica biodegradable. La medida de la DBO es importante en el tratamiento de aguas residuales y para la gestión técnica de la calidad de agua debido a que se utiliza para determinar la cantidad aproximada de oxígeno que se requerirá para estabilizar biológicamente la materia orgánica.

Otro parámetro importante a considerar son las altas concentraciones de Nitrógeno derivados de la mezcla de efluentes de aguas domesticas combinados con efluentes de tierras agrícolas e industriales, dado que la velocidad con la que se aportan estas sustancias es mayor que la velocidad con la que se degradan, por lo que el sistema debe contar con una unidad de tratamiento de desnitrificación especial.

En la tabla 1, se presentan datos típicos de los constituyentes encontrados en un agua residual doméstica:

Tabla 1. Composición típica de agua residual doméstica.

Componente	Intervalo de concentraciones		
	Alta	Media	Baja
Materia sólida, mg/L	1200	720	350
disuelta total	850	500	250
inorgánica	525	300	145
orgánica	325	200	105
en suspensión	350	220	100
inorgánica	75	55	20
orgánica	275	165	80
Sólidos decantables, ml/L	20	10	5
DBO5 a 20°C, mg/L	400	220	110
Carbono Orgánico total, mg/L	290	160	80
DQO, mg/L	1000	500	250
Nitrógeno, mg/L N <sub>2</sub> , total	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoníaco	50	25	12
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
Fósforo, mg/L P, total	15	8	4
orgánico	5	3	1
Inorgánico	10	5	3
Cloruros	100	50	30
Alcalinidad, mg/L CaCO <sub>3</sub>	200	100	50
Grasa, mg/L	150	100	50

El influente de las cinco plantas de tratamiento se encuentra en el intervalo de concentraciones media para una composición típica de agua residual doméstica. [2]

## 1.2 CALIDAD DEL AGUA

Es de vital importancia para la salud pública y el medio ambiente que la comunidad cuente con un servicio de tratamiento de aguas residuales. Esto permite:

- Garantizar que no existirán efectos nocivos a la salud a causa de virus y bacterias.
- Proteger la flora y la fauna presentes en el cuerpo receptor natural al que las aguas residuales son vertidas.
- Impulsar el rehusó de agua tratada en el riego de aguas verdes o para servicios industriales.

Para lograr este propósito, la calidad del agua tratada debe cumplir con lo estipulado en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 o en casos particulares con las condiciones particulares de descarga que establece CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) en los permisos de concesión. Dichos documentos oficiales definen las características físicas, químicas y microbiológicas del agua. Por otra parte, si el agua tratada es requerida para otros diversos usos, por ejemplo, para la industria o el riego de aguas verdes, son aplicables otros grados de calidad y otras normativas. [5]

### 1.2.1 MARCO NORMATIVO

En México, las leyes y reglamentos existentes en materia de agua potable confieren atribuciones y funciones a diversas dependencias gubernamentales, ya sea como encargados de la prestación de este servicio o bien de su vigilancia. Estos ordenamientos jurídicos enmarcan los lineamientos requeridos en forma clara y precisa hasta converger en la acción concreta de asegurar y certificar la calidad del agua.

La CONAGUA se encarga en lo referente a la explotación, aprovechamiento y usos del agua.

Las principales normativas que regulan los sistemas de abastecimiento y distribución de agua tratada son:

- Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Publicada el 6 de enero de 1997.
- Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Publicada el 3 de junio de 1998.
- Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Publicada el 21 de septiembre de 1998.

- Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental. Lodos y biosólidos; establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de posibilitar su aprovechamiento o disposición final y proteger al medio ambiente y la salud humana. Publicada el 18 de febrero de 2002.
- Norma Oficial Mexicana NOM-087-ECOL-SSA1-2002, Protección ambiental. Salud ambiental. Residuos peligrosos biológico-infecciosos establece la clasificación de los residuos peligrosos biológico-infecciosos, así como las especificaciones para su manejo. Esta Norma Oficial Mexicana es de observancia obligatoria para los establecimientos que generen residuos peligrosos biológico-infecciosos y los prestadores de servicios a terceros que tengan relación directa con los mismos.
- Permisos de concesión o descarga, por el cual se obtiene el permiso para la descarga de aguas residuales que se genera en cuerpos receptores, terrenos que sean bienes nacionales o en otros terrenos a través de los que se puedan contaminar el subsuelo o los mantos acuíferos. Se otorga a la permisionaria indicando la ubicación, la descripción y los límites máximos permisibles para la descarga de aguas residuales. La fecha de emisión y vigencia del permiso es específica.

### 1.2.2 LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE DESCARGA

Los límites máximos permisibles de descarga son el valor o intervalo asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido en la descarga de aguas residuales. Al respecto se tiene que para las cinco plantas que se revisaron en este proyecto, la Ley Estatal de Protección del Estado (Ley No. 62), prevé el cumplimiento de las Normas Mexicanas Vigentes, por lo que los límites máximos permisibles de calidad del agua residual a descargar por estas PTARS se regulan por la NOM-001-SEMARNAT-1996:

Tabla 2. Límites máximos permisibles de los parámetros NOM-001-SEMARNAT-1996.

Parámetro (mg/l.; excepto cuando se especifique)	Promedio Mensual	Promedio Diario
Temperatura (°C)	40	40
Grasas y aceites	15	25
Materia Flotante	Ausente	Ausente
Sólidos Sedimentables (mL/L)	1	2
Sólidos Suspendidos Totales	75	125
DBO <sub>5</sub>	75	150
Nitrógeno Total	40	60
Fósforo Total	20	30
Coliformes Fecales (NMP/100 mL)	1000	2000

### **Materia Flotante**

El sistema de alcantarillado solamente debe conducir las aguas residuales domésticas, las pluviales provenientes de las construcciones y cuando se considere a las aguas de corriente pluvial. No obstante, la mala costumbre y falta de concientización de los usuarios, en ocasiones en el sistema de alcantarillado se presentan cantidades grandes de basura, ocasionando problemas como, obstrucción de tuberías que interconectan a las diferentes estructuras. La cantidad de la materia está en función del estándar de vida de la población, siendo mayor cuando más elevada sea y viceversa.

### **Olor**

Las aguas residuales frescas contienen un pequeño porcentaje de oxígeno disuelto del orden de 0.5 a 1.5 mg/L, por lo que el olor no es ofensivo, cuando el oxígeno se agota y se tiene en condiciones sépticas se obtiene una condición anaerobia produciendo gases como el sulfuro, el cual es característico de olores ofensivos.

### **Color**

Este parámetro es importante ya que es un reflejo del estado de las aguas residuales, en localidades pequeñas en las que los tiempos de las aguas en las tuberías es corto, el color es café claro.

### **Temperatura**

La temperatura de las aguas residuales es ligeramente superior a la que se suministra a la población, debido a los diferentes usos que se tienen del agua caliente. También se presenta una variación de temperatura de acuerdo al clima de la zona. La temperatura impacta de manera directa a la actividad microbiana, por lo cual es un parámetro importante por su efecto en la vida acuática, en las reacciones químicas o para usos benéficos.

Por ejemplo, el oxígeno es menos soluble en agua caliente que en fría, el incremento en la proporción de reacciones bioquímicas acompañado del incremento de temperatura en las aguas superficiales, muchas veces puede crear serios agotamientos en las concentraciones de oxígeno disuelto o durante el composteo la temperatura del lodo alcanza los 40 °C o más alta en cinco días.

### **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)**

Es la cantidad de oxígeno que se requiere para la oxidación aerobia biológica de sólidos orgánicos de las aguas residuales. Como esta descomposición requiere un periodo grande de tiempo y depende de la temperatura, los valores de la DBO de las pruebas de laboratorio deben especificarse, generalmente los más empleados son 5 días y 20°C.

### **DQO**

Es el contenido de materia orgánica en aguas residuales que tengan compuestos tóxicos para la vida biológica. La DQO indicara la presencia de sustancias toxicas y de sustancias orgánicas resistentes a la biooxidación. El equivalente de oxígeno en la materia orgánica se

mide utilizando un fuerte agente químico oxidante en medio ácido, el dicromato de potasio resulta excelente para este fin.

### **Sólidos Suspendidos Totales (SST)**

Porción de los sólidos totales retenidos en un filtro con un poro específico, después de una suspensión de 10 min de asentamiento, se miden después de ser secados a una temperatura específica (105°C). El filtro usado más comúnmente es el filtro de fibra de vidrio, que tiene un poro nominal de 1.58 µm. Se usan filtros de tipo Gooch de porcelana previamente tarados, los filtros se secan a 105°C, después de la filtración, se ponen a enfriar en el desecador a temperatura ambiente y después se pesan. Los sólidos suspendidos totales se determinan usando la siguiente fórmula:

Ecuación 1. Sólidos Suspendidos Totales

$$SST = \frac{(M4 - M5)}{V}$$

donde:

M4 = masa del filtro después de secarse a 105 °C (mg)

M5 = masa del filtro inicial (mg)

V = Volumen de la muestra (L)

### **Sólidos Sedimentables**

El volumen ocupado por los sólidos sedimentables de una muestra en un periodo específico de tiempo. La prueba se lleva a cabo con un cono Imhoff durante un periodo de tiempo de 45 – 60 min.

### **Grasas y aceites**

Pueden ser grasas minerales y vegetales, detergentes, desechos de alimentos, desechos plásticos, papel, algodón y materiales similares. Gravedad específica entre 1.0 y 0.95.

### **Nitrógeno Total**

El Nitrógeno total está compuesto por el nitrógeno amoniacal más el nitrógeno orgánico, y este está constituido por las formas de nitrógeno correspondientes al nitrato, nitrito y amonio. El amoníaco es uno de los componentes transitorios en el agua, ya que es parte del ciclo del nitrógeno y se ve influido por la actividad biológica.

### **Fósforo Total**

El fósforo generalmente se encuentra como fosfatos. Éstos se clasifican como ortofosfatos, fosfatos condensados y compuestos organofosfatados. Estas formas de fosfatos provienen de una gran cantidad de fuentes, tales como productos de limpieza, fertilizantes, procesos biológicos, etc. El fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de organismos, por lo que la descarga de fosfatos en cuerpos de aguas puede estimular el crecimiento de macro y microorganismos fotosintéticos en cantidades nocivas.

### Coliformes Fecales

Son aquellas características bacteriológicas debidas a microorganismos nocivos a la salud humana. Para efectos de control sanitario se determina el contenido de indicadores generales de contaminación microbiológica. [6]

### 1.3 UNIDADES DE PROCESO QUE CONFORMAN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El tratamiento de aguas residuales es un proceso por el cual los sólidos que el líquido contiene son separados parcialmente, haciendo que el resto de los sólidos orgánicos complejos queden convertidos en sólidos minerales u orgánicos relativamente estables. La magnitud de este cambio depende del proceso de tratamiento empleado. Una vez completado todo proceso de tratamiento es necesario disponer de los líquidos y sólidos que se hayan generado.

Los procesos de tratamiento de aguas residuales se integran con operaciones y procesos unitarios. En las operaciones unitarias, la remoción de los contaminantes se realiza por fuerzas físicas. En los procesos unitarios, el tratamiento se realiza con reacciones químicas y biológicas.

El conjunto de operaciones unitarias y procesos unitarios es conocido como tren de tratamiento o tren de proceso. Las consideraciones que se deben tomar en cuenta para seleccionar un tren de tratamiento dependen de las características de calidad del agua de abastecimiento. Entre éstas podemos encontrar: las variaciones en el tiempo, los límites permisibles en la normativa vigente, las condiciones del sitio para construcción de la planta, la tecnología disponible, la economía del proceso y muchos otros factores.

El objetivo es separar de las aguas negras la cantidad suficiente de sólidos que permita que los que queden al ser descargados a las aguas receptoras no interfieran con el más adecuado uso de estas.

Los factores básicos que influyen en la selección de los procesos de tratamiento son:

- a) Especificaciones del agua tratada
- b) Calidad del agua de abastecimiento y sus variaciones
- c) Condiciones económicas y sociales particulares
- d) Costos relativos de los diferentes procesos de tratamiento, referentes a la inversión, operación y mantenimiento

La selección de los procesos estará influenciada primordialmente por los requisitos del efluente y la calidad del agua cruda y será facilitada por investigaciones de campo y pruebas de laboratorio. En plantas de gran magnitud será conveniente realizar pruebas en plantas piloto. En la figura 1 se puede observar un tren general de tratamiento de aguas negras. [1]

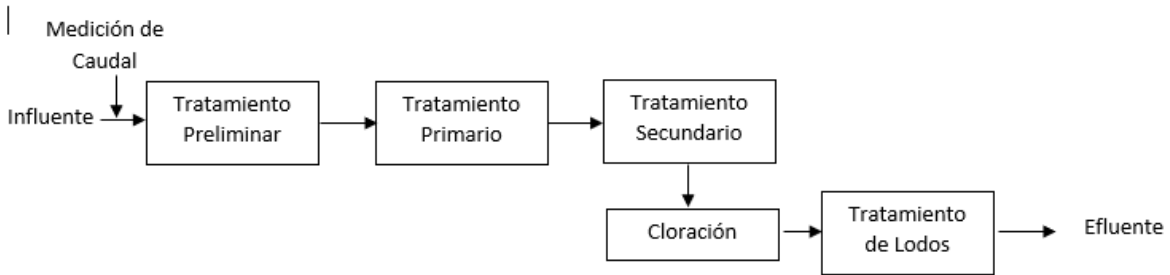


Figura 1. Esquema ejemplo de tren de proceso de tratamiento de aguas negras

### 1.3.1 TRATAMIENTO PRELIMINAR

En la mayoría de las plantas, el tratamiento preliminar sirve para proteger el equipo de bombeo y hacer más fáciles los procesos subsecuentes del tratamiento. Los dispositivos para el tratamiento preliminar están destinados para:

- Eliminar y separar los sólidos mayores o flotantes, como trozos de madera, telas, papel, junto con algo de material fecal.
- Separar los sólidos inorgánicos pesados, como la arena.
- Separar las cantidades excesivas de aceites y grasas.

Para lograr los objetivos de un tratamiento preliminar se emplean comúnmente los siguientes dispositivos:

#### **Cribado grueso o fina.**

Están formadas por barras usualmente espaciadas desde 2 hasta 15 cm. Generalmente tienen claros de 2.5 a 5 cm. La regla general es que deben instalarse en un ángulo de 45 a 60 grados con la vertical. Se limpian manualmente o por medio de rastrillos automáticos. Es común que los sólidos separados por estos utensilios se eliminan enterrándolos o incinerándolos.

#### **Microcribas**

Las cribas con aberturas de 3 mm o menos, se clasifican como cribas de banda, de disco y de tambor, las cuales no se consideran adecuadas para el tratamiento de aguas residuales, salvo algunos casos excepcionales.

#### **Desmenuzadores**

Los molinos, cortadoras o trituradoras, son dispositivos que sirven para cortar los sólidos hasta un tamaño tal que permita que sean reintegradas a las aguas residuales sin peligro de obstruir las bombas y tubería. Pueden estar en combinación con las cribas en un mismo canal por donde fluyan las aguas residuales o de manera separada en la planta.

## Desarenadores

Las aguas negras contienen, por lo general, cantidades grandes de sólidos inorgánicos como arena, ceniza y grava, a los que generalmente se les llama *arena*. La cantidad es muy variable y depende de muchos factores; pero principalmente de si el alcantarillado colector es de tipo sanitario o combinado. La presencia de grandes volúmenes de arena ocasiona diversos problemas en los equipos y líneas de conducción, así como en el proceso de tratamiento, es decir, provocan un desgaste sustancial principalmente en los impulsores de las bombas de agua cruda por la abrasión que ocasiona o la acumulación de arenas en las tuberías, aspectos que se reflejan impactantes en el aumento del volumen de reactivos químicos utilizados y mayores intervenciones del personal de mantenimiento.

Por esta razón es práctica común eliminar este material por medio de cámaras desarenadoras, las cuales se diseñan en forma de grandes canales. En estos canales la velocidad disminuye lo suficiente para que se depositen los sólidos inorgánicos pesados manteniéndose en suspensión el material orgánico. Esto último se logra instalando varios desarenadores para que el flujo se ajuste en ellos mediante vertederos proporcionales colocados al final de cada canal o mediante otros dispositivos que permitan regular la velocidad del flujo. [4]

### 1.3.2 TRATAMIENTO PRIMARIO

Por este tratamiento se separan o eliminan la mayoría de los sólidos suspendidos en las aguas residuales, aproximadamente un 40 a 60 por ciento, mediante el proceso físico de asentamiento en tanques de sedimentación. La actividad biológica en las aguas residuales durante este proceso, tiene escasa importancia.

El propósito fundamental de los dispositivos para el tratamiento primario, consiste en disminuir suficientemente la velocidad de las aguas residuales para que puedan sedimentarse los sólidos. Por consiguiente, a estos dispositivos se les puede distinguir bajo el nombre de tanques de sedimentación y de acuerdo a su diversidad y diseño pueden dividirse en:

#### **Tanques de sedimentación simple**

En estos tanques los sólidos asentados se substraen continuamente o a intervalos frecuentes, para no dar tiempo a que se desarrolle la descomposición con formación de gases. Los sólidos pueden irse acumulando por gravedad en una tolva o embudo, de donde se bombean o descargan por la acción de presión hidrostática o por el uso de equipo mecánico (bombas).

#### *Tanques de sedimentación simple con eliminación mecánica de lodos*

- Estos tanques pueden ser rectangulares, circulares o cuadrados, pero todos operan por el mismo principio de recolectar los sólidos sedimentados por medio de rastras de movimiento lento que los empujan hacia el sitio de descarga. En los tanques rectangulares, las rastras se fijan cerca de las orillas a una cadena sin fin que pasa

sobre engranes o ruedas dentadas, accionadas por medio de motores. Las rastras se hacen pasar lentamente rozando el fondo del tanque, empujando los sólidos sedimentables a una tolva de lodos localizada en el extremo de entrada del tanque, luego son levantadas por la cadena hacia la superficie del tanque, en donde, parcialmente sumergidas, sirven para empujar los sólidos flotantes, las grasas y los aceites a un recolector de natas situado en el extremo de salida del tanque. El efluente de las aguas residuales entra por un extremo y fluyen horizontalmente hacia el otro extremo.

- Los tanques circulares tienen armaduras horizontales fijas a un eje central impulsado por un motor. El fondo de los tanques está inclinado hacia el centro y las rastras mueven a los sólidos sedimentados hacia la tolva o embudo de lodos que hay en el centro. Las armaduras desnatadoras están sujetas a la flecha central en la superficie, para recolectar los sólidos flotantes, grasas y los aceites. El efluente de las aguas residuales entra en el centro y fluye radialmente, en sentido hacia los alrededores.
- En los tanques cuadrados el mecanismo es similar al de los tanques circulares. La diferencia principal es que en una o varias armaduras rígidas, están equipadas con paletas articuladas, las cuales llegan hasta las cuatro esquinas del tanque y arrastran los sólidos de estas zonas hacia la trayectoria circular del mecanismo. El efluente puede entrar en el centro y fluir hacia los cuatro lados, o entrar por un lado y atravesar el tanque.
- Existe otro tipo, los clarificadores de flujo ascendente, se caracterizan por que lleva a las aguas residuales de alimentación cerca del fondo del tanque, de donde fluyen hacia arriba y radialmente a través de la capa de lodos, hacia la salida de la periferia.

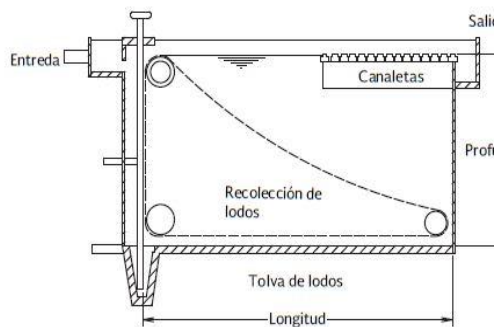


Figura 2. Esquema de sedimentador rectangular.

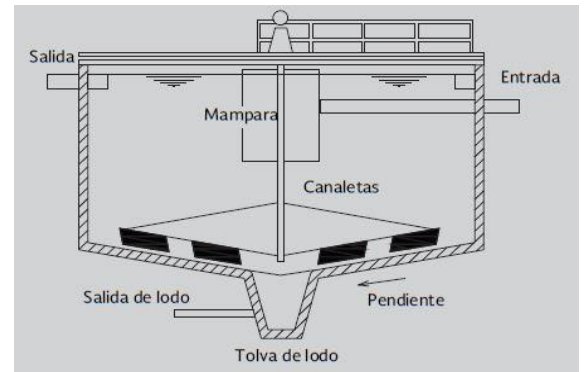


Figura 3. Esquema de sedimentador circular.

### Filtros percoladores

Un filtro percolador es un dispositivo que pone en contacto las aguas residuales sedimentadas con cultivos biológicos; son unidades resistentes en operación y estables en funcionamiento.

Por economía, los filtros deben ser precedidos por tanques de sedimentación primaria con colectores de natas, permitiendo aprovechar al máximo su capacidad, haciendo fácilmente

sedimentables a los sólidos no sedimentables, coloidales y disueltos. Estos sólidos orgánicos en su mayor parte, no son separados de las aguas residuales, sino que se convierten en parte integrante de los organismos vivos microscópicos o de la materia orgánica estable que, gracias a este mecanismo, se adhiere temporalmente al medio filtrante, para después desprenderse eventualmente y ser arrastrado por el efluente del filtro.

Un filtro percolador típico, consiste de tres partes:

- a) *Lecho o medio filtrante.* El cuál depende la disponibilidad y el costo de acarreo. Este producto debe ser homogéneo, duro, limpio e insoluble en las aguas residuales.
- b) *Un sistema recolector.* Los colectores satisfacen dos propósitos: Retirar las aguas residuales que han pasado a través del filtro para aplicarles el tratamiento subsecuente y se disponga de ellas y proporcionar ventilación al filtro para mantenerlo en condiciones aerobias, dependiendo de la diferencia de temperaturas.
- c) *Un mecanismo para distribuir uniformemente las aguas residuales sobre la superficie del filtro.* La cual se realiza en la superficie a través de aspersores fijos o distribuidores giratorios.

Los filtros percoladores solamente alteran las características de los sólidos de las aguas residuales, no los eliminan. [1]

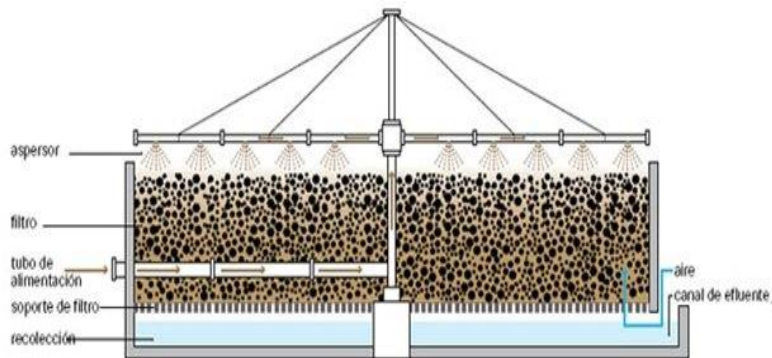


Figura 4. Esquema de filtros percoladores.

### 1.3.3 TRATAMIENTO SECUNDARIO

Este tratamiento depende principalmente de que se realice un proceso biológico de contacto, en el que los organismos aerobios y los sólidos orgánicos, se mezclan con un medio ambiente favorable para la descomposición aeróbica de sólidos orgánicos hasta transformarlos en sólidos inorgánicos o en sólidos orgánicos estables.

La eficacia de este proceso depende de que se mantenga oxígeno disuelto en las aguas residuales durante todo el tratamiento.

### **Lodos activados**

Las aguas residuales contienen sólidos suspendidos y coloidales, de manera que cuando se agitan en presencia de aire, los sólidos suspendidos forman núcleos sobre los cuales se desarrolla la vida biológica formando partículas más grandes que se conocen como: lodos activados, los cuales, a través de sus organismos vivos, tienen la propiedad de absorber y adsorber la materia orgánica coloidal disuelta, convirtiéndola en sólidos insolubles no putrescibles, que son a su vez compuestos más simples que ya no puedan ser usados como alimentos por las bacterias.

La generación de flóculos en las aguas residuales es un proceso lento, de manera que la cantidad formada en cualquier volumen de aguas negras, durante su periodo de tratamiento es muy corta e inadecuada para tratar rápidamente y eficazmente las aguas residuales, pues se requiere de una gran concentración de flóculos.

Esta gran concentración se logra recolectando los lodos producidos por cada volumen de aguas residuales tratadas y usándolos nuevamente para el tratamiento de volúmenes subsecuentes de aguas residuales. Los lodos que se vuelven a emplear en esta forma se conocen como *lodos recirculados*. Como se trata de un proceso acumulativo naturalmente se producirá mayor cantidad de lodos activados de la que se requiere; la excesiva acumulación se retira y acondiciona para su disposición final.

Los lodos activados requieren de algún método de agitación o aeración, con el fin de lograr tres objetivos: el mezclado de los lodos recirculados con las aguas residuales, mantener los lodos en suspensión durante su periodo de contacto el suministro de oxígeno que se requiere para la oxidación biológica.

#### *Método convencional de lodos activados*

1. Mezclado de los lodos activados con las aguas residuales que se van a tratar.
2. Aereación y agitación de este licor mezclado durante el tiempo necesario.
3. Separación de los lodos activados del licor mezclado.
4. Recirculación de la cantidad adecuada de los lodos activados, para mezclarlos con las aguas residuales.
5. Disposición del exceso de lodos activados.

Se han realizado algunas modificaciones al método convencional con el propósito de lograr diferentes condiciones.

#### *Lodos activados – aeración extendida*

Se diferencia del convencional por el tiempo de retención hidráulico. Este periodo de aereación permite que las aguas residuales y lodo sean parcialmente digeridos en el tanque aereador, permitiendo su disposición sin ser necesaria una gran capacidad de digestión. [2]

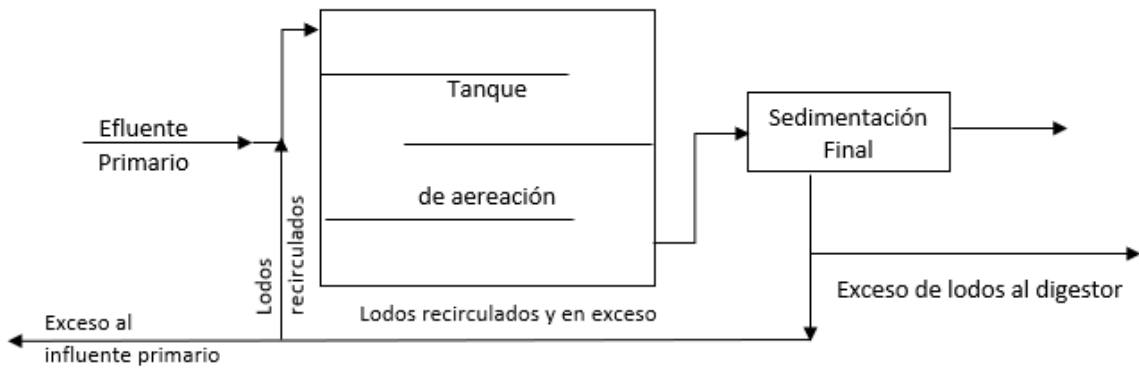


Figura 5. Diagrama del proceso de lodos activados en las plantas B-E.

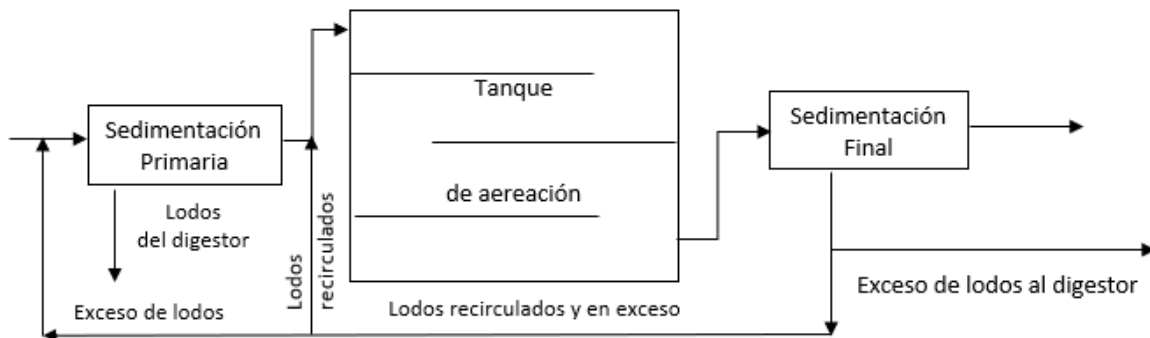


Figura 6. Diagrama de proceso de lodos activados en la planta A.

En México, la mayoría de sus plantas de tratamiento de aguas residuales cuentan con un proceso de tratamiento de lodos activados como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Principales procesos de tratamiento de agua residual municipal. [7]

Proceso	Volumen tratado (%)
Lodos activados	46.43
Lagunas de estabilización	15.59
Lagunas aeradas	8.11
Tratamiento primario avanzado	11.14
Filtros biológicos	5.37
Dual	4.74
Otros procesos	8.63

### Tanques de Sedimentación Secundaria

Como los filtros percoladores solamente alteran las características de los sólidos de las aguas residuales, pero no los eliminan, el efluente contiene sólidos suspendidos que deben ser eliminados antes de que se descargue el efluente a aguas receptoras. Para este

propósito se usan tanques de sedimentación secundaria o asentamiento final; los cuales son de diseño similar a los descritos anteriormente.

En las plantas de tratamiento pequeñas, no es necesario contar con un tanque de sedimentación primaria; sin embargo, debe contar con un tanque de sedimentación secundaria debido a que, el agua residual del tratamiento biológico es principalmente microorganismos suspendidos y muy poco desecho orgánico, estas unidades ayudaran a separar el agua residual tratada de la población de microorganismos y devolver la mayor parte de los microorganismos al tanque de lodos activados. [1,2]

#### 1.3.4 CLORACIÓN

El cloro es uno de los elementos más comunes para la desinfección de aguas, desactivación de la gran mayoría de microorganismos y es relativamente barato; puede introducirse en forma de gas, de solución acuosa o en forma de hipoclorito, ya sea de sodio o de calcio. Como es una sustancia sumamente activa que reacciona con muchos compuestos, dando productos muy diversos, es importante determinar en qué etapa o etapas del proceso de tratamiento es necesaria su acción de acuerdo al propósito requerido.

La cloración en las aguas residuales consiste en la aplicación de cloro para lograr alguno de los propósitos siguientes:

- *Desinfección o destrucción de organismos patógenos.* Ninguno de los métodos primarios o secundarios del tratamiento de aguas puede eliminar completamente de ellas a las bacterias patógenas, por lo cual los efluentes de las plantas de tratamiento que son descargados a masas de agua con usos recreativo o como fuente de abastecimiento público, requieren de un tratamiento de desinfección para que de esta manera se reduzca la contaminación de las aguas receptoras.
- *Prevención de la descomposición de las aguas negras para controlar el olor y proteger a las estructuras de la planta.* La descomposición de las aguas residuales se inicia en las alcantarillas y puede llegar hasta la producción de ácido sulfhídrico, el cuál puede ocasionar una seria corrosión, especialmente en los cárcamos de bombeo lo cual representa gastos económicos por reparación de estructuras y también quejas públicas debido a la producción de olores. Por lo cual es recomendable dosificación de cloro como medida preventiva.
- *Disminución o demora de la demanda bioquímica de oxígeno.* Una cloración de las aguas crudas, que produzca un cloro residual de 0.2 a 0.5 ppm después de 15 min de contacto, puede hacer que disminuya de 15 a 35 por ciento la DBO; sin embargo, solo se utiliza cuando una unidad de tratamiento esta sobrecargada ya que no resulta un método económico. [7]

Es importante tomar en cuenta las características deseables de los desinfectantes del agua, se acuerdo con CONAGUA:

- Debe ser capaz de destruir o inactivar, en plazos razonables, los microorganismos cualesquiera que sean su especie y cantidad.
- Debe ser fiable cuando se utilice en las diversas condiciones que probablemente se encuentren en el sistema de tratamiento de aguas residuales.
- Debe ser capaz de mantener una concentración residual en el sistema de distribución final como resguardo contra la re-contaminación o el rebrote de microorganismos.
- Debe ser razonablemente seguro y fácil de manejarse y aplicarse.

Tabla 4. Tipos de desinfectantes de agua.

Tipo de desinfectante	Características
<b>Métodos químicos</b>	
Hipoclorito de sodio, gas cloro y derivados del cloro	El cloro es uno de los elementos más comunes para la desinfección del agua, se puede aplicar para la desactivación de la actividad de la gran mayoría de los microorganismos, y es relativamente barato. Tiene efecto residual.
Peróxido de hidrógeno	Desactiva los organismos patógenos del agua por oxidación. Es natural y no causa daño al ambiente, no irrita la piel como el cloro. Es de bajo costo y fácil de adquirir.
Ozono	Después de la cloración es el método de desinfección más frecuentemente empleado.
<b>Métodos físicos</b>	
Radiación ultravioleta	Producida por lámparas que emiten radiación con una frecuencia de 254 nm.
Calor	Sistema muy empleado en procesos de pasteurización.

### 1.3.5 TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LOS LODOS

Los lodos de las aguas residuales están constituidos por los sólidos que se eliminan en las unidades de tratamiento primario y secundario, junto con el agua que se separa con ellos. Mientras que en algunos casos es satisfactoria la disposición de ellos sin someterlos a tratamiento, generalmente es necesario tratarlos en alguna forma para prepararlos o acondicionarlos para disponer de ellos sin originar condiciones inconvenientes.

Este tratamiento tiene dos objetivos, siendo el primero de estos eliminar parcial o totalmente el agua que contienen los lodos, para disminuir su volumen en fuerte proporción y, en segundo lugar, para que se descompongan todos los sólidos orgánicos putrescibles transformándose en sólidos minerales o sólidos orgánicos relativamente estables. En nuestras plantas de estudio se logra con la combinación de la digestión con el secado de lechos de arena para las plantas pequeñas y con filtro banda para las plantas grandes.

## Digestión

La digestión aerobia es un proceso en el cual se usan los residuos orgánicos, que son: una mezcla de lodo digerible de la sedimentación primaria, sedimentación secundaria y lodo del tratamiento biológico aerobio, como sustrato para el crecimiento de bacterias que se desarrollan en presencia de oxígeno, con el fin de una destrucción de células, y una disminución de volumen.

La figura 7 muestra un diagrama de proceso de un digestor de lodos en continuo para la secuencia de tratamiento que incluye sedimentación primaria y proceso de lodos activos. Cuando la cantidad de lodo a digerir es pequeña se utiliza digestión en discontinuo, seguida de descarga intermitente del lodo digerido.

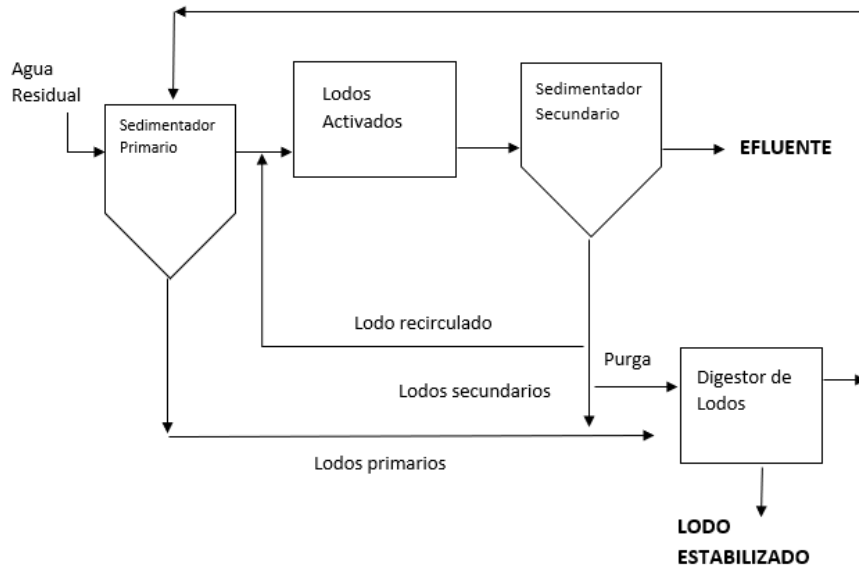


Figura 7. Diagrama del proceso de digestión aerobia de lodos.

La digestión aerobia es semejante al proceso de lodos activados. Cuando la aportación del sustrato disponible se haya agotado, los microorganismos comenzaran a consumirse a sí mismos con el fin de obtener energía para las reacciones de mantenimiento de las células. Cuando esto ocurre se dice que los microorganismos se encuentran en su fase endógena.

Sin embargo, debe indicarse que solo del 75 al 80% del tejido celular puede realmente ser oxidado. El 20 o 25 % restante los constituyen compuestos orgánicos y componentes inertes que son biodegradables. El amoníaco procedente de esta oxidación es seguidamente oxidado a nitrato al proseguir la digestión.

La velocidad de destrucción de las células disminuye cuando la relación alimento/microorganismo aumenta. En consecuencia, a mayor proporción de lodos primarios en el proceso, más lenta es la digestión, ya que los lodos primarios tienen una DBO relativamente alta, y bajos solidos suspendidos volátiles (SSV), significando altos valores de la relación A/M. Teniendo en cuenta que la digestión aerobia de lodos tiene lugar en la región de la fase de respiración endógena, no hay disminución prácticamente de la

DBO soluble. El objetivo fundamental de la digestión aerobia es la reducción de nada de lodo a evacuar, más que la de la reducción de la DBO soluble.

La digestión aerobia es una alternativa viable con respecto a la digestión anaerobia para la estabilización de lodos. Las ventajas y desventajas de la digestión aerobia se listan a continuación.

### **Ventajas**

1. Una reducción de sólidos volátiles aproximadamente igual a la obtenida vía anaerobia.
2. El sobrenadante obtenido tiene un contenido menor de DBO (menor de 100 mg/L) que por digestión anaerobia.
3. Formación de un producto final inodoro, biológicamente estable y que puede ser fácilmente eliminado.
4. Producción de lodo con excelentes características de deshidratación.
5. Recuperación de los valores fertilizantes básicos del lodo.
6. Menos problemas de operación, menos costos de mantenimiento y menor mano de obra especializada para la operación de la planta.
7. Menos inversión de capital.

### **Desventajas**

1. Elevado costo de energía asociado al suministro de oxígeno necesario.
2. La eficiencia en la reducción de sólidos varía con las fluctuaciones de temperatura.
3. No se recupera como subproducto útil, el metano.

### **Secado de lechos de arena cubiertos o descubiertos.**

Los lechos de secado operan bajo el principio simple de extender el lodo y dejarlo secar. Una gran cantidad del agua se remueve por drenado o decantación y el resto del agua debe evaporarse antes de que se alcance la concentración final deseada de sólidos.

Lechos rectangulares convencionales, consisten en una capa de arena sobre grava, y con tuberías de drenaje subterráneas para recoger el agua. Se construyen con o sin instalaciones para la remoción mecánica del lodo seco, y con o sin cubierta. Si es necesario se puede utilizar cal para estabilizarlos.

La operación de lechos de secado depende de la concentración de los sólidos en el lodo, la profundidad de la capa de lodo aplicado, la pérdida de agua a través del sistema de bajo dren, el grado y tipo de acondicionamiento y estabilización de lodos, la tasa de evaporación, que la determinan los factores ambientales, el método de recolección o retiro del lodo y la disposición final. [8]

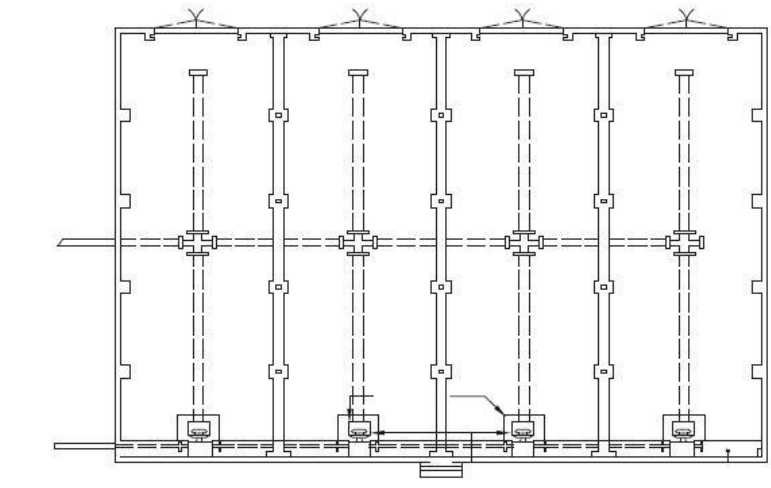


Figura 8. Esquema de lechos de secado.

### Ventajas

1. Método de bajo costo de capital, donde la tierra está disponible.
2. Requiere poca atención y habilidades del operador.
3. Consumo de energía bajo.
4. Bajo o ningún consumo de productos químicos.
5. Mayor contenido de sólidos que los métodos mecánicos.

### Desventajas

1. Requiere grandes extensiones de tierra.
2. Requiere un lodo estabilizado.
3. En el diseño se requiere considerar los efectos del clima.

### Filtro banda

El filtro de banda es una de las opciones más utilizadas para la deshidratación de los lodos químicos. Esta prensa tiene bandas móviles sencillas o dobles para desaguar los lodos en forma continua, mediante una combinación de drenado por gravedad y compresión. El lodo es desagüado en el filtro de banda de forma secuencial, a través de tres etapas operativas: acondicionamiento químico del lodo, influente drenado por gravedad hasta una consistencia no fluida y compactación del lodo en una zona de presión. La operación de desagüado empieza al entrar el lodo floculado con polímero a la sección de drenado por gravedad. Esta normalmente consiste en una banda continua porosa, que proporciona una gran área superficial a través de la cual se lleva a cabo el drenado; un sistema de distribución aplica el lodo uniformemente sobre la banda.

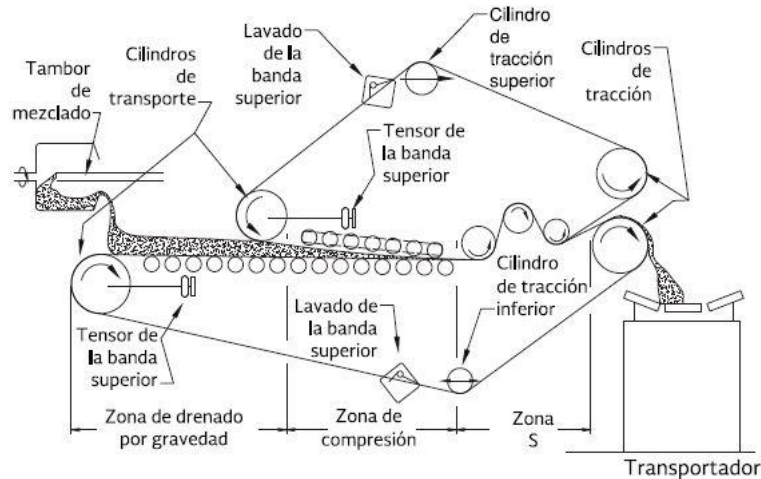


Figura 9. Esquema de un equipo filtro banda.

### Ventajas

1. Requerimientos bajos de energía.
2. Costos de capital y operación relativamente bajos.
3. Su mantenimiento es fácil de realizar.
4. Máquinas de alta presión son capaces de producir un lodo muy seco.
5. Requiere un mínimo esfuerzo para el paro del equipo.

### Desventajas

1. Problemas de olores.
2. Requiere un desmenuzador o triturador de lodos en la línea de alimentación.
3. Sensible a las características del lodo alimentado.
4. El funcionamiento automático no es recomendable.

### Disposición de lodos

Debe darse un destino o disposición final a todos los lodos que se produzcan en una planta de tratamiento, se debe contar con una disposición en agua y una disposición en tierra. Los tipos de disposición final más comunes en México son:

1. *Descarga directa a cuerpos receptores.* Esta es la forma de disposición más usada en México. De acuerdo con la legislación mexicana vigente, para poder realizar una descarga a un cuerpo receptor se requiere un permiso de descarga de la Conagua. Este permiso incluye las condiciones particulares de descarga, las cuales se determinan basándose en los Lineamientos de calidad de agua de la Ley federal de derechos. Aplica la NOM-001-SEMARNAT-1996.
2. *Disposición en un relleno sanitario.* El primer aspecto a considerar para este método de disposición, es el traslado de los lodos de la planta a las instalaciones del relleno

sanitario. Para poder transportarse en camiones, el lodo debe tener una consistencia semisólida, la cual se alcanza con un contenido de sólidos mayor al 20%. Para la aceptación de los lodos de la planta en un relleno sanitario municipal de residuos sólidos, deberá demostrarse que los lodos no son peligrosos, mediante la aplicación de la normativa vigente. Aplica la NOM-004-SEMARNAT-2002.

3. *Aplicación al terreno.* En los suelos donde se aplican es necesario añadir fósforo para compensar estos efectos. Aplica la NOM-004-SEMARNAT-2002.

La mayor parte del lodo residual generado en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales se dispone en el suelo. Aunque México dispone con una legislación para la aplicación del lodo al suelo, no se lleva un control o una vigilancia estricta en su aplicación. En México el incremento en el tratamiento de aguas residuales debe también ir acompañado de un cambio en el tratamiento y manejo seguro del lodo. De acuerdo a los estudios del INE, el 64 por ciento de la superficie del suelo del país está degradada, lo cual crea una gran oportunidad para el uso de los biosólidos. Sin embargo, para tener un uso planeado de este recurso es necesario realizar las siguientes acciones:

- Realizar un inventario nacional sobre producción, características, tratamiento y disposición de lodos y biosólidos.
- Completar el marco jurídico para la aplicación de los biosólidos, relacionando las condiciones de aplicación con diferentes aspectos (hasta el momento solo se han establecido las características de los biosólidos).
- Determinar la tecnología para la desinfección de lodos con alto contenido de parásitos, factible desde el punto de vista técnico y económico.
- Desarrollar un programa para dar a conocer las aplicaciones exitosas de los biosólidos a la agricultura.
- Realizar programas de entrenamiento y capacitación en el manejo, caracterización y uso de los biosólidos.
- Considerar la implementación de la estabilización anaerobia en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales medianas y grandes con el fin de utilizar el biogás en la generación de energía eléctrica.

Todas las recomendaciones anteriores deben ir acompañadas de una concientización de las autoridades y de la población en general de la importancia del manejo integral y sustentable del agua y de los lodos residuales, de tal manera que siempre se cuente con los recursos económicos y el apoyo para una buena operación y mantenimiento. [1,6]

## 1.4 CRITERIOS DE DISEÑO

El diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales en cualquier localidad debe enfocarse hacia la optimización del capital disponible para la construcción y los recursos humanos y materiales. [2]

Tabla 5. Factores o variables que influyen en los procesos.

<b>Unidad de Tratamiento</b>	<b>Factores o variables que influyen en los procesos</b>
Cribado grueso y fino	Inclinación con la vertical. Separación entre barras.
Desarenador	Velocidad horizontal para poder ser controlada. El tiempo de retención en base a las partículas que pueden separarse y el número de canales que se utilizan.
Filtros percoladores	Pérdida de carga a través del medio filtrante.
Lodos Activados	Edad de lodos. Requerimientos de aire. Tiempo de aereación. Recirculación de la cantidad apropiada de lodos activados.
Sedimentador Primario o Secundario	El tiempo de residencia en la unidad, con la finalidad de poder obtener las condiciones hidráulicas que predominan en ésta, como la carga hidráulica. Nivelación de los vertederos Profundidad
Desinfección	Naturaleza del desinfectante. Capacidad del desinfectante para destruir los organismos patógenos presentes en el agua. Concentración del desinfectante. Tiempo de contacto con el agua suficiente para que el desinfectante actúe.
Digestor	Tiempo de retención. Carga volumétrica.
Lechos de secado	Superficie de terreno requerida.
Filtro Banda	Ancho de la banda.

Los principales parámetros de diseño para plantas de tratamiento de aguas residuales son:

Tabla 6. Parámetros de diseño para plantas de tratamiento de aguas residuales.

Unidad de proceso	Unidad	Parámetro de referencia		Fuente
		Limpieza manual	Limpieza mecánica	
<b>Cribado</b>				
Inclinación de las rejas	Grados	30 - 45	0 - 30	Metcalfe & Eddy p.448
Velocidad del agua a flujo máximo	m/s	0.3 - 0.6	0.4 - 0.9	Metcalfe & Eddy p.448
Separación entre las barras	mm	25 - 50	15 - 75	Metcalfe & Eddy p.448
<b>Desarenador</b>		Rango	Típico	
Tiempo de retención	seg	45 - 90	60	Metcalfe & Eddy p.458
Velocidad Horizontal	m/seg	0.24 - 0.40	0.3	Metcalfe & Eddy p.458
<b>Sedimentador primario</b>				
Carga hidráulica Sup. a Qmed	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d	30 - 50		Metcalfe & Eddy p.475
Carga hidráulica Sup. a Qmax	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d	80 - 120	100	Metcalfe & Eddy p.475
Tiempo de retención	hrs	1.5 - 2.5	2	Metcalfe & Eddy p.475
<b>Filtro percolador</b>				
Carga hidráulica superficial	(l/s)/m <sup>2</sup>	0.16 - 0.63		Metcalfe & Eddy p.618
Carga orgánica por volumen	kg / d m <sup>3</sup>	0.4 - 4.8		Metcalfe & Eddy p.618
<b>Lodos activados</b>		Convencional	Aereación extendida	
Edad de lodos	días	5 - 10	20 - 40	Metcalfe & Eddy p.550
Relación F/M	kg/d /kg	0.25 - 0.50	0.05 - 0.15	Metcalfe & Eddy p.550
Carga orgánica volumétrica	kg/m <sup>3</sup> d	0.4 - 0.8	0.8 - 1.6	Metcalfe & Eddy p.550
Relación V/Q	hr	5 - 8	18 - 36	Metcalfe & Eddy p.550
SSTLM	mg/l	1500 - 3000	3000 - 6000	Metcalfe & Eddy p.550
Recirculación máxima (Qr/Q)	%	50%	75% - 150%	Metcalfe & Eddy p.550
<b>Sedimentador secundario</b>				
Carga hidráulica Sup. a Qmed	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d	16.4 - 32.8		Metcalfe & Eddy p.588
Carga hidráulica Sup. a Qmax	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d	28.5 - 49.2		Metcalfe & Eddy p.588
Tiempo de retención	hrs	1.5 - 2.5	2	Metcalfe & Eddy p.588
Carga hidráulica Sup. a Qmed c/rec	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d	16.4 - 32.8		Metcalfe & Eddy p.588
<b>Desinfección</b>				
Tiempo de residencia a Qmed.	min		30	Metcalfe & Eddy p.495
Coliformes fecales	NPM/100ml		<1000	
<b>Digestor</b>				
Carga volumétrica de sólidos	kg/m <sup>3</sup> -d	1.6 - 4.8		Metcalfe & Eddy p.837
Tiempo de retención	días	10 - 16		Metcalfe & Eddy p.837

## 1.5 SEGURIDAD EN EL TRABAJO

Existen diversas normas aplicables para la seguridad en el trabajo, con la finalidad de eliminar o disminuir el riesgo de que se produzcan los accidentes de trabajo y las enfermedades profesionales, aplicables en 3 rubros:

### **Normatividad en seguridad.**

- *NOM-001-STPS-2008*. Edificios, locales e instalaciones.
- *NOM-002-STPS-2010*. Prevención y protección contra incendios.
- *NOM-004-STPS-1999*. Sistemas y dispositivos de seguridad en maquinaria.
- *NOM-005-STPS-1998*. Manejo, transporte y almacenamiento de sustancias peligrosas.
- *NOM-006-STPS-2014*. Manejo y almacenamiento de materiales.
- *NOM-009-STPS-2011*. Trabajos en altura.
- *NOM-020-STPS-2011*. Recipientes sujetos a presión y calderas.
- *NOM-022-STPS-2008*. Electricidad estática.
- *NOM-027-STPS-2008*. Soldadura y corte.
- *NOM-029-STPS-2011*. Mantenimiento de instalaciones eléctricas.
- *NOM-033-STPS-2015*. Trabajos en espacios confinados.

### **Normatividad en salud.**

- *NOM-010-STPS-1999*. Contaminantes por sustancias químicas.
- *NOM-010-STPS-2014*. Agentes químicos contaminantes del ambiente laboral.
- *NOM-011-STPS-2001*. Ruido.
- *NOM-015-STPS-2001*. Condiciones térmicas elevadas o abatidas.
- *NOM-024-STPS-2001*. Vibraciones.
- *NOM-025-STPS-2008*. Iluminación.

### **Normatividad de organización.**

- *NOM-017-STPS-2008*. Equipo de protección personal.
- *NOM-018-STPS-2000*. Identificación de peligros y riesgos por sustancias químicas.
- *NOM-019-STPS-2011*. Comisiones de seguridad e higiene.
- *NOM-026-STPS-2008*. Colores y señales de seguridad.
- *NOM-028-STPS-2012*. Seguridad en procesos y equipos con sustancias químicas.
- *NOM-030-STPS-2009*. Servicios preventivos de seguridad y salud.

## 1.6 MANTENIMIENTO DE LA PLANTA Y DEL EQUIPO

Tres factores deben tomarse en cuenta para el debido mantenimiento: Diseño, construcción y operación. Si el diseño básico es adecuado y se construye el aparato con el mejor material, la operación debe lograrse con un mínimo de mantenimiento. Los planos o copias de los diseños de la planta, mostrando las dimensiones de cada unidad, así como las tuberías, válvulas y compuertas deben tenerse a la mano para referencia inmediata.

Para el buen funcionamiento y conservación de una planta de tratamiento de aguas residuales, es indispensable disponer de reservas de agua que se puedan usar a presión para limpiar y lavar tanques, líneas y canales.

Un mantenimiento adecuado requiere una pericia considerable que solamente puede adquirirse por experiencia, estudio y práctica. Básicamente para cualquier programa de mantenimiento hay que empezar con una buena dirección y observar las siguientes reglas:

1. Conservar la planta perfectamente aseada y ordenada.
2. Establecer un plan sistemático, para la ejecución de las actividades cotidianas.
3. Establecer un programa rutinario de inspección y lubricación.
4. Llevar los datos y los registros de cada pieza de equipo, enfatizando lo relativo a incidentes poco usuales y condiciones operatorias deficientes.
5. Observar las medidas de seguridad.

Es necesario insistir sobre la importancia de los registros ya que su revisión permite a un operador determinar el desgaste o debilidad de diversas piezas del equipo y determinar que repuestos deben tenerse en existencia. Este registro debe realizarse de manera periódica y regular y debe considerar los siguientes puntos: lubricación, limpieza, reposición de partes gastadas y fechas.

### **Equipo Eléctrico**

Prácticamente todas las plantas funcionan con electricidad. Ninguna planta puede operar en forma continua sin un programa de mantenimiento eficiente en todas sus unidades eléctricas. El 90% de las fallas de los motores se deben a cuatro causas: Suciedad, humedad, fricción y vibración.

Un programa rutinario de limpieza, elimina la suciedad. Las precauciones corrientes contra la humedad son eficaces para combatirla; el uso de grasa y aceite adecuados sirve para eliminar la fricción y las revisiones regulares diarias, señalan las vibraciones.

Se debe revisar periódicamente el tablero de control, para ver si está bien aislado, limpio y seco; si sus partes móviles están libres y si las presiones en los contactos son firmes.

Cada seis meses deben comprobarse todos los dispositivos de arranque, para tener la seguridad de que el elemento interruptor funciona libremente y ofrece protección al motor.

## **Bombas**

Las bombas de aguas negras son quizá la parte más importante del equipo de una planta de aguas residuales, las más comunes son las bombas centrífugas. Normalmente una descompostura del equipo de bombeo significa que es preciso desviar el agua. Para su mantenimiento deben llevarse a cabo inspecciones diarias en que se preste especial atención a lo siguiente:

1. *Cojinetes*. Calentamiento y ruido.
2. *Motores*. Velocidad de operación.
3. *Equipo de control*. Limpieza y condiciones.
4. *Operación de bombeo*. Vibraciones y ruido.
5. *Prensaestopas*. Goteo excesivo.

## **Bombas de Lodos**

La bomba de lodos más utilizada, es la bomba de embolo, es del tipo de desplazamiento positivo y puede bombear mezclas de lodos, gases y aire. Se recomienda el uso generoso de aceite alrededor del empaque, para prolongar la duración y evitar fugas.

## **Estructuras de la planta**

Como son los canales, tanques y pozos, tienen que desaguarse cuando menos una vez al año para revisarlos y aplicar alguna capa protectora.

Los lechos de secado deben rellenarse con arena cuando el espesor de esta haya quedado reducido a la mitad hay que eliminar la arena sucia cuidadosamente y reponerla con una nueva arena. [1]

## **Líneas de tuberías**

La tubería y las líneas de aire deberán mantenerse abiertas y sin obstrucciones de acumulación de ninguna naturaleza. Para su distinción se recomienda pintarlas de la siguiente manera:

- Línea de lodos – Café
- Línea de gases – Rojo
- Línea de agua potable – Azul
- Línea de cloro – Amarillo
- Línea de aguas residuales – Gris
- Línea de aire comprimido – Verde

## 2. JUSTIFICACIÓN

Debido al cambio de administración de los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento del sureste de México, era necesario para su recepción conocer el estado real de las instalaciones desde un punto de vista especializado.

De manera particular para las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) se desarrolló una evaluación técnica especializada de la situación actual y las necesidades de cada planta, en donde se resaltara con evidencias las deficiencias de diseño y operación de los puntos más importantes que son:

- El cumplimiento de las normas de calidad de agua y lodos.
- Contar con la infraestructura civil, hidráulica y electromecánica eficiente, segura y sustentable.
- Tener recursos humanos capacitados.

Con esta evaluación se brindará el apoyo para orientar el quehacer cotidiano de los técnicos, especialistas y tomadores de decisiones, proporcionándoles criterios valiosos de gestión, disminuir los costos de operación y realizar en general, un mejor aprovechamiento de las aguas superficiales y subterráneas de su estado, considerando las inversiones de nueva infraestructura y el cuidado y mantenimiento de la existente.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar una evaluación técnica y administrativa, identificando los principales puntos críticos, en que se encuentran las plantas de tratamiento de agua residual del sureste de México.

#### 3.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Evaluar el estado de conservación y nivel de operación de la infraestructura de las plantas de tratamiento de agua residual operadas actualmente.
- Identificar los principales puntos críticos de la operación de las plantas de tratamiento de agua residual.
- Proponer una estrategia para el programa de inversión a corto plazo indicando en cada planta donde se requiere una inversión o solo mantenimiento.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1 TIPOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

En la actualidad existe una gran variedad de sistemas de tratamiento y diversas combinaciones de operaciones unitarias para lograr una calidad de agua determinada en función de la calidad de agua de la fuente. Según CONAGUA en el “Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales de diciembre 2012” los principales tipos de plantas potabilizadoras en México son:

- Aerobio
- Anaerobio
- Biológico
- Discos biológicos o Biodiscos
- Dual
- Fosa Séptica
- Fosa Séptica + Filtro Biológico
- Fosa Séptica + Wetland
- Humedales (Wetland)
- Lagunas Aireadas
- Lagunas de Estabilización
- Lodos Activados
- Filtros Biológicos o Percoladores
- Primario Avanzado
- Primario o Sedimentación
- Rafa + Filtro Biológico
- Rafa o Wasb
- Rafa, Wasb + Humedal
- Reactor Enzimático
- Sedimentación + Wetland
- Tanque Imhoff
- Tanque Imhoff + Filtro Biológico
- Tanque Imhoff + Wetland
- Terciario
- Zanjas de Oxidación

Siguiendo esta referencia nuestras plantas de estudio fueron de tipo (ver Tabla 7):

Tabla 7. Relación de capacidad de diseño y tipo de tratamiento de las plantas de estudio

Planta	Capacidad de diseño (l/s)	Tipo de tratamiento
A	1600	Filtros Biológicos o Percoladores
B	150	Lodos activados
C	81	Lodos activados
D	58	Lodos activados
E	37	Lodos activados

Los diagramas de proceso de estos tipos de tratamiento de aguas residuales se muestran a continuación. En primer lugar, la planta de tratamiento: Filtros biológicos o percoladores (Figura 3) consiste en sedimentación, filtración, lodos activados, cloración y digestión. En segundo lugar, la planta de lodos activados (Figura 4), se conforma principalmente por los lodos activados, sedimentación, cloración y digestión.

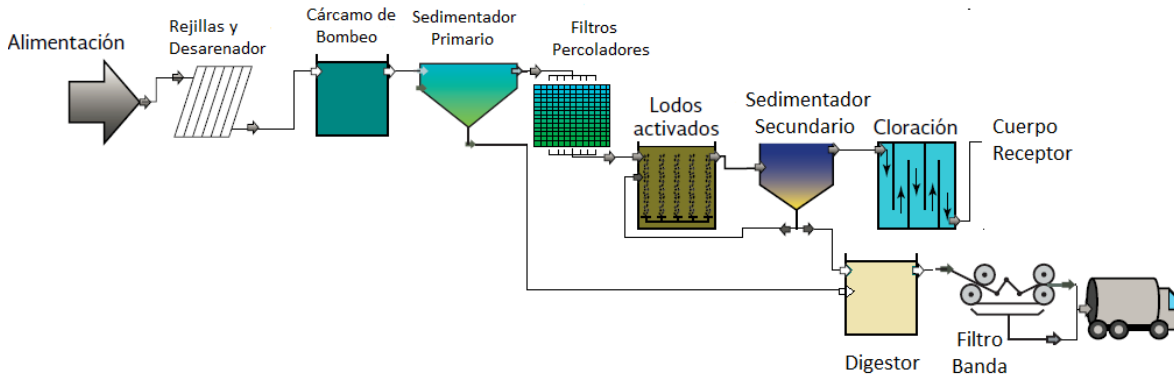


Figura 10. Diagrama de proceso de una planta de tratamiento tipo filtros percoladores

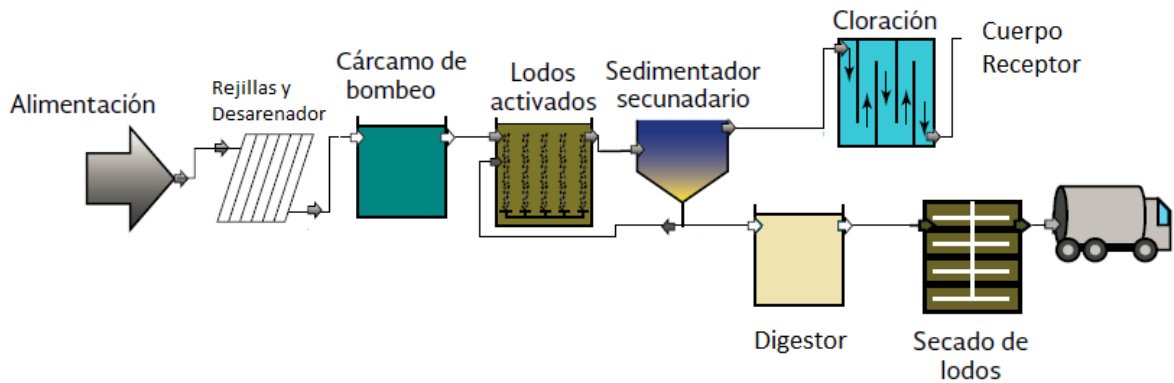


Figura 11. Diagrama de proceso de una planta de tratamiento tipo lodos activados

## 4.2 GUÍA DE EVALUACIÓN

La metodología de evaluación se llevó a cabo siguiendo los componentes de recopilación de la información, sistematización y evaluación general.

La guía de evaluación fue una herramienta que permitió recopilar la información en las diferentes plantas de tratamiento de agua residual a evaluar. Permitiendo sistematizar y analizar los datos, para posteriormente realizar la evaluación.

La guía de evaluación consta de los siguientes componentes:

- a) *Ficha de datos generales de la planta de tratamiento de aguas residuales.* Estos datos incluyen principalmente: Nombre, ubicación, zona de influencia, tipo de planta, año de construcción, año de operación, número de operadores, datos históricos de la calidad de agua cruda y tratada, conducción de agua cruda, capacidad de diseño, caudal medio de operación, caudal máximo y mínimo de operación, diagrama actual del tren de proceso y los problemas frecuentes de la planta de tratamiento.
- b) *Recorrido en planta, operación y evaluación de las unidades de proceso, infraestructura civil e infraestructura eléctrica- equipos electromecánicos.* Una vez realizado el llenado de la ficha técnica anterior se realizó el recorrido de cada planta de tratamiento de agua residual. Los objetivos de este recorrido eran: Obtener evidencia fotográfica de cada unidad de tratamiento, especialmente de las deficiencias primordiales en estas, conocer las condiciones de operación y tomar los datos necesarios para la evaluación; para ejemplificar más esta última parte se señalan en las tablas 8, 9 y 10; los conceptos a evaluar en cada visita por unidad. Para agilizar la evaluación se contaba con levantamiento previo de todas las unidades.
- c) *Cumplimiento de la normatividad y las condiciones particulares de descarga.* De acuerdo con el marco normativo para las plantas de tratamiento, que señala los límites permisibles para la calidad de agua tratada de cada planta de tratamiento de agua residual, se revisaron los análisis fisicoquímicos y microbiológicos recientes realizados por un laboratorio acreditado externo.
- d) *Manejo de productos químicos.* Con el encargado de la planta se obtuvo información referente a los productos químicos utilizados: Gas cloro, cloruro de sodio o calcio, cal, polímero, et. Entre los puntos más importantes de este apartado eran conocer si:
  - Se llevan registros de entrada de la materia prima y del consumo, reportando la fecha y hora de turno.
  - Se conoce o determina la pureza del material al ingresar a la planta.

- Se lleva una bitácora de control de los responsables que utilizan los materiales, la cantidad y nombre de los materiales utilizados.

Para el caso particular del cloro:

- Se verifica el funcionamiento del equipo de seguridad en la zona de cloración.
  - Se identifica la existencia de fugas de gas cloro y se reporta adecuadamente.
  - Se cuenta con alarma para detectar fugas de gas cloro.
- e) *Procedimientos especiales (situaciones de emergencia)*. Se pregunto al encargado de la planta y se revisaron las unidades que nos permitían conocer la reacción y los procedimientos establecidos en cada planta de tratamiento de aguas residuales frente a situaciones de emergencia, tales como: Variación considerable de la calidad de agua cruda, fugas de gas cloro, corto circuito eléctrico o cuando se interrumpe el flujo de energía.
- f) *Grado de capacitación del personal de la planta*. Se revisó el control que se tiene para el personal operativo y la capacitación de los mismos, evaluando el día de la visita el estado de operación de las unidades de tratamiento, si se cuenta con el equipo de seguridad e higiene establecido por la normativa vigente y el estado de las bitácoras de control de operación.

Tabla 8. Evaluación de proceso recorrido en la planta.

<b>Unidad: Infraestructura de llegada.</b>
Cuenta con línea de bypass.
Se registra el caudal de operación normal a la entrada y a la salida.
Existe una estructura de entrada o caja receptora del influente.
<b>Unidad: Pretratamiento.</b>
Número de rejillas gruesas y finas.
Inclinación de las rejillas.
Claro libre de las rejillas.
Número de canales de desarenación.
Dimensiones de los canales desarenadores: Longitud y ancho.
Tirante de agua en los canales desarenadores.
Número de unidades que se encuentran en operación.
<b>Unidad: Sedimentación primaria.</b>
Número de unidades.
Tipo de sedimentador.
Dimensiones tanques: Longitud-ancho-profundidad o diámetro-profundidad.
Se ajusta el proceso por la presencia de flóculos en la superficie del sedimentador.
Existe sistema de recolección y extracción de lodos.

<b>Unidad: Filtros percoladores.</b>
Número de unidades.
Dimensiones tanques: Diámetro-profundidad.
Material del medio filtrante.
Espesor del medio filtrante.
<b>Unidad: Lodos Activados.</b>
Número de unidades.
Tipo.
Dimensiones tanques: Longitud-ancho-profundidad.
Color del licor mezclado.
<b>Unidad: Sedimentación secundaria.</b>
Número de unidades.
Tipo de sedimentador.
Dimensiones tanques: Longitud-ancho-profundidad o diámetro-profundidad.
Se ajusta el proceso por la presencia de flóculos en la superficie del sedimentador.
Existe sistema de recolección y extracción de lodos.
Recirculación de lodo secundario a reactor biológico.
<b>Unidad: Cloración.</b>
Dimensiones tanque: Longitud-ancho-profundidad.
Tipo de desinfectante.
Concentración que se emplea.
Tipo de dosificador.
Como se determina la dosis aplicada.
Concentración en mg/l de cloro que debe tener el efluente.
<b>Unidad: Digestión.</b>
Número de unidades.
Dimensiones tanque: Longitud-ancho-profundidad.
Existen olores.
Color del licor de lodos.
<b>Unidad: Deshidratación de lodos.</b>
Se deshidratan los lodos.
Se ajusta la frecuencia de operación de la unidad mecánica de acuerdo al volumen producido controlando la humedad de los lodos.
Se almacenan los lodos para su disposición final.
<b>Disposición de lodos.</b>
Se conoce el volumen de lodos producidos y desalojados diariamente o semanalmente.
Se conoce el destino que se le da a los lodos.

Tabla 9. Evaluación de infraestructura civil recorrido en la planta.

<b>Unidades: Estructuras de concreto (Cajas receptoras, cajas derivadoras, pretratamiento, cárcamo de bombeo, sedimentador primario, filtros percoladores, tanques de lodos activados, tanque de contacto de cloro, digestor, lechos de secado, cárcamo de lodos).</b>
Estado de conservación.
Pintura.
<b>Unidades: Núcleo de oficinas, cuarto de máquinas o equipos, planta de emergencia, edificios de filtro banda, laboratorios, baños.</b>
Estado de conservación.
Pintura.
Impermeabilización.
<b>Unidades: Portón de acceso, barda perimetral, protecciones de púas y concertina.</b>
Estado de conservación.
Es suficiente para garantizar una seguridad perimetral.
Requiere mantenimiento o sustitución.
<b>Unidades: Estructuras metálicas (Barandales, grúas metálicas, puentes, tensores, armaduras, rejillas, tapas de registro y soportes de área de cárcamos).</b>
Estado de conservación.
Es suficiente para garantizar la seguridad del personal operativo.
Requiere mantenimiento o sustitución.
<b>Unidades: Cubierta de vigas y láminas galvanizadas.</b>
Estado de conservación.
Es suficiente para garantizar la seguridad del personal operativo.
Requiere mantenimiento o sustitución.
<b>Unidades: Iluminación</b>
Existe iluminación interior suficiente.
Existe iluminación en vialidades.
El nivel de iluminación es óptimo para operación.
Requiere mantenimiento, sustitución o adicciones.

Tabla 10. Evaluación de infraestructura eléctrica y equipos electromecánicos, recorrido en la planta.

<b>Unidad: Acometida</b>
Estado de los cables de media tensión.
Estado de las cuchillas fusibles.
Estado de aisladores, conectores y apartarrayos.
<b>Unidad: Sistema eléctrico</b>
Calibre, resistencia y pérdidas del sistema.
<b>Unidad: Transformador</b>
Tipo, capacidad, tipo de conexión, número de equipos que alimenta, temperatura máxima del transformador.
Estado del transformador y área de la subestación.
Estado de las conexiones de baja o media tensión.
<b>Unidad: Sistema de tierras.</b>
Existencia del sistema de tierras y estado del mismo.
<b>Unidad: Interruptor General.</b>
Tipo, capacidad y ajuste del interruptor general.
Estado del interruptor general.
<b>Unidad: Tablero de distribución.</b>
Estado del tablero y derivados.
Planta generadora y tablero de transferencia.
Disponibilidad del equipo.
<b>Unidades: Tableros de control de bombas cárcamo de aguas crudas, bombas recirculación de lodos, sopladores, agitadores mecánicos,</b>
Estado del tablero y conexiones.
Requiere mantenimiento o sustitución.
<b>Unidad: Capacitores.</b>
Número, marca, capacidad y calibre conductor de los capacitores.
Estado de los capacitores
Requiere mantenimiento o sustitución.
<b>Unidades: Bombas de cárcamo de agua cruda, cárcamo de lodos y purga.</b>
Existencias y estado de la bomba.
Marca, tipo y antigüedad de la bomba.
Capacidad, velocidad, tensión, corriente, eficiencia y tipo del motor eléctrico.
Estado actual del motor eléctrico.
Tipo, material y diámetro del impulsor.
Estado de la instalación eléctrica de la bomba.
<b>Unidad: Pretratamiento automático.</b>
Existencias y estado de los equipos.
Requiere mantenimiento o sustitución.
<b>Unidad: Lodos activados.</b>
Existencia y estado de las válvulas de compuerta y sensores de oxígeno.

<b>Unidad: Sedimentador secundario.</b>
Estado de las rastras.
Requiere mantenimiento o sustitución.
<b>Unidad: Sopladores o agitadores mecánicos</b>
Existencia y estado de los sopladores o agitadores mecánicos.
Marca, tipo y antigüedad del equipo.
Capacidad, velocidad, tensión, corriente, eficiencia y tipo del motor eléctrico.
Estado actual del motor eléctrico.
Potencia instalada, potencia utilizada y eficiencia.
<b>Unidad: Caseta de cloración.</b>
Existencia y estado del equipo dosificador.
Requiere mantenimiento o sustitución.

#### 4.3 EVALUACIÓN DE LAS UNIDADES DE PROCESO

Para comenzar con la evaluación de proceso era necesario contar con los datos generales y el estado actual de planta de tratamiento, los análisis de calidad de agua de entrada y salida por un laboratorio externo acreditado, el levantamiento de dimensiones de las unidades de tratamiento y los proyectos ejecutivos.

La mayoría de los cálculos requieren conocer el caudal medio y el caudal máximo de la planta, los cuales se determinan en el proyecto ejecutivo de cada planta en base a:

- La cobertura.
- El área a sanear en base al área tributaria.
- La población, la cual se debe analizar de acuerdo a las estadísticas censales del crecimiento de población a servir considerando áreas de expansión del lugar.
- La dotación de consumo de agua potable y de fuentes propias, para uso doméstico, de acuerdo con el nivel socio-económico de la población y su variación durante el periodo de previsión.
- Cuando corresponda infiltración.

Tomando en cuenta estas consideraciones el caudal medio se muestra en la ecuación 1:

Ecuación 2. Caudal medio (L/s)

$$Q_{med} = \frac{Ap(P)}{86400}$$

donde:

$Ap$  = Aportación de aguas residuales en L/h/día

$P$  = Número de habitantes de proyecto

$86400$  = Número de segundos al día

El caudal máximo instantáneo es el valor máximo de aguas residuales que se pueden presentar. Este valor se obtiene a partir del coeficiente de Harmon ( $M$ ).

**Ecuación 3. Coeficiente de Harmon**

$$M = 1 + \frac{14}{4 + \sqrt{\frac{P}{1000}}}$$

**Ecuación 4. Caudal máximo (L/s)**

$$Q_{max} = Q_{med}(\text{Coef. Harmon})$$

En todas las unidades de tratamiento las dimensiones globales son un factor importante de manera especial en el caso de los tanques ya que en ciertos casos deben cumplir con la profundidad normativa, además de que en base a estas se determinan la cantidad de agua residual a tratar, por la planeación general de la planta de tratamiento y el tipo de equipo.

Las ecuaciones para determinar los parámetros de diseño para cada unidad de tratamiento son las siguientes. [2,3]

### **Tratamiento preliminar**

Para el cribado:

**Ecuación 5. Velocidad del agua a flujo máximo (m/s)**

$$V = \frac{\left(\frac{B + S}{S}\right) F}{WD}$$

donde:

$B$  = Ancho de las barras (mm)

$S$  = Claro libre de las barras (mm)

$F$  = Caudal máximo ( $m^3/s$ )

$W$  = Ancho de la criba (m)

$D$  = Profundidad máx. del agua (m)

Para el desarenador:

Ecuación 6. Tiempo de retención (s)

$$t_r = \frac{WLh}{Q_{canal}}$$

Ecuación 7. Velocidad horizontal o del agua (m/s)

$$Vd = \frac{Q_{canal}}{Wh}$$

donde:

$W$  = Ancho de cada canal (m)

$L$  = Longitud de cada canal (m)

$h$  = Altura máxima (m)

$Q_{canal}$  = Caudal máx. por canal ( $m^3/s$ )

Es importante resaltar que los desarenadores deben diseñarse de manera que la velocidad se pueda controlar para que se acerque lo más que se pueda a 30 cm/s. El tiempo de retención debe basarse en el tamaño de las partículas que deben separarse y generalmente varía de 45 a 90 s.

### Tanques de sedimentación.

Ya sea en el caso de los tanques de sedimentación primaria o secundaria, se determinan tres parámetros importantes que son:

- El tiempo de retención que es el tiempo en horas que se retienen las aguas residuales en el tanque, suponiendo un desplazamiento total y un flujo uniforme (Ecuación 8).
- La carga hidráulica superficial a caudal medio y caudal máximo la cual es un factor importante porque afecta el porcentaje de eliminación de sólidos sedimentables y la DBO (Ecuación 9 y 10).

Ecuación 8. Tiempo de retención (hr)

$$t_r = \frac{V(24)}{Q_{med}(86.4)}$$

Ecuación 9. Carga Hidráulica Superficial a  $Q_{med}$  ( $m^3/m^2d$ )

$$CHS = \frac{Q_{med}(86.4)}{A}$$

Ecuación 10. Carga Hidráulica Superficial a  $Q_{max}$  ( $m^3/m^2d$ )

$$CHS = \frac{Q_{max}(86.4)}{A}$$

donde:

$V$ = Volumen ( $m^3$ )

$A$ = Volumen ( $m^2$ )

$Q_{med}$ = Caudal medio (L/s)

$Q_{max}$ = Caudal máximo (L/s)

En el caso de los sedimentadores secundarios por la recirculación es necesario considerar la ecuación 11.

**Ecuación 11. Carga Hidráulica Superficial a  $Q_{med}$  con recirculación ( $m^3/m^2d$ )**

$$CHS = \frac{\left[ Q_{med} \left( \frac{R}{Q} \right) + Q_{med} \right] (86.4)}{A}$$

donde:

$R/Q$ = Recirculación

$Q_{med}$ = Caudal medio (l/s)

$A$ = Volumen ( $m^2$ )

### Tratamiento primario.

Para los filtros percoladores:

**Ecuación 12. Carga Hidráulica Superficial (L/s/ $m^2$ )**

$$CHS = \frac{[Q_{med}(1+\frac{R}{Q})]}{\frac{No.de\ trenes}{(\pi D)^{2/4}}} \text{ Carga Orgánica por Volumen (kg/m}^3\text{d)}$$

$$COV = \frac{0.0864 \left[ Q_{med} \left( 1 + \frac{R}{Q} \right) \right] DBO_{entrada}}{V}$$

**Ecuación 13. DBO entrada del biofiltro (mg/L)**

$$DBO_{entrada} = \frac{DBO_{Inf} + \left[ DBO_{Ef} \left( \frac{R}{Q} \right) \right]}{1 + \frac{R}{Q}}$$

donde:

$D$ = Diámetro (m)

$R/Q$ = Recirculación

$Q_{med}$  = Caudal medio (l/s)

$V$  = Volumen ( $m^3$ )

$DBO_{entrada}$  = DBO entrada del biofiltro (mg/L)

$DBO_{Inf}$  = DBO en el influente con pretratamiento (mg/L)

$DBO_{Ef}$  = DBO en el efluente del biofiltro (mg/L)

### Lodos Activados.

Existen cinco términos comunes para describir el proceso de lodos activados:

- La edad de lodos, que es el tiempo medio en días que permanece sujeta a la aereación una partícula de sólidos suspendidos (Ecuación 15).
- La relación F/M es un factor importante que se relaciona con la velocidad de crecimiento de los microorganismos dependiendo de la cantidad de comida disponible (Ecuación 16).
- La carga orgánica volumétrica la cual indica que se pueden procesar mayores volúmenes de agua residual por unidad de volumen disponible en el reactor (Ecuación 17).
- El tiempo de retención en horas, suponiendo un desplazamiento total y un flujo uniforme (Ecuación 18).
- Los requerimientos de aire los cuales se determinan de un promedio entre el aire necesario para la transferencia de oxígeno y para el requerido para el mezclado.

Ecuación 14. Carga orgánica influente (kg/d)

$$Carga\ Orgánica_{Inf} = DBO_{Inf}(Q_{med})(0.0864)$$

Ecuación 15. Edad de lodos (días)

$$Edad\ de\ lodos = \frac{V \left( \frac{SSLM}{1000} \right)}{Y(Carga\ Orgánica_{Inf})}$$

Ecuación 16. Relación F/M (kg DBO5/d /kg SSVLM)

$$Relación\ F/M = \frac{Carga\ Orgánica_{Inf}}{V \left( \frac{SSLM}{1000} \right)}$$

Ecuación 17. Carga Orgánica Volumétrica (kg/ $m^3$ d)

$$Carga\ Orgánica\ Volumétrica = \frac{Carga\ Orgánica_{Inf}}{V}$$

**Ecuación 18. Tiempo de retención (h)**

$$t_r = \frac{V}{\left[ \left( Q_{max} + \left( Q_{med} \frac{R}{Q} \right) \right) 86.4 \right] 24}$$

donde:

$Q_{med}$  = Caudal medio (L/s)

$DBO_{inf}$  = DBO del influente (mg/L)

$V$  = Volumen ( $m^3$ )

$SSLM$  = Sólidos Suspendidos del Licor Mezclado (3000 mg/L)

$Y$  = Relación de producción de lodos (kg SST/kg  $DBO_5$ )

$R/Q$  = Recirculación

$Q_{max}$  = Caudal máximo (L/s)

**Cloración.**

Para esta unidad de tratamiento el punto de aplicación del cloro debe localizarse en un lugar donde el cloro que se añada pueda mezclarse rápidamente en toda la corriente de aguas residuales y pueda sostener dicha mezcla durante un mínimo de 30 min, antes de descargarse en la corriente receptora.

**Ecuación 19. Tiempo de retención (min)**

$$t_r = \frac{V}{Q_{med} \times 86.4 \times 24 \times 60}$$

donde:

$Q_{med}$  = Caudal medio (l/s)

$V$  = Volumen ( $m^3$ )

**Tratamiento de lodos.**

Para el estudio del digestor existen dos parámetros importantes a considerar la carga volumétrica de lodos y el tiempo de retención, sin embargo, primero es necesario conocer la producción de lodos que se genera en la planta para ingresar a esta unidad.

**Ecuación 20. Masa de DBO removida (kg/d)**

$$\text{Masa de DBO removida} = Q_{med} (DBO_{inf} - DBO_{ef}) 0.0864$$

**Ecuación 21. Masa de Lodo Seco (kg/d)**

$$\text{Masa de Lodo Seco} = \text{Masa de DBO rem. (Rel. producción de lodo)}$$

**Ecuación 22. Masa de Sólidos Totales (kg/d)**

$$\text{Masa de Sólidos Totales} = \text{Masa de Lodo Seco}(\text{No. de corrientes})$$

**Ecuación 23. Volumen de lodos (m<sup>3</sup>/d)**

$$V_{\text{Lodos}} = \frac{\text{Masa de Sólidos Totales}}{10}$$

**Ecuación 24. Tiempo de Retención (hr)**

$$t_r = \frac{V_{\text{Tanque}}}{V_{\text{Lodos}}}$$

**Ecuación 25. Carga Volumétrica de líquidos (kg/m<sup>3</sup>d)**

$$\text{Carga Volumétrica de líquidos} = \frac{\text{Masa de Sólidos Totales}}{V_{\text{Tanque}}}$$

donde:

$Q_{med}$  = Caudal medio (L/s)

$DBO_{In}$  = DBO del influente (mg/L)

$DBO_{Ef}$  = DBO del efluente (mg/L)

$V_{tanque}$  = Volumen de tanque (m<sup>3</sup>)

Para conocer el área requerida para los lechos de secado de igual manera es importante conocer la producción de sólidos totales de la ecuación 26.

**Ecuación 26. Área requerida (m<sup>2</sup>)**

$$A = \frac{\text{Masa de lodos} \times 365}{\text{Carga de Sólidos}}$$

donde:

$\text{Carga de Sólidos} = 136.7 \text{ kg/m}^2 \text{ año (CONAGUA)}$

**Ecuación 27. Masa de lodos (kg/d)**

$$\text{Masa de Lodos} = \text{Masa de Sólidos Totales} - \text{Masa de Sólidos Volátiles} + \text{Masa de Sólidos Volátiles ef.}$$

**Ecuación 28. Masa de sólidos volátiles (kg/d)**

$$\text{Masa de Sólidos Volátiles} = \text{Masa de Sólidos Totales}(0.7)$$

**Ecuación 29. Masa de sólidos volátiles efluente (kg/d)**

$$\begin{aligned} \text{Masa de Sólidos Volátiles ef.} \\ = \text{Masa de Sólidos Volátiles}(1 - \text{Fracción de sólidos de volumen digerido}) \end{aligned}$$

donde:

$\text{Fracción de sólidos de volumen digerido} = 40\%$

## 5. RESULTADOS

### 5.1 CALIDAD DE AGUA DE SALIDA

Los resultados de la calidad de agua de salida de las plantas de tratamiento se obtuvieron por parte de un laboratorio externo acreditado, en comparación con los límites máximos permisibles de descarga con los que deben de cumplir las plantas de tratamiento, señalados en la tabla 2; se muestra si cumplieron con el establecido en la normatividad en la tabla 11.

Tabla 11. Resultados de calidad de agua de salida.

Parámetro (mg/l.; excepto cuando se especifique)	Plantas				
	A	B	C	D	E
Temperatura (°C)	✓	✓	✓	✓	✓
Grasas y aceites	✓	✓	✓	✓	✓
Materia Flotante	✓	✓	✓	✓	✓
Sólidos Sedimentables (mL/L)	✓	✓	✓	✓	✓
Sólidos Suspendedos Totales	✓	✓	✓	✓	✓
DBO <sub>5</sub>	✓	✓	✓	✓	✓
Nitrógeno Total	✓	✓	✓	✓	✓
Fósforo Total	✓	✓	✓	✓	✓
Coliformes Fecales (NMP/100 mL)	✓	✓	✓	✓	✓

Nota:

- ✓ Cumple. El resultado se encuentra dentro del intervalo permitido.
- ✗ No Cumple. El resultado se encuentra fuera del intervalo permitido.

De acuerdo al análisis de la información de calidad de agua recabada, se observa que todas las plantas cumplen con la normatividad vigente, sin embargo, es necesario obtener la eficiencia de operación en cuanto a los parámetros de DBO<sub>5</sub>, SST y Coliformes Fecales, los cuales, para este tipo de tratamiento, deben ser superiores a 90%.



Figura 12. Eficiencias de remoción de contaminantes.

Nota:

- ✔ Cumple. El resultado se encuentra dentro del intervalo permitido.
- ✘ No Cumple. El resultado se encuentra fuera del intervalo permitido.

## 5.2 EVALUACIÓN DEL DISEÑO DE LAS UNIDADES DE PROCESO

Para realizar las evaluaciones de las unidades de procesos por planta, se tenían; las dimensiones registradas por el levantamiento previo y los resultados de calidad de agua del laboratorio externo acreditado (Los resultados no contaban con información de laboratorio de la calidad de agua de entrada y salida de cada uno de los procesos, razón por la cual no se pudo realizar una evaluación bajo condiciones reales de operación), estos datos, fueron proporcionados por el personal.

Los cálculos se realizaron a través de plantillas de Excel utilizando las fórmulas descritas en el apartado 5.2, los resultados se muestran en la tabla 12.

Como se puede observar en la tabla 12, en general los parámetros de diseño de cada unidad de proceso se cumplen o son aceptables, con excepción del digestor.

De acuerdo a lo anterior se puede descartar como un punto crítico el mal diseño de las unidades de tratamiento de aguas residuales hasta el tratamiento de lodos.

A continuación, se resaltan algunos puntos importantes con respecto al no cumplimiento de algunas unidades:

- *Desarenador*. En el caso de la planta B y E, se encuentran construidas en un lugar rodeado de viviendas y su superficie está limitada, por lo cual la longitud de los canales es pequeña e insuficiente.
- *Lodos activados*. Uno de los criterios de diseño más importante en este proceso son los requerimientos de aire ya que la operación se ve afectada, para el caso de todas las plantas con excepción de la C, la potencia de los equipos instalados cumple en oxigenación y mezclado parcial del tanque, manejando un arreglo del sistema de aereación 1 - 1 (Un equipo operando y otro de reserva). Para el caso particular de la planta C se sugiere complementar el sistema de mezclado, instalando dos equipos flotantes mecánicos por tanque.
- *Sedimentación Secundaria*. En la mayoría de las plantas cumplen de manera aceptable, pero para no forzar el proceso, como se mostraba en la planta C, se sugiere aplicar un sistema efectivo de extracción, tratamiento y manejo de los lodos biológicos producidos.
- *Desinfección*. El volumen del tanque de contacto de cloro de la planta B y C es muy pequeño por lo cual es necesaria una ampliación. En los resultados de laboratorio no se determinó el cloro residual a la salida, sin embargo, se pueden considerar las características bacteriológicas como parámetro para indicar que el proceso de cloración está cumpliendo satisfactoriamente

Tabla 12. Resultados de los criterios de diseño.

Unidad de proceso	Plantas				
	A	B	C	D	E
<b>Cribado</b>					
Inclinación de las rejas	✓	✓	✓	✓	✓
Velocidad del agua a flujo máximo	✓	✓	✓	✓	✓
Separación entre las barras	✓	✓	✓	✓	✓
<b>Desarenador</b>					
Tiempo de retención	✓	✗	✓	NA	✗
Velocidad Horizontal	✓	✓	✓	NA	✓
<b>Sedimentador primario</b>					
Carga hidráulica Sup. a Qmed	✓	NA	NA	NA	NA
Carga hidráulica Sup. a Qmax	!	NA	NA	NA	NA
Tiempo de retención	!	NA	NA	NA	NA
<b>Filtro percolador</b>					
Carga hidráulica superficial	✓	NA	NA	NA	NA
Carga orgánica por volumen	✓	NA	NA	NA	NA
<b>Lodos activados</b>					
Edad de lodos	✓	✓	✓	✓	!
Relación F/M	✓	!	✓	!	!
Carga orgánica volumétrica	!	✓	✗	✓	✓
Relación V/Q	✓	!	✓	!	✓
SSTLM	✓	✓	✓	✓	✓
Recirculación máxima (Qr/Q)	✓	✓	✓	✓	✓
<b>Sedimentador secundario</b>					
Carga hidráulica Sup. a Qmed	✓	✓	✓	!	✓
Carga hidráulica Sup. a Qmax	!	!	✗	✓	✓
Tiempo de retención	✓	✓	✓	!	✓
Carga hidráulica Sup. a Qmed c/rec	✓	!	!	✓	✓
<b>Desinfección</b>					
Tiempo de residencia a Qmed.	✓	✗	✗	✓	✓
Coliformes fecales	✓	✓	✓	✓	✓
<b>Digestor</b>					
Carga volumétrica de sólidos	✓	NA	✗	✓	✓
Tiempo de retención	!	NA	✗	✗	✗

Nota:

- ✓ Cumple. El resultado se encuentra dentro del intervalo reportado en la bibliografía.
- ✗ No Cumple. El resultado se encuentra fuera del intervalo reportado en la bibliografía.
- ! Aceptable. El resultado es ligeramente mayor o menor que el reportado en la bibliografía, sin embargo, es aceptable en relación a los parámetros de diseño recomendados.
- NA No Aplica. Ya que esta unidad de proceso no se encuentra en la planta de tratamiento.

Las unidades de tratamiento de lodos en todas las plantas presentan problemas de diseño, con excepción del digestor de la planta A.

El problema principal en los digestores es que no cumple con la superficie requerida para recibir el lodo biológico producido, en el caso de la planta C se encuentra incompleta esta unidad. Es por eso que para el caso de las plantas A, B, C y D se necesita según el caso, una construcción de un nuevo digestor o ampliación del existente.

Para el caso de la deshidratación de lodos las plantas B, D y E cuentan con lechos de secado insuficientes por lo cual requieren de una ampliación. La planta C no cuenta con un sistema de deshidratación de lodos, es por esta razón que para auxiliar estas plantas de tratamiento actualmente, los lodos son enviados a la planta A, la cual por ser la planta más grande cuenta con dos unidades de filtro banda, los cuales uno opera de manera regular y el otro con muchos problemas, ambos filtros deben procesar tanto los lodos de su sistema de tratamiento como el de las plantas pequeñas deficientes de tratamiento de lodos, por esta razón actualmente no se deshidrata adecuadamente todo el lodo, generando acumulación.

### 5.3 EVALUACIÓN FUNCIONAL DE PROCESOS.

En el recorrido de planta se pudo obtener los resultados de la tabla 13, ya que se verifico la existencia, estado y operación de las siguientes unidades.

De la tabla 13 podemos resaltar los siguientes puntos:

- En la planta B y C los medidores de flujo o se encuentran fuera de operación o descalibrados.
- La planta D no cuenta con flexibilidad de operación en los trabajos de mantenimiento, debido a que solo cuenta con unidad para todos sus procesos, los operadores deben procurar dar mantenimiento eficiente a todos los componentes de los tanques de lodos activados, sedimentador secundario y digestor, para no tener paros frecuentes.
- *Tratamiento preliminar.* Todas las plantas no consideran que su flujo de operación es menor al de diseño, que es con el que son diseñados los canales, por lo tanto, hay acumulación de sólidos sedimentados en el canal, que si no reciben una adecuada y frecuente limpieza generan olores. En las plantas B, D y E donde sus canales desarenadores son muy cortos o inexistentes presentan una operación ineficiente donde es necesario incrementar las frecuencias de extracción de arenas en tiempos más cortos.
- *Recirculación de lodos.* Las plantas A y E presentan problemas; en la A no cuentan con el equipo necesario de bombeo y la E gasta mucha energía al recircular a la cabeza de la planta en lugar de a la entrada del reactor biológico.

Tabla 13. Resultados de la evaluación funcional de procesos.

Concepto	Plantas				
	A	B	C	D	E
<b>Unidad: Infraestructura de llegada.</b>					
Cuenta con línea de bypass.	✓	✓	✓	✓	✓
Se registra el caudal de operación normal a la entrada y a la salida.	✓	!	!	✓	✓
Existe una estructura de entrada o caja receptora del influente.	✓	✓	✓	✓	✓
<b>Unidad: Pretratamiento.</b>					
Número de rejillas gruesas y finas.	✓	✓	✓	✓	✓
Número de canales de desarenación.	✓	✓	✓	✗	✓
Tirante de agua en los canales desarenadores.	!	!	!	!	!
Número de unidades que se encuentran en operación.	!	!	!	!	!
<b>Unidad: Sedimentación primaria.</b>					
Número de unidades y tipo de sedimentador.	✓	NA	NA	NA	NA
Se ajusta el proceso por la presencia de flóculos en la superficie del sedimentador.	✓	NA	NA	NA	NA
Existe sistema de recolección y extracción de lodos.	✓	NA	NA	NA	NA
<b>Unidad: Filtros percoladores.</b>					
Número de unidades.	✓	NA	NA	NA	NA
Material del medio filtrante.	✓	NA	NA	NA	NA
Espesor del medio filtrante.	✓	NA	NA	NA	NA
<b>Unidad: Lodos Activados.</b>					
Número de unidades y tipo.	✓	✓	✓	!	✓
Color del licor mezclado.	✓	✓	✓	✓	✓
<b>Unidad: Sedimentación secundaria.</b>					
Número de unidades y tipo de sedimentador.	✓	✓	✓	!	✓
Se ajusta el proceso por la presencia de flóculos en la superficie del sedimentador.	✓	✗	✓	✓	✗
Existe sistema de recolección y extracción de lodos.	✓	✗	✓	✓	✗
Recirculación de lodo secundario a reactor biológico o influente primario.	!	✓	✓	✓	!
<b>Unidad: Cloración.</b>					
Tipo de desinfectante.	✓	✗	✗	✗	✗
Concentración que se emplea.	✓	✗	✗	✗	✗
Tipo de dosificador.	!	✗	✗	✗	✗
Concentración en mg/L de cloro que debe tener el efluente.	✓	✓	✓	✓	✓

Concepto	Plantas				
	A	B	C	D	E
<b>Unidad: Digestión.</b>					
Número de unidades.	!	×	×	×	✓
Existen olores.	!	NA	!	!	✓
Color del licor de lodos.	✓	NA	!	!	✓
<b>Unidad: Deshidratación de lodos.</b>					
Se deshidratan los lodos.	✓	!	NA	!	!
Se ajusta la frecuencia de operación de la unidad mecánica de acuerdo al volumen producido controlando la humedad de los lodos.	✓	!	NA	!	!
Se almacenan los lodos para su disposición final.	!	!	NA	!	!
<b>Disposición de lodos.</b>					
Se conoce el volumen de lodos producidos y desalojados diariamente o semanalmente.	✓	✓	✓	✓	✓
Se conoce el destino que se le da a los lodos.	✓	✓	✓	✓	✓

**Nota:**

- ✓ Cumple. La estructura evaluada funciona y es operada adecuadamente.
- × No Cumple. La estructura evaluada no funciona o no es operada adecuadamente y además presenta un estado crítico que requiere de una intervención inmediata.
- ! Aceptable. El estado de la estructura a evaluada se encuentra en condiciones de riesgo, es necesario tomar acciones preventivas, para corregir los inconvenientes.
- NA No Aplica. Ya que esta unidad de proceso no se encuentra en la planta de tratamiento.

- **Sedimentadores Secundarios.** En la planta B y E, falta un programa correcto de frecuencia de extracción de lodos en los sedimentadores secundarios. En la planta C se presenta una sedimentación irregular a causa de la existencia de unos chaflanes en el interior de los tanques los cuales reducen el volumen del tanque.
- **Cloración.** En la planta A, la caseta no cuenta con el equipamiento completo y las instalaciones no están debidamente resguardadas. El resto de las plantas tiene un control de dosificación que se ajuste a la calidad del agua tratada.

Para el caso del tratamiento de lodos, se cuentan con varios puntos críticos:

- **Digestor.** En la planta A, se presenta una concentración baja de SST al lodo digerido del filtro banda lo cual obstaculiza técnica y económicamente su coagulación. Para controlar la concentración baja de SST en el efluente de lodo digerido, se sugiere que la unidad de digestión se utilice como digestor-sedimentador, de tal manera que se pueda enviar lodo al filtro banda con concentraciones más bajas y favorables, con esto la dosis de coagulante disminuya y se aproveche eficientemente. También se notan ciertas tuberías de distribución de aire dañadas. En las plantas B, C y D, cuentan con proceso de digestión incompleto o insuficiente por lo que el son tratados en la planta A.
- **Deshidratación de lodos.** El filtro banda de la planta A no cuentan con la capacidad suficiente por lo que los lodos que no se procesan pueden crear problemas

ambientales. Y no cuentan con un dispositivo de almacenamiento de lodo deshidratado, que evite la descarga de lodo directamente en el suelo. En el caso de las plantas B, D y E que cuentan con lechos de secado es necesario, extraer el lodo en el mínimo tiempo posible, para poder contar rápidamente con espacio para colocar lodo fresco, debido a que son muy pequeños para el lodo producido.

#### 5.4 EVALUACIÓN DE INFRAESTRUCTURA CIVIL.

De acuerdo al recorrido de las plantas, los planos y la experiencia de los ingenieros especializados en el área civil se determinó si las estructuras actuales son adecuadas para garantizar una seguridad perimetral y operacional de acuerdo a la normatividad vigente, los resultados se muestran en la tabla 14.

De acuerdo a la tabla 14 se encuentran las siguientes deficiencias:

- De manera general las estructuras de concreto no presentan problemas serios, solamente la falta y deterioro de pintura en algunas plantas y pequeñas fisuras que se manifiestan en leves filtraciones, sin embargo, se deben tomar precauciones en el caso de algunos desprendimientos de concreto, los cuales son producto de la oxidación de varillas que quiebran el concreto.
- Los edificios de la planta A fueron remodelados recientemente por lo que se encuentran dentro de la normatividad, sin embargo, las cuatro plantas restantes en todos sus edificios, presentan filtraciones por losa de azotea, pintura deteriorada, puertas en mal estado, cancelería deteriorada y falta de impermeabilización.
- La seguridad perimetral es adecuada en las plantas A, B y C, cuentan con su barda y protecciones, solo requieren mantenimiento a causa de la corrosión. Caso contrario a las plantas C y D donde es inapropiada, debido a que presentan únicamente una malla ciclónica en mal estado, sin protecciones superiores y faltando una parte de su colindancia sin barrera.
- En la mayoría de las plantas con excepción de la planta D, se presenta problemas fuertes de corrosión en estructuras metálicas, sobre todo en grúas, escaleras y barandales; que vuelven precisa su sustitución completa, de manera particular en la planta B están colapsados en una zona y las plantas C y E, carecen de barandales en algunos puntos importantes con riesgo de caída de 2 m.
- La Iluminación en general es deficiente en zonas exteriores y no ofrece condiciones seguras para operar de noche.

Tabla 14. Resultados de la evaluación infraestructura civil.

Concepto	Plantas				
	A	B	C	D	E
<b>Unidades: Estructuras de concreto (Cajas receptoras, cajas derivadoras, pretratamiento, cárcamo de bombeo, sedimentador primario, filtros percoladores, tanques de lodos activados, tanque de contacto de cloro, digester, lechos de secado, cárcamo de lodos).</b>					
Estado de conservación.	✓	✓	✓	✓	✓
Pintura.	!	!	✗	✓	✓
<b>Unidades: Núcleo de oficinas, cuarto de máquinas o equipos, planta de emergencia, edificios de filtro banda, laboratorios, baños.</b>					
Estado de conservación.	✓	✓	!	✓	✓
Pintura.	✓	✓	!	✓	✓
Impermeabilización.	✓	✗	✗	!	!
<b>Unidades: Portón de acceso, barda perimetral, protecciones de púas y concertina.</b>					
Estado de conservación.	✓	!	✗	✗	✓
Es suficiente para garantizar una seguridad perimetral.	✓	!	✗	✗	✓
Requiere mantenimiento o sustitución.	M	M	I	I	M
<b>Unidades: Estructuras metálicas (Barandales, grúas metálicas, puentes, tensores, armaduras, rejillas, tapas de registro y soportes de área de cárcamos).</b>					
Estado de conservación.	!	✗	✗	✓	!
Es suficiente para garantizar la seguridad del personal operativo.	!	✗	✗	✓	✗
Requiere mantenimiento o sustitución.	M	I	I	M	M
<b>Unidades: Cubierta de vigas y láminas galvanizadas.</b>					
Estado de conservación.	✗	NA	NA	NA	NA
Es suficiente para garantizar la seguridad del personal operativo.	✗	NA	NA	NA	NA
Requiere mantenimiento o sustitución.	I	NA	NA	NA	NA
<b>Unidades: Iluminación</b>					
Existe iluminación interior suficiente.	✓	!	!	!	!
Existe iluminación en vialidades.	✗	!	!	!	✗
El nivel de iluminación es óptimo para operación.	!	!	!	!	✗
Requiere mantenimiento, sustitución o adicciones.	I	I	M	M	I

Nota:

- ✓ Cumple. El estado de la estructura a evaluar cumple con la normatividad requerida.
- ✗ No Cumple. El estado de la estructura a evaluar no cumple con la normatividad requerida y además presenta un estado crítico que requiere de una intervención inmediata.
- ! Aceptable. El estado de la estructura a evaluar se encuentra en condiciones próximas a no cumplir con la normatividad, requiere mantenimiento inmediato.
- NA No Aplica. Ya que esta unidad de proceso no se encuentra en la planta de tratamiento.
- I Inversión. Es necesaria una inversión para sustituir las unidades dañadas.
- M Mantenimiento. Es necesario el mantenimiento correctivo.

## 5.5 EVALUACIÓN DE INFRAESTRUCTURA ELÉCTRICA Y EQUIPOS ELECTROMECAÑICOS.

De acuerdo al recorrido de las plantas, los consumos de energía y la experiencia de los ingenieros especializados en el área electromecánica se evaluó los equipos y las instalaciones eléctricas actuales, los resultados se muestran en la tabla 15.

Tabla 15. Resultados de la evaluación infraestructura eléctrica y equipos electromecánicos.

Concepto	Plantas				
	A	B	C	D	E
<b>Unidad: Acometida</b>					
Estado de los cables de media tensión.	!	✓	✓	✓	✓
Estado de las cuchillas fusibles.	!	✓	✓	✓	✓
Estado de aisladores, conectores y apartarrayos.	!	✓	✓	✓	✓
<b>Unidad: Transformador</b>					
Tipo, capacidad, tipo de conexión, número de equipos que alimenta, temperatura máxima del transformador.	✓	✓	✓	!	✓
Estado del transformador y área de la subestación.	✓	✓	✓	!	✓
Estado de las conexiones de baja o media tensión.	!	!	✓	!	✓
<b>Unidad: Sistema de tierras.</b>					
Existencia del sistema de tierras y estado del mismo.	!	!	!	!	!
<b>Unidad: Interruptor General.</b>					
Tipo, capacidad y ajuste del interruptor general.	!	✓	✓	✓	✗
Estado del interruptor general.	!	✓	✓	✓	✗
<b>Unidad: Tablero de distribución.</b>					
Estado del tablero y derivados.	!	✓	✓	✓	✗
<b>Unidad: Planta generadora y tablero de transferencia.</b>					
Disponibilidad del equipo.	!	✗	✗	!	✗
<b>Unidades: Tableros de control de bombas cárcamo de aguas crudas, bombas recirculación de lodos, sopladores, agitadores mecánicos,</b>					
Estado del tablero y conexiones.	!	✗	✗	!	✗
Requiere mantenimiento o sustitución.	I	I	I	I	I
<b>Unidad: Capacitores.</b>					
Número, marca, capacidad y calibre conductor de los capacitores.	!	✓	✓	✗	✓
Estado de los capacitores	!	!	!	✗	!
Requiere mantenimiento o sustitución.	I	M	M	I	M

Concepto	Plantas				
	A	B	C	D	E
<b>Unidades: Bombas de cárcamo de agua cruda, cárcamo de lodos y purga.</b>					
Existencias y estado de la bomba.	!	!	!	!	!
Capacidad, velocidad, tensión, corriente, eficiencia y tipo del motor eléctrico.	✓	✓	✓	✓	✓
Estado actual del motor eléctrico.	!	✗	!	✓	✓
Estado de la instalación eléctrica de la bomba.	!	!	!	!	!
Requiere mantenimiento o sustitución.	I	I	I	M	M
<b>Unidad: Pretratamiento automático.</b>					
Existencias y estado de los equipos.	!	NA	NA	✓	NA
Requiere mantenimiento o sustitución.	I	NA	NA	M	NA
<b>Unidad: Lodos activados.</b>					
Existencia y estado de las válvulas de compuerta.	!	NA	NA	✓	NA
Existencia y estado de los sensores de oxígeno.	I	NA	NA	M	NA
<b>Unidad: Sedimentadores y filtros.</b>					
Estado de las rastras y aspersores.	✓	NA	NA	NA	NA
Requiere mantenimiento o sustitución.	M	NA	NA	NA	NA
<b>Unidad: Sopladores o agitadores mecánicos</b>					
Existencia y estado de los sopladores o agitadores mecánicos.	!	✗	✗	!	✓
Capacidad, velocidad, tensión, corriente, eficiencia y tipo del motor eléctrico.	✓	!	✗	✓	✓
Estado actual del motor eléctrico.	!	!	✓	✓	✓
Potencia instalada, potencia utilizada y eficiencia.	✓	✓	✗	✓	✓
<b>Unidad: Caseta de cloración.</b>					
Existencia y estado del equipo dosificador.	!	✗	✗	✗	✗
Requiere mantenimiento o sustitución.	I	I	I	I	I

**Nota:**

- ✓ Cumple. El estado de la estructura a evaluar cumple con la normatividad requerida.
- ✗ No Cumple. El estado de la estructura a evaluar no cumple con la normatividad requerida y además presenta un estado crítico que requiere de una intervención inmediata.
- ! Aceptable. El estado de la estructura a evaluar se encuentra en condiciones próximas a no cumplir con la normatividad, requiere mantenimiento inmediato.
- NA No Aplica. Ya que esta unidad de proceso no se encuentra en la planta de tratamiento.
- I Inversión. Es necesaria una inversión para sustituir las unidades dañadas.
- M Mantenimiento. Es necesario el mantenimiento correctivo.

- En todas las plantas los transformadores están funcionando, pero requieren mantenimiento y adecuación de las conexiones, principalmente la planta D. De igual manera en todas, falta equipamiento como los son: sopladores, bombas y agitadores mecánicos, como lo es el caso de la planta C, donde es necesario adaptar y adicionar aireadores flotantes al sistema de aire actual.

- Los tableros de control de todas las plantas están dañados o tienen elementos faltantes, el cableado interno esta desorganizado o instalado de manera provisional, de manera particular la planta E tiene tableros de control obsoletos, no hay un tablero de distribución y el interruptor principal está saturado con los cables de derivación, el banco de capacitores esta sobrepuesto y con el cable expuesto. Es de primordial atención en este punto, la planta A, ya que es la más grande.
- En la Planta A, las rejillas automáticas, están fuera de operación.
- Las conexiones de las bombas están provisionales y en el caso de las plantas C y D se deben corregir en las bombas de recirculación.
- En las plantas A, B y E, el cableado de los capacitores está expuesto. Y en la planta D, no hay banco de capacitores.
- En la planta A el equipo de cloración está incompleto y las demás plantas no disponen de equipo de cloración.
- En la planta A y D, se dispone de plantas de emergencia, pero están fuera de operación, requieren rehabilitación. Las plantas B, C y E no cuentan con planta de emergencia.
- En las plantas B y C los medidores de flujo se encuentran fuera de operación.

## 5.6 PUNTOS CRÍTICOS

De las 5 plantas de tratamiento de agua residual, se identificaron los siguientes puntos críticos:

- El 80% de las PTAR's las cámaras de tratamiento se encuentran azolvadas, con problemas a nivel de obras civiles, además de presentar problemas eléctricos, hidráulicos y mecánicos;
- Las 5 PTAR's operan en promedio a un 70% de su capacidad total, cumpliendo al mínimo los límites permisibles de acuerdo a la normatividad vigente.
- El 100% de las plantas no cumplen con el tratamiento y disposición de lodos de acuerdo a la normatividad vigente.
- El 100% de las PTAR's no están automatizadas;
- Existen 2 PTAR's que no cuentan con delimitación perimetral adecuada.

Los principales destaques sobre el mal estado de conservación de la PTAR A son:

- Se encuentra trabajando al 75% de su capacidad debido a la falta de equipos electromecánicos y mantenimientos en la infraestructura;
- Los 3 equipos de impulsión de bombeo en el cárcamo de entrada no funcionan;

- 2 de los 5 sopladores no funcionan y los otros tres necesitan de mantenimiento;
- No existe un sistema de tratamiento de lodos suficiente, generando una disposición irregular del mismo sin tratamiento en los terrenos en el interior de la PTAR, se verificando una alta nivel de contaminación en esos suelos;
- Cableado eléctrico expuesto y mala condición de acondicionamiento;
- Una planta generadora de energía, no funciona;
- La caseta de cloración no está confinada y no tiene dispositivos de medición de gases.
- Las válvulas en los reactores biológicos y los difusores están en mal estado de conservación.

## 5.7 LODOS GENERADOS

En las actividades de desazolve del sistema de alcantarillado, así como en la operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales se generan lodos, que, en caso de no darles una disposición final adecuada, pueden provocar contaminación de la atmósfera, de los cuerpos de agua y/o de los suelos.

Los lodos por sus características propias o por las adquiridas después de un proceso de estabilización pueden ser susceptibles de aprovechamiento siempre y cuando cumplan con los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos en la NOM-004-SEMARNAT-2002 o en su caso, ser dispuestos en forma definitiva como residuos no peligrosos; para atenuar sus efectos contaminantes para el medio ambiente y proteger a la población en general. Los lodos no tratados y no estabilizados se consideran como residuos peligrosos y deben ser confinados bajo estrictas normas ambientales.

Para el traslado de los lodos el sistema de agua y saneamiento debe cumplir con la Norma Oficial Mexicana NOM-087-ECOL-SSA1-2002 y su confinamiento final en rellenos sanitarios con “Certificado de Calidad Ambiental” vigente emitido por la SEMARNAT.

Los lodos generados como parte de los procesos biológicos de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, son equivalentes a más de 6,000 toneladas anuales y reciben un tratamiento deficiente o nulo y no son confinados o dispuestos de manera adecuada. De las 5 plantas de tratamiento de aguas residuales que se tienen consideraron para este estudio; 1 de ellas solo cuenta con un digestor de lodos incompleto para su tratamiento, 3 cuentan con un digestor en operación, pero un sistema de deshidratación de lodos fuera de operación o insuficiente de área; y solo la PTAR A, cuenta con un sistema avanzado que puede ofrecer un tratamiento adecuado.

Ante la falta de tratamiento de lodos el sistema de agua y saneamiento, concentra todos los lodos provenientes de las distintas plantas en la PTAR A, depositándolos en un área específica, donde son almacenados en espera de ser tratados.

Cabe señalar que el sitio en el que se encuentran almacenados los lodos en la PTAR A no cumple con medidas sanitarias para impedir infiltraciones al subsuelo y contar con un sistema de recolección de lixiviados, por lo que se puede estar generando contaminación del suelo y del manto acuífero subyacente.

## 5.8 ASPECTOS AMBIENTALES, SEGURIDAD E HIGIENE

Los principales aspectos de interés identificados en la mayoría de los activos visitados se enlistan a continuación:

- Plantas de tratamiento con descarga directa de aguas residuales contaminadas en cuerpos receptores ríos, mar y lagunas.
- Falta de manejo de lodos y arenas.
- Falta de manejo de residuos.
- Ausencia de medidores de flujo en plantas.
- Delimitación insuficiente de instalaciones.
- Aspectos de seguridad e higiene, relacionados principalmente con falta de barandales, las condiciones del sistema eléctrico, la falta de tapas, la falta de protección de equipos hidráulicos, la corrosión de elementos metálicos (tubería y estructura como escaleras) entre otros.

Todas esas afectaciones anteriormente descritas, además de estar sujetas a altas multas por parte de las entidades regulatorias al sistema de agua y saneamiento, colocan en riesgo la seguridad y salud de los trabajadores y ciudadanos de los Municipios es necesario realizar un esfuerzo económico para dar solución a estos problemas de manera inmediata.

## 5.9 INVERSIÓN A CORTO PLAZO

Se requiere de una fuerte inversión a corto plazo en la infraestructura electromecánica y los equipos, la cual se puede resumir en las siguientes acciones:

- Suministro de equipamiento faltante, y en algunos casos reparar o reemplazar los equipos dañados.
- Corregir las conexiones eléctricas existentes en cada equipo.
- Sustituir las peras de nivel de los cárcamos.
- Sustitución de los tableros de control.
- Mantenimiento o instalación de transformadores.
- Instalar adecuadamente los capacitores.
- Servicio de mantenimiento preventivo-correctivo en la línea de distribución de aire (cambio de válvulas).
- Mantenimiento a tuberías hidráulicas y válvulas.
- Cambio de las peras de nivel por un sensor ultrasónico, integrado con variadores de velocidad en las bombas.

- Instalación de un tablero de distribución.
- Suministro de equipo de cloración.
- Rehabilitación de la planta de emergencia.
- Mantenimiento a las parrillas en los pasos en las rejillas área de pretratamiento.

De igual forma en la infraestructura civil, las acciones primordiales son:

- Rehabilitar las estructuras metálicas (escaleras, barandales, grúas y soportes de rejillas) con tratamiento anticorrosivo y protector. En los casos que sea posible sustitución de barandales por piezas de acero inoxidable.
- Instalación de un sistema de alumbrado eficiente y de bajo consumo en base a un proyecto que solucione el tema conforme a las normas aplicables.
- Aplicación de impermeabilizante manto prefabricado de calidad en el núcleo de edificios (oficinas y cuartos de máquinas), se requiere darle un buen mantenimiento al sistema existente, sellando fisuras y pliegues con problemas. Y la canalización de aguas pluviales con enladrillado.
- Limpieza general y aplicación de pintura vinil acrílica de alta calidad en todas las áreas exteriores e interiores.
- Cambiar techo de cárcamos de reciclado de lodos.
- Resanar todos los desprendimientos de concreto por oxidación con mortero de alta adherencia, atacando el origen con una buena limpieza del área y aplicación de sistema protector de alta calidad.
- Rehabilitación de malla ciclónica y protecciones de púas y concertina en perímetro del predio, especialmente en las plantas que no cuentan con la protección perimetral.

## 6. CONCLUSIONES

- Las 5 plantas que se encuentran en operación con tratamiento cumplen la calidad requerida por la NOM-001-SEMARNAT-1996, aunque solo ocupan el 70% de su capacidad y no todas cumplen con la eficiencia requerida de acuerdo al tipo de tratamiento del 90%, por lo cual se deben programar acciones de cambio en la forma de operación para evitar que disminuya la eficiencia de tratamiento, dejando de cumplir con la calidad de agua y evitar el pago de multas por parte de la SEMARNAT.
- En general, las unidades de procesos como: Tratamiento preliminar, lodos activados y sedimentadores, se encuentran bien diseñadas, si presentan fallas es por parte de operación y la falta de equipamiento.

Un problema importante en todas las plantas de tratamiento es la cloración, la planta A cuenta con un sistema de cloración incompleto, el cual necesita una rehabilitación urgente, en el caso de las plantas pequeñas, la dosificación de hipoclorito de calcio no es eficiente por lo que se recomienda que el producto se utilice en forma líquida para eficientizar técnica y económicamente la aplicación del desinfectante, cambiándose a hipoclorito de sodio, además de que es necesario medir rutinariamente el cloro residual en el agua tratada, ya que los análisis de calidad reportados por el laboratorio externo acreditado, no contaban con este parámetro.

Por el problema crítico del tratamiento de lodos generados en todas las plantas, se propone seguir enviando el lodo en exceso a la planta A de aquellas plantas pequeñas que cuentan con poca capacidad para ampliar o implementar un sistema adecuado de tratamiento de lodos y que además se encuentren cercanas a ella. En la planta A se deben adquirir más equipos tipo filtro banda para procesar todo el lodo que se genera en esta planta y el adicional de otras plantas con el fin de lograr subsanar esta deficiencia y para el problema de los lodos saturados y acumulados se propone construir una tolva de almacenamiento de lodos.

En las plantas que cuentan con un digestor se debe dar el mantenimiento necesario y ampliar los lechos de secado.

- El estado de conservación y el nivel de operación de la infraestructura hidráulica y electromecánica entregada a la nueva empresa para operar, se encuentra bastante deficiente y requiere una fuerte inversión para la recuperación inmediata del sistema. Una propuesta para lograr que la facturación y respectiva recaudación proyectada en el Modelo Financiero de la Concesión no se vea afectada negativamente es la aplicación de una nueva tarifa aprobada.

- Implementar en las estructuras de concreto un sistema de protección en áreas de contacto con aguas residuales, que pueda brindar protección contra el desgaste y corrosión por efectos de la fricción y acidez del agua, incrementando su vida útil.
- Se recomienda en todas las plantas integrar un plan de mantenimiento para evitar los daños prematuros en los equipos. Y en las que sea necesario la instalación de un sensor de nivel ultrasónico para el cárcamo conjuntamente con el cambio de los arrancadores a tensión plena por variadores de velocidad, para tener un control más preciso sobre el nivel de operación y disminuir los arranques y paros constantes.
- En la seguridad en el trabajo, existen deficiencias en planta, los barandales están dañados, hay rejillas o tapas de registros faltantes, falta señalética (rutas de evacuación, procedimientos en caso de contingencias), falta iluminación en muchas de las áreas de trabajo, existen conexiones eléctricas expuestas (riesgo de choque eléctrico), el área de cloración no dispone del equipamiento completo. Por lo tanto, es importante identificar y atender estas deficiencias en la planta, así como la capacitación constante del personal operativo de las plantas, en procedimientos, manejo de sustancias peligrosas, uso del equipo de protección personal con la finalidad de evitar accidentes laborales.
- Con respecto al manejo de productos químicos, los registros no están concisos ni claros en todas las plantas, la dosificación es incorrecta y la planta A, que es la única que maneja cloro gas, existe un procedimiento en el caso de fugas, sin embargo, su caseta está incompleta, urge una rehabilitación para evitar multas y garantizar la seguridad del personal.
- Como se observa en la tabla 15, solo dos plantas disponen de una planta de emergencia, pero en ambos casos están fuera de operación, debido a que todas las plantas operan con energía eléctrica, las plantas de emergencia son de vital importancia, es necesario invertir en la rehabilitación y la inversión de nuevas plantas de ser el caso, para de esta manera garantizar, un suministro de energía continuo, donde el equipo no suspenda su funcionamiento en una ocasión de especial.

- Por último, en todas las plantas con excepción de la planta A, falta capacitación en las plantas por parte de los operadores, desde el conocimiento de equipos como el mínimo de conceptos fundamentales para comprender el sistema de tratamiento, es necesario crear un programa de capacitación con el objetivo de tener operadores entrenados en conceptos del tratamiento de forma teórica-práctica para que puedan comprender el sistema de tratamiento y una parte práctica en la que los participantes podrán realizar mediciones en cada unidad de tratamiento y así mejorar el aprovechamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

## Bibliografía

- [1] Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York. (2014). Manual de tratamiento de aguas negras. Ed. Limusa, México.
- [2] Metcalf & Eddy, Inc. (1991). Wastewater Engineering: Treatment disposal reuse. 3<sup>rd</sup> ed., Ed. Mc Graw Hill, Singapore.
- [3] Eckenfelder W. (1989). Industrial water pollution control. 2<sup>nd</sup> ed., Ed. Mc Graw Hill, Singapore.
- [4] Ramalho R. S. (2003). Tratamiento de aguas residuales. Ed. Reverté, España.
- [5] <http://www.conagua.gob.mx> (2017). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. *Evaluación Rápida de Plantas Potabilizadoras*. Fecha de acceso "8 de diciembre de 2017".
- [6] <http://www.conagua.gob.mx> (2017). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. *Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Tratamiento y disposición de lodos*. Fecha de acceso "8 de diciembre de 2017".
- [7] Barnett C. (2012). Blue Revolution: Unmaking America's Water Crisis, Ed. Beacon Press, USA.
- [8] Mijaylova Nacheva P. (1999). *Curso Teórico Practico para el Tratamiento de Lodos Residuales*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua, Mexico.
- [9] EPA. (1999). *Folleto Informativo de Tratamiento de Aguas Residuales: Desinfección*. Environmental Protection Agency. Washington D.C.: United States.
- [10] IMTA. (2004). Evaluación de Plantas Potabilizadoras. Curso-Taller Iberoamericano. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).