



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**PROPUESTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA
RESIDUAL PARA LOS TALLERES DE
MANTENIMIENTO DE LA LÍNEA 12 DEL SISTEMA
DE TRANSPORTE COLECTIVO**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN INGENIERIA SANITARIA

PRESENTA:

ING. JULIO CESAR NAVARRETE AVALOS

DIRECTORA DE TESINA: DRA. ALEJANDRA CASTRO GONZÁLEZ

MÉXICO, D.F.

ENERO 2014

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: Dr. Oscar González Barceló

VOCAL: Dra. Alejandra Castro González

SECRETARIO: M. en I. Alba Beatriz Vázquez González

SUPLENTE: M. en I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose

SUPLENTE: M. en I. Juan Hilario García Gil

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

ASESOR DEL TEMA:

Dra. Alejandra Castro González

SUSTENTANTE:

Julio Cesar Navarrete Avalos

INDICE

AGRADECIMIENTOS	I
INDICE DE FIGURAS	II
INDICE DE TABLAS	II
RESUMEN	III
INTRODUCCIÓN	IV
OBJETIVO	IV
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	1
1.1 Agua residual	1
1.2 Caracterización de aguas residuales	1
1.2.1 Características físicas	1
1.2.2 Sólidos	1
1.2.3 Turbiedad.....	2
1.2.4 Color	2
1.2.5 Olor.....	2
1.2.6 Temperatura.....	2
1.2.7 Conductividad eléctrica (CE)	2
1.2.8 Características químicas	2
1.2.9 Características químicas inorgánicas	3
1.2.10 pH	3
1.2.11 Alcalinidad	3
1.2.12 Cloruros	3
1.2.13 Sulfatos	3
1.2.14 Gases.....	3
1.2.15 Características químicas orgánicas	4
1.2.16 Demanda bioquímica de oxígeno	4
1.2.17 Grasas y aceites	5
1.2.18 Características biológicas	5
1.2.18 Bacterias	5
1.2.19 Parásitos.....	6
1.2.20 Virus	6
1.3 Normatividad aplicable.....	7

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS	9
2.1 Sistemas de tratamiento de agua residual	9
2.2 Clasificación de los métodos de tratamiento	9
2.2.1 Procesos físicos unitarios.....	9
2.2.2 Procesos químicos unitarios	10
2.2.3 Procesos biológicos unitarios	11
2.2.4 Medida de la biodegradabilidad	14
2.2.5 Trenes de tratamiento	15
2.3 Tratamiento de lodos de desecho.....	18
2.3.1 Degradación aerobia	18
2.3.2 Degradación anaerobia	19
2.3.3 Estabilización química.....	19
2.3.4 Espesamiento de lodos.....	20
2.3.5 Deshidratación mecánica	20
2.3.6 Lechos de secado	20
2.3.7 Compostaje de lodos.....	21
CAPÍTULO 3. CASO DE ESTUDIO	22
3.1 Descripción del caso de estudio.....	22
3.2 Caracterización del agua residual en los talleres de mantenimiento del STC	22
3.3 Flujo de agua residual generado en los talleres de mantenimiento.....	23
3.4 Antecedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales	23
3.5 Planos de lugar	24
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	28
4.1 Planteamiento de alternativas	28
4.1.1 Consideraciones generales para el planteamiento de alternativas	28
4.2.1 Características del influente.....	28
4.3 Uso del agua tratada.....	33
4.3.1 Reuso urbano	33
4.3.2 Reuso industrial	34
4.3.3 Reuso agrícola	34
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	36
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Alejandra Castro González por toda su atención, consejos y apoyo para la realización de este trabajo.

A los miembros del jurado: Dr. Oscar González Barceló, M. en I. Alba Beatriz Vázquez González, M. en I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose, M. en I. Juan Hilario García Gil, por sus valiosas observaciones.

Al Dr. Enrique Cesar Valdez, por la oportunidad de tener esta invaluable experiencia de formación profesional.

A Sandra Bonilla y Concepción Rangel, por toda la ayuda y paciencia que me brindaron.

A mi familia y amigos, por su apoyo incondicional, no solo durante esta etapa, sino durante toda mi vida.

INDICE DE FIGURAS

Figura 3. 1 Ubicación del Paraje conocido como “La Ciénega”	25
Figura 3. 2 Panorámica actual de los talleres de mantenimiento.....	26
Figura 3. 3 Localización de las áreas que conforman los talleres de mantenimiento	27
Figura 3. 4 Tren de tratamiento propuesto	33

INDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Niveles de tratamiento del agua residual.....	9
Tabla 2. 2 Procesos físicos unitarios empleados en el tratamiento de agua residual.....	10
Tabla 2. 3 Procesos químicos unitarios empleados en el tratamiento de agua residual.....	10
Tabla 2. 4, Valores típicos de relación de biodegradabilidad.....	15
Tabla 2. 5, Relación de niveles de tratamiento del agua residual.....	15
Tabla 3. 1 Resultado de los parámetros analizados	23
Tabla 4. 1 Aspectos a considerar para la propuesta de alternativas.....	28
Tabla 4. 2 Comparativo entre los parámetros del agua residual de los talleres de Zaragoza y los límites máximos permisibles indicados en la normatividad aplicable	29
Tabla 4. 3 Concentraciones teóricas después del tratamiento primario.....	30
Tabla 4. 4 Porcentaje de remoción por tipo de tratamiento	31
Tabla 4. 5 Concentraciones teóricas por proceso de tratamiento	32

RESUMEN

En el presente trabajo se proponen las alternativas de tratamiento de aguas residuales que se generarán en los talleres de mantenimiento de la Línea 12 del Sistema de Transporte Colectivo, a fin de cumplir con la normatividad vigente, para la correcta disposición del efluente, ya sea en los canales cercanos, en el alcantarillado, o bien, se reutilice nuevamente en las actividades que se desarrollarán en el mismo. Debido a que aún no inician las actividades en los talleres de mantenimiento de la Línea 12, se consideraron las características del agua residual generada en los talleres de mantenimiento de Zaragoza para el análisis de las alternativas, ya que las actividades que se realizan serán similares a las que se desarrollaran en los nuevos talleres de Tláhuac. Además, se tendrán el flujo de agua residual doméstica, proveniente de la zona de comedor, baños y servicios generales. De los resultados del análisis de 18 parámetros del efluente generado en los talleres de Zaragoza, el agua residual generada tiene un contenido alto de grasas y aceites cuya concentración es de 626.56 mg/l, así como un valor de 362.5 mg/l de sólidos en suspensión, con flujo aproximado de 20 l/s, por lo que se plantea un tratamiento preliminar de las aguas aceitosas seguido de un proceso biológico de lodos activados, con lo que se obtendría la calidad suficiente de acuerdo a la normatividad, para su reuso en actividades con contacto directo y de esta manera lograr una menor demanda de agua.

INTRODUCCIÓN

El Programa General de Desarrollo del Distrito Federal 2007–2012 establece siete ejes estratégicos de acción entre los que se encuentran los de equidad, desarrollo sustentable y de largo plazo y nuevo orden urbano (servicios eficientes y calidad de vida, para todos); se destaca que dentro de las estrategias de desarrollo urbano y transporte público, la necesidad de mejorar la distribución territorial de los servicios, la infraestructura y el equipamiento urbano, precisándose como objetivo, ampliar y mejorar el Sistema de Transporte Colectivo.

De conformidad con lo anterior, se inició la construcción de la Línea 12 del Sistema de Transporte Colectivo (Línea Dorada) en noviembre de 2008, a fin de beneficiar aproximadamente a cuatrocientos mil pasajeros al día, permitiendo un mejor desplazamiento de los usuarios, y así optimizar la comunicación interurbana y un descenso efectivo de las horas-hombre-viaje que incida en una menor necesidad del empleo de vehículos particulares, fomentando un uso más racional del transporte colectivo.

Dentro de la infraestructura necesaria desde el punto de vista operacional, funcional y de menor impacto urbano, se estableció la construcción de las instalaciones de la terminal y taller de mantenimiento en el predio Denominado Terromotitla, ubicado en el Paraje conocido como “La Ciénega” en el Pueblo de San Francisco Tlaltenco, Delegación Tláhuac, Distrito Federal, en razón de que cuenta con una superficie de aproximadamente 29 hectáreas, suficientes para la construcción de las instalaciones de acuerdo a los estudios de ingeniería básica realizados por el Sistema de Transporte Colectivo.

Considerando que durante el mantenimiento de los trenes en los Talleres de Tláhuac, será necesario el lavado de los mismos y de las áreas comunes, el objetivo será el de proporcionar un servicio ambientalmente limpio, ya que una vez que inicie la operación de los talleres de mantenimiento, habrá un incremento en la demanda de agua, así mismo, el agua residual producto de las actividades antes mencionadas podrá impactar negativamente el ambiente si es dispuesta sin un tratamiento adecuado, debido a su alto contenido de grasas, aceites y sólidos suspendidos. En consecuencia se deberá implementar una planta de tratamiento de aguas residuales, a fin de depurar el agua y reutilizar el efluente tratado, en labores de limpieza de pisos, lavado de partes mecánicas, lavado de vagones y en el riego de áreas verdes, con lo que se buscará mitigar el impacto negativo en la zona por el aumento en la demanda. Por todo lo anterior se desprende el objetivo de este trabajo.

OBJETIVO

Proponer alternativas de tratamiento para las aguas residuales que se generarán en los talleres de Tláhuac de la Línea 12 del Sistema de Transporte Colectivo, a fin de que el efluente tenga la calidad necesaria para su reutilización en actividades que se desarrollen en el mismo.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

1.1 Agua residual

El agua residual se define como las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos público urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento y en general de cualquier uso, así como la mezcla de ellas (LAN, 1992).

Como se menciona en la definición anterior, las aguas residuales están compuestas de partículas muy variadas, tanto en tamaño como en composición. La variedad en las características implica la necesidad de hacer un análisis de su calidad, a fin de determinar su grado de contaminación, y en función de este, proponer el sistema de tratamiento adecuado para remover dichos contaminantes, y en consecuencia, disponerla de manera adecuada sin impactar los cuerpos de agua o el suelo, o en el mejor de los casos, reutilizar el efluente tratado.

1.2 Caracterización de aguas residuales

Las características del agua residual generalmente se clasifican como físicas, químicas y biológicas.

1.2.1 Características físicas

Estas propiedades son adquiridas debido al contenido total de sólidos en sus diferentes formas de materiales flotantes, sustancias coloidales y productos disueltos, además del uso que se le da al agua antes de su disposición en la red de alcantarillado. Las principales características físicas del agua residual son: contenido de sólidos, color, turbiedad, olor, temperatura y conductividad eléctrica.

1.2.2 Sólidos

El agua residual presenta una gran variedad de sólidos que van desde hilachas hasta materiales coloidales. Un metro cúbico de agua residual pesa aproximadamente 1,000,000 g y contiene alrededor de 500 g de sólidos totales; éstos pueden estar en forma suspendida o en disolución. Los sólidos totales se determinan evaporando un volumen determinado de muestra y pesando el residuo remanente siendo que los resultados se expresan en mg/l. De los aproximadamente 500 g de sólidos totales, la mitad son sólidos disueltos tales como calcio, sodio y compuestos orgánicos solubles. Los 250 g restantes son insolubles. La fracción insoluble consiste en aproximadamente 125 g de material que puede sedimentarse en 30 minutos si se deja al agua en condiciones de quietud. Los 125 g restantes permanecerán en suspensión por mucho tiempo.

Los sólidos volátiles son aquella fracción que se volatiliza a 550°C. La concentración de sólidos volátiles se suele considerar como una medida aproximada del contenido de materia orgánica, o en ciertos casos, de las concentraciones de sólidos biológicos tales como bacterias o protozoos. Los sólidos fijos o cenizas constituyen una medida aproximada del contenido mineral del agua residual. Los sólidos suspendidos son principalmente de naturaleza orgánica; están formados por algunos de los materiales más objetables contenidos en el agua residual. La mayor parte de los sólidos suspendidos son desechos humanos, desperdicios de alimentos, papel, trapos y células biológicas que forman una masa de sólidos suspendidos en el agua. Incluso las partículas de materiales inertes adsorben sustancias orgánicas en su superficie (César y Vázquez, 2003).

1.2.3 Turbiedad

La turbiedad es una medida de las propiedades de dispersión de la luz en el agua, con relación al material en suspensión, es decir, al pasar un haz de luz a través de ella, la luz se dispersa y se absorbe en vez de transmitirse en línea recta. La medición de la turbiedad se realiza mediante la comparación entre la intensidad de la luz dispersa en una muestra y la luz dispersa por una suspensión de referencia bajo las mismas condiciones. Se emplean suspensiones de formacina como patrones primarios de referencia. Los resultados de las mediciones de la turbiedad se dan en unidades nefelométricas de turbiedad (UNT).

1.2.4 Color

El color en aguas residuales se debe a los sólidos suspendidos, material coloidal y sustancias en solución. Cuando el color es causado por sólidos suspendidos se llama color aparente, mientras que el color causado por sustancias disueltas y coloidales se denomina color verdadero.

1.2.5 Olor

El olor en las aguas residuales es debido a la gran variedad de compuestos malolientes que son liberados al degradarse la materia orgánica en condiciones anaerobias. El principal compuesto de olor indeseable es el ácido sulfhídrico (olor a huevo podrido).

1.2.6 Temperatura

La temperatura en las aguas residuales es de importancia debido a que los sistemas de tratamiento de aguas residuales que incluyen procesos biológicos dependen de la temperatura para su correcto funcionamiento, también se ve afectada la transferencia de gases y la vida acuática. Por ejemplo, al aumentar la temperatura, disminuye la solubilidad del oxígeno en el agua y aumenta la velocidad de degradación de los compuestos orgánicos.

1.2.7 Conductividad eléctrica (CE)

Como la corriente eléctrica es transportada por iones en solución, el aumento en la concentración de iones provoca un aumento en la conductividad. Por lo tanto, el valor de la medida de conductividad eléctrica (CE) es usado como un parámetro sustituto de la concentración de sólidos disueltos totales (SDT). En la actualidad el parámetro más importante para determinar la posibilidad de uso de un agua para riego es la CE; es así como la salinidad del agua residual tratada que se desea usar para riego se establece mediante la medición de su CE.

1.2.8 Características químicas

Las propiedades químicas del agua tienen gran importancia debido a que interactúan con las del suelo, variando el valor de cada parámetro, son proporcionadas por componentes que se pueden agrupar en dos categorías según su naturaleza: materia orgánica y compuestos inorgánicos.

1.2.9 Características químicas inorgánicas

Los constituyentes químicos inorgánicos de interés comprenden nutrientes, constituyentes no metálicos, metales y gases. Entre los nutrientes inorgánicos están amoníaco libre, nitrógeno orgánico, fósforo orgánico y fósforo inorgánico. El nitrógeno y el fósforo son de gran importancia, ya que han sido identificados como los principales nutrientes causantes del crecimiento indeseable de plantas acuáticas.

1.2.10 pH

El pH mide la concentración del ion hidrógeno en una solución, es decir, indica la medida de acidez o alcalinidad del agua, y se define como el logaritmo negativo de la concentración de ion hidrógeno. Su importancia radica en que los valores de pH mayores de 7.5 y menores de 6.5 afectan a los organismos involucrados en el tratamiento de las aguas residuales.

1.2.11 Alcalinidad

La alcalinidad del agua se define como su grado para neutralizar los ácidos. En aguas residuales, la alcalinidad se debe a la presencia de elementos como calcio, magnesio, sodio, potasio, o de ion amonio. De todos ellos, el bicarbonato de calcio y el bicarbonato de magnesio son los más comunes.

La alcalinidad en las aguas residuales ayuda a regular los cambios de pH causados por la adición de ácidos. Normalmente el agua residual es alcalina, propiedad adquirida de las aguas de abastecimiento, aguas subterráneas y los materiales adicionados durante los usos domésticos.

1.2.12 Cloruros

Para fines de reutilización o disposición, la presencia de cloruros en aguas residuales es un parámetro importante, ya que una elevada concentración interfiere con el desarrollo y crecimiento vegetal. En las aguas residuales, los cloruros son añadidos como consecuencia del uso, por ejemplo, las heces humanas aportan aproximadamente 6 g de cloruros por persona por día.

1.2.13 Sulfatos

El ion sulfato se encuentra en forma natural tanto en las aguas de abastecimiento como en las aguas residuales. El azufre es indispensable para la síntesis de proteínas, y por eso se libera cuando ocurre la degradación de las mismas. Los sulfatos se reducen biológicamente a sulfuros bajo condiciones anaerobias y pueden formar sulfuro de hidrógeno al combinarse con el hidrógeno.

1.2.14 Gases

Las aguas residuales urbanas pueden contener diversos gases con diferente concentración, los más importantes son los siguientes:

Oxígeno disuelto.- Es el más importante, ya que es consumido por la actividad química y biológica. El oxígeno disuelto depende de muchos factores, como la temperatura, altitud, actividad biológica, etc. El control del oxígeno disuelto a lo largo del tiempo, nos suministra una serie de datos fundamentales para el conocimiento del estado de un agua residual.

Ácido sulfhídrico.- Es un gas que se forma al descomponerse en un medio anaerobio ciertas sustancias orgánicas e inorgánicas que contienen azufre, su presencia se manifiesta fundamentalmente por los olores que produce. Es un indicativo de la evolución y estado de un agua residual; es poco estable al calor, descomponiéndose en azufre e hidrógeno.

Dióxido de carbono.- El gas que Helmut llamó en 1930 “gas silvestre”, se produce en las fermentaciones de los compuestos orgánicos de las aguas residuales. El CO₂ del agua se presenta libre o como componente de bicarbonatos; la parte libre puede tener una fracción activa que puede destruir carbonatos y ejercer diversas acciones químico-biológicas en el agua residual.

Metano.- Se forma por la descomposición anaerobia de la materia orgánica al ser transformada por ciertas bacterias utilizando CO₂ o sulfatos. Se genera en algunos tipos de plantas de tratamiento, pudiendo ser aprovechado como combustible.

1.2.15 Características químicas orgánicas

El análisis de compuestos orgánicos presentes en el agua, se hacen para estimar el desempeño de los procesos de tratamiento y estudiar su comportamiento en las fuentes receptoras.

Aunque los sólidos suspendidos orgánicos son biodegradables a través de la hidrólisis, comúnmente se considera que son orgánicos solubles. Los constituyentes orgánicos solubles de las aguas residuales están compuestos principalmente de:

- Proteínas: 40 a 60%
- Carbohidratos: 25 a 50%
- Lípidos: aproximadamente 10% (incluyen grasas y aceites)

Las proteínas son principalmente aminoácidos, mientras que los carbohidratos son azúcares, almidones y celulosa. Los lípidos incluyen grasas y aceites. Todos estos materiales contienen carbono, que puede ser convertido biológicamente a dióxido de carbono, ejerciendo así una demanda de oxígeno. Las proteínas contienen nitrógeno, de manera que también ejercen una demanda de oxígeno nitrogenada.

1.2.16 Demanda bioquímica de oxígeno

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es el método usado comúnmente para la medición de la cantidad de material orgánico demandante de oxígeno, en otras palabras mide la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos mientras descomponen la materia orgánica. Es el parámetro más usado para estimar el grado de contaminación orgánica en el agua, además, su determinación implica medir la variación del oxígeno disuelto en el agua a través del tiempo, debido a las reacciones bioquímicas involucradas en el metabolismo microbiano de la materia orgánica (César y Vázquez, 2003).

La DBO sirve para calcular la cantidad de oxígeno necesario para estabilizar la materia orgánica mediante un tratamiento biológico, además, este parámetro se emplea para medir la eficiencia del tratamiento. En general la DBO es un índice importante de la calidad de los cuerpos de agua, aunque la prueba para su determinación puede durar varios días, lo más común es tenerla a los 5 días y se indica como DBO₅.

1.2.17 Grasas y aceites

Debido a sus propiedades, la presencia de grasas y aceites en las aguas residuales pueden causar muchos problemas en tanques sépticos, en sistemas de recolección y en el tratamiento de aguas residuales.

Si las grasas y aceites no se remueven, afectarán los procesos biológicos. Así mismo, si no se remueven antes de descargar las aguas residuales tratadas, podrían interferir con la actividad biológica en la superficie de las fuentes receptoras creando películas desagradables a la vista.

1.2.18 Características biológicas

Las características biológicas de las aguas residuales son de fundamental importancia en el control de enfermedades causadas por organismos patógenos de origen humano, y por el papel activo y fundamental de las bacterias y otros microorganismos dentro de la descomposición y estabilización de la materia orgánica, bien sea en el medio natural o en plantas de tratamiento de aguas residuales.

Los principales grupos de organismos presentes en aguas superficiales y aguas residuales están conformados por bacterias, parásitos y virus. Los organismos patógenos presentes en las aguas residuales pueden provenir de desechos humanos que estén infectados o que sean portadores de una enfermedad determinada. Los organismos patógenos bacterianos excretados por el hombre causan por lo general enfermedades del tracto gastrointestinal; como fiebre tifoidea y paratifoidea, disentería, diarrea y cólera.

1.2.18 Bacterias

Son organismos unicelulares móviles o inmóviles de formas diversas (cocos, bacilos, filamentosas) y de tamaño y modo de vida diferentes según la especie y el medio. Los desórdenes intestinales son los síntomas comunes de la mayoría de las enfermedades transmitidas por las bacterias patógenas transportadas por el agua.

Se multiplican por división celular y su velocidad de reproducción puede ser frenada por varias causas, por ejemplo:

- Naturaleza de la bacteria;
- Temperatura;
- Medio;
- Disminución de alimentos y del oxígeno disuelto;
- Acumulación de productos metabólicos tóxicos;
- Variaciones del pH (ácidos), productos amoniacales;
- Competencia vital.

En ciertos casos aunque no se cumplan estas condiciones limitantes, las bacterias viven y se multiplican, como ocurre con las bacterias termófilas que viven hasta 50 °C o con las anaerobias estrictas.

Se pueden clasificar las bacterias de las aguas residuales urbanas según su nutrición en dos grandes grupos:

- Bacterias parásitas.- Son las que han tenido como huésped al hombre o a los animales; suelen ser patógenas y producir graves enfermedades (tifus, cólera, disentería, etc.), y en el tratamiento de las aguas residuales es uno de los factores más importantes a tener en cuenta.
- Bacterias saprófitas.- Son las que se nutren de los sólidos orgánicos residuales y provocan descomposiciones fundamentales en los procesos de depuración.

Según el medio, las bacterias de las aguas residuales urbanas se pueden clasificar en:

- Bacterias aerobias.- Son las que necesitan oxígeno para su alimento y respiración. El oxígeno disuelto que les sirve de sustento es el oxígeno libre (molecular) del agua y las descomposiciones que provocan sobre la materia orgánica serán procesos aerobios.
- Bacterias anaerobias.- Son las que consumen oxígeno procedente de los sólidos orgánicos e inorgánicos y la presencia de oxígeno disuelto no les permite subsistir.
- Bacterias facultativas.- Algunas bacterias aerobias y anaerobias pueden llegar a adaptarse al medio opuesto, es decir, las aerobias a medio sin oxígeno disuelto y las anaerobias a aguas con oxígeno disuelto.
- Bacterias autótrofas.- Son aquellas que pueden sustentar su protoplasma a partir de sustancias como dióxido de carbono, sulfatos, fosfatos, carbonatos, etc., tomando la energía necesaria para su biosíntesis a partir de la luz (bacterias fotosintéticas) o a partir de ciertas reacciones químicas (bacterias quimiosintéticas).

1.2.19 Parásitos

Los parásitos constituyen el nivel inferior de la vida animal, Son organismos más complejos que las bacterias y los virus en su actividad funcional, pueden ser patógenos o no patógenos, microscópicos o macroscópicos. Los más importantes son los siguientes:

Protozoos.- Son organismos microscópicos, que viven en ambientes húmedos o directamente en medios acuáticos, ya sean aguas saladas o aguas dulces. Las infecciones causadas por protozoarios se manifiestan por desórdenes intestinales menos severos que los asociados con bacterias. Existen varios tipos de protozoos, por ejemplo: rizópodos (Amebas), flagelados y ciliados (Paramecium, Colpidium, Vorticela), etc.

Helmintos.- Son gusanos parásitos y su ciclo de vida frecuentemente incluye como huéspedes a los animales y al ser humano. La contaminación del agua por este tipo de organismos puede ser causada por el vertido de sus desechos, además, puede ser también a través de especies acuáticas u otros huéspedes, como insectos y caracoles.

1.2.20 Virus

Los virus son agentes infecciosos microscópicos que solo puede multiplicarse dentro de las células de otros organismos, están compuestos de un núcleo de ácido nucleico (ARN o ADN) recubierto por una capa externa de proteína y glicoproteína. Los virus se clasifican de acuerdo con el huésped infectado, de ahí que cuando el huésped es una bacteria se denominen bacteriófagos.

El interés que tiene conocer la gran variedad de virus que pueden aparecer en las aguas residuales, es por su acción nociva como agentes productores de enfermedades. Esta situación debe considerarse en cualquier sistema de tratamiento pues pueden infectar el tracto intestinal y pasar a las heces. En un gramo de heces se pueden encontrar hasta decenas de millones de partículas de virus infecciosos. Los virus más comunes en las aguas residuales son los siguientes:

- *Adenovirus*
- *Enterovirus*
- *Hepatitis A*
- *Reovirus*
- *Rotaviru*

1.3 Normatividad aplicable

A efecto de prevenir y controlar la contaminación de las aguas, se debe atender lo dispuesto en la Legislación aplicable, como la Ley de Agua Nacionales y su Reglamento y la Ley de General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, así como a la normatividad correspondiente.

Dentro de la normatividad vigente, existen diversas normas mexicanas que establecen los límites máximos permisibles de las concentraciones de contaminantes presentes en el agua residual tratada, que dependiendo de cómo se pretenda disponer del efluente, será necesario cumplir con dichos límites permisibles.

A continuación se describen la Normas Oficiales Mexicanas con las que tiene que cumplir el efluente, en el caso de que se pretenda disponer en aguas y bienes nacionales, en el sistema de alcantarillado urbano o si se requiere su reutilización en servicios al público, además de la relativa al aprovechamiento o disposición final de sólidos y biosólidos generados en las plantas de tratamiento.

1.3.1 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.

Objetivo y campo de aplicación

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta Norma Oficial Mexicana no se aplica a las descargas de aguas provenientes de drenajes pluviales independientes (SEMARNAT, 1997).

1.3.2 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

Objetivo y campo de aplicación

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal con el fin de prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como proteger la infraestructura de dichos sistemas, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta Norma no se aplica a la descarga de las aguas residuales domésticas, pluviales, ni a las generadas por la industria, que sean distintas a las aguas residuales de proceso y conducidas por drenaje separado (SEMARNAT, 1997).

1.3.3 Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público

Objetivo y campo de aplicación

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

En el caso de que el servicio al público se realice por terceros, estos serán responsables del cumplimiento de la presente Norma, desde la producción del agua tratada hasta su reuso o entrega, incluyendo la conducción o transporte de la misma (SEMARNAT, 1998).

1.3.4 Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, protección ambiental.- lodos y biosólidos.- especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final

Objetivo y campo de aplicación

Esta Norma Oficial Mexicana 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 el medio ambiente y la salud humana.

Es de observancia obligatoria para todas las personas físicas y morales que generen 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 (SEMARNAT, 2003)

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

2.1 Sistemas de tratamiento de agua residual

Los sistemas de tratamiento de agua residual se pueden dividir conforme al nivel de tratamiento en subsistemas primario, secundario y terciario. El propósito del tratamiento primario es remover materiales sólidos del influente, el tratamiento secundario consiste generalmente en la conversión biológica de compuestos orgánicos disueltos y coloidales en biomasa, y el objetivo del tratamiento terciario es la remoción adicional de sólidos suspendidos y/o remoción de nutrientes. La Tabla 2.1 presenta la descripción de los niveles de tratamiento.

Tabla 2. 1 Niveles de tratamiento del agua residual
(Elaboración a partir de Crites y Tchobanoglous, 2000)

Nivel de tratamiento	Descripción
Primario	Remoción de parte de los sólidos y materia orgánica en suspensión.
Primario avanzado	Remoción intensiva de sólidos suspendidos y materia orgánica, en general llevada a cabo mediante la adición de insumos químicos o filtración.
Secundario	Remoción de compuestos orgánicos biodegradables y sólidos suspendidos.
Secundario con remoción	Remoción de compuestos orgánicos biodegradables, sólidos suspendidos y nutrientes (nitrógeno o fósforo por separado o en conjunto).
Terciario	Remoción de sólidos suspendidos residuales, en general por filtración en medio granular.

2.2 Clasificación de los métodos de tratamiento

Los diversos contaminantes presentes en el agua residual se remueven por mecanismos de tipo físico, químico y biológico. Los métodos se clasifican por lo general en operaciones físicas unitarias, procesos químicos unitarios y procesos biológicos unitarios, es común que en los sistemas de tratamiento se realicen combinaciones de estas operaciones y procesos.

2.2.1 Procesos físicos unitarios

Son los primeros métodos empleados en el tratamiento del agua residual; en ellos predomina la acción de las fuerzas físicas. La función de cada uno de los procesos físicos unitarios que se emplean en el tratamiento de aguas residuales se describe en la Tabla 2.2.

Tabla 2. 2 Procesos físicos unitarios empleados en el tratamiento de agua residual
(CONAGUA, 2009)

Operación o Proceso	Función
Medición de caudales	Un aspecto crítico en la eficiencia de una planta de tratamiento de aguas residuales es la correcta medición del caudal a tratar.
Cribado	Se emplea para remover el material grueso, generalmente flotante, contenido en algunas aguas residuales crudas, que puede obstruir o dañar bombas, tuberías y equipos de las plantas de tratamiento o interferir con la buena operación de los procesos de tratamiento.
Desarenadores	Son necesarios para remover gravillas, arenas, cenizas y otros materiales inorgánicos presentes en las aguas residuales municipales que pueden causar abrasión o desgaste excesivo en los equipos mecánicos de una planta de tratamiento, además del azolvamiento en tanques subsecuentes.
Remoción de grasas y aceites	La remoción de grasas y aceites se puede llevar a cabo en tanques desnatadores cuando se trate de materia grasa separable o tanques de preaireación.
Homogenización	Consiste simplemente en amortiguar las variaciones del caudal y de la calidad del agua, con el objeto de conseguir un caudal lo más uniforme posible.
Sedimentación primaria	Es una operación que se emplea para remover las partículas en suspensión de mayor densidad que el agua. Esta operación es la más ampliamente usada en el tratamiento de aguas residuales. Generalmente, se emplea antes de los procesos biológicos de tratamiento, para disminuir la carga de contaminantes a los procesos subsecuentes.

2.2.2 Procesos químicos unitarios

Este proceso se presenta cuando las transformaciones se producen mediante reacciones químicas y generalmente se llevan a cabo en combinación con las operaciones físicas unitarias. La función de cada uno de los cuatro procesos químicos más empleados para el tratamiento de agua residual se describe en la Tabla 2.3.

Tabla 2. 3 Procesos químicos unitarios empleados en el tratamiento de agua residual
(Elaboración a partir de Crites y Tchobanoglous, 2000)

Operación o Proceso	Función
Precipitación química	Es la adición de productos químicos con el fin de volver insolubles los sólidos disueltos y en suspensión, para facilitar su eliminación por sedimentación.
Coagulación y/o floculación	Las soluciones coloidales se caracterizan por estar constituidas por una dispersión de partículas sólidas o líquidas en agua y que son difíciles de eliminar utilizando procedimientos físicos, el fenómeno mediante el cual se logra desestabilizar el coloide y su aglomeración posterior, es lo que se conoce como coagulación y floculación.
Adsorción	Es la acumulación de una sustancia en fase líquida o gaseosa sobre la superficie de un sólido. Este proceso involucra la separación de una sustancia en una fase fluida acumulando la sustancia en la superficie del adsorbente sólido.
Desinfección	Consiste en la inactivación de los organismos patógenos.

2.2.3 Procesos biológicos unitarios

Son los procesos de tratamiento en los que la remoción de contaminantes se lleva a cabo por la actividad biológica de microorganismos. La remoción de la materia orgánica biodegradable tanto coloidal como disuelta por acción biológica, constituye la principal aplicación de este tipo de procesos.

Los procesos biológicos se clasifican según la dependencia de oxígeno por parte de los microorganismos encargados de la descomposición de la materia orgánica, se pueden presentar en presencia (aerobios) o ausencia de oxígeno libre (anaerobios). En el tratamiento de aguas residuales, los procesos aerobios y anaerobios que existen son los siguientes:

Procesos aerobios

En este tipo de tratamiento se llevan a cabo procesos catabólicos oxidativos. Como el catabolismo oxidativo requiere la presencia de un oxidante de la materia orgánica y normalmente este no está presente en las aguas residuales, requiere ser introducido artificialmente. La forma más conveniente de introducir un oxidante es por la disolución del oxígeno de la atmósfera, utilizando la aireación mecánica, lo que implica altos costos operacionales del sistema de tratamiento (Rodríguez, 2012).

Lodos activados

El proceso de lodos activados tiene como objetivo la remoción de materia orgánica presente en las aguas residuales. La remoción de materia orgánica, medida como DBO, se logra por la conversión biológica llevada a cabo por microorganismos en presencia de oxígeno molecular, durante este proceso, la materia orgánica es transformada en CO_2 , H_2O y en nuevas células de microorganismos. Los microorganismos formados se separan por sedimentación gravimétrica, una parte son recirculados como siembra para la continuación del proceso y el resto se remueven. La combinación de microorganismos y agua residual se conoce como lodo activado. El oxígeno requerido para el funcionamiento del proceso se suministra por medio de aireadores mecánicos o por medio de difusores. Los aireadores mecánicos pueden ser con turbina sumergida o superficial de alta o de baja velocidad. Dentro del proceso de lodos activados, existen las siguientes variantes:

Lodos activados de alta tasa

El proceso de alta tasa de lodos activados es una variante del proceso convencional de lodos activados, y consiste en el empleo de: (a) bajos tiempos de retención hidráulica; (b) altas concentraciones de lodos activados en el reactor; (c) bajos valores de la edad de lodos y altas relaciones alimento/microorganismos.

El resultado de esta variante es un proceso más económico que el proceso convencional, pero con menores eficiencias en la remoción de DBO. La variante de lodos activados con alta tasa es empleada cuando los requerimientos de calidad del efluente no son muy estrictos o bien como un pretratamiento de aguas con altas concentraciones de contaminantes, antes de algún proceso secundario convencional. Debido a sus bajos tiempos de retención hidráulica, el proceso de alta tasa es muy sensible a fluctuaciones en el caudal de aguas residuales, otro problema frecuente en el proceso de alta tasa es una pobre sedimentabilidad de los lodos biológicos.

Lodos activados con aireación extendida

El proceso de aeración extendida es una variante del proceso convencional de lodos activados consistente en el empleo de:

- a) Altos tiempos de retención hidráulica,
- b) Altas concentraciones de lodos activados en el reactor,
- c) Altos valores de la edad de lodos y
- d) Bajas relaciones alimento/microorganismos.

Bajo estas condiciones, el proceso biológico opera en la fase de respiración endógena con mineralización, casi completa, de los lodos biológicos. Debido al alto tiempo de retención hidráulico empleado y alta concentración de lodos en el reactor, el proceso soporta fácilmente fluctuaciones tanto en la carga hidráulica como en la carga orgánica. La aplicabilidad de este proceso se limita, generalmente, a plantas pequeñas de las llamadas "plantas paquetes" para gastos menores de 25 l/s, pues en plantas grandes sus costos iniciales y de operación, no le permiten competir favorablemente con otras alternativas de tratamientos biológicos.

Lodos activados con nitrificación

Este proceso también es conocido como nitrificación de un solo paso, debido a que el amonio y los materiales carbonáceos son oxidados en la misma unidad de aireación. Como en cualquier proceso biológico aerobio, los materiales carbonáceos son oxidados por organismos aerobios heterotróficos.

El grado de nitrificación depende básicamente de tres factores, TRL (Tiempo de Retención de los Lodos), concentraciones de oxígeno disuelto y temperatura del agua residual. En general, la nitrificación comienza a un TRL de aproximadamente 5 días, pero no es apreciable sino hasta que el SRT llega aproximadamente a los 15 días, dependiendo de la temperatura. El sistema de aireación es diseñado para proveer oxígeno adicional necesario para oxidar el nitrógeno amoniacal (CONAGUA, 2009).

Filtros biológicos

En el proceso de filtración biológica, el agua residual se deja escurrir sobre un filtro empacado con piedra o con algún medio sintético. En la superficie del medio se desarrollan crecimientos biológicos que bio-oxidan los contaminantes orgánicos presentes en el agua. El efluente es colectado al fondo del filtro.

El oxígeno necesario para la buena operación del proceso se obtiene del aire presente en los intersticios del medio. El flujo natural de aire debido a los gradientes de temperatura que se presentan en el interior del filtro es normalmente suficiente para el suministro del oxígeno necesario para el proceso. Para permitir este flujo de aire, es necesario dejar ventilas de tamaño adecuado en la parte inferior de los filtros, en algunos casos, cuando las torres de los filtros son muy altas y/o la concentración de DBO en el influente muy grande, puede ser necesario la inducción del flujo de aire por medio de ventiladores o sopladores instalados en las ventilas.

El proceso de filtración biológica va precedido, generalmente, de una sedimentación primaria para remover los sólidos en suspensión que puedan obturar el filtro, ya que la biomasa responsable del proceso de bio-oxidación está adherida al medio de empaque, y no en suspensión como en el caso del

proceso de lodos activados, la biomasa no es arrastrada en el efluente y por lo tanto no es necesaria la recirculación de lodos biológicos. Sin embargo, el exceso de lodos sí es arrastrado en el efluente, razón por la cual es común la instalación de sedimentadores secundarios para la colección del exceso de lodo. La cantidad de lodos generados en exceso es función de la DBO removida y de la densidad de carga orgánica sobre el filtro (a menor densidad de carga, menor generación de exceso de lodos). El arrastre del exceso de lodos puede ser intermitente, en forma de purgas periódicas, o en forma continua a una tasa constante, dependiendo, principalmente, de las condiciones de carga hidráulica y características físicas del medio de empaque.

La profundidad de los filtros biológicos varía en un ámbito muy grande, dependiendo principalmente del tipo de medio de empaque empleado. Para filtros empacados con piedra, las profundidades normales son de 1.5 a 3 metros. Para filtros empacados con medios sintéticos las profundidades pueden variar de 1.5 a 10 metros. En términos generales, la eficiencia de un filtro aumenta en forma proporcional (no lineal) con su profundidad, pero los costos de bombeo aumentan también al incrementarse la altura del filtro.

El agua es alimentada en la parte superior del filtro por medio de brazos giratorios. Los brazos distribuidores son alimentados por el centro, haciendo girar la misma fuerza del agua estos brazos. Los brazos están provistos de orificios y difusores para la distribución uniforme del agua en el medio (CONAGUA, 2009).

Discos biológicos

Los discos biológicos están formados de discos de plástico o de algún otro material sujetos y soportados a una flecha horizontal rotatoria. En la actualidad estos sistemas usan discos o secciones de discos de plástico de alta densidad de 1 a 1.5 mm de espesor. El sistema tiene aplicaciones en tratamiento secundario y nitrificación, en estas aplicaciones los discos se ubican dentro de tanques, de tal forma que quede el 40 por ciento sumergido. Los discos rotan lentamente (de 1 a 2 rpm, pero generalmente de 1.4 a 1.6 rpm) teniendo los discos contacto con el agua residual y la atmósfera al mismo tiempo. Los microorganismos, presentes naturalmente en el agua residual, se adhieren al medio formando una capa delgada en todo el disco.

La población biológica en el medio se acumula y se alimenta de los organismos presentes en el agua residual. La turbulencia causada por la rotación de los discos mantiene la biomasa en suspensión. Los sólidos suspendidos son transportados con el agua residual a un sedimentador secundario. Los sistemas de discos biológicos son clasificados por la densidad del medio, el tipo de transmisión, aplicación, arreglo y modo de operación. Actualmente el medio se clasifica como: de baja densidad, el cual es usado en el primer paso de remoción de DBO₅; de densidad media, el cual es usado en donde se disminuye la remoción de DBO₅ y comienza la nitrificación; de densidad alta, el cual es usado para la nitrificación.

El sistema deberá contar con recirculación para períodos de flujos o cargas bajas. El sistema puede constar de uno o varios pasos, dependiendo de los objetivos de tratamiento (CONAGUA, 2009).

Procesos anaerobios

Degradación anaerobia

La degradación anaerobia es el proceso fermentativo que ocurre en el tratamiento anaerobio de las aguas residuales. El proceso se caracteriza por la conversión de la materia orgánica a metano y de CO₂, en ausencia de oxígeno y con la interacción de diferentes poblaciones bacterianas.

La degradación anaerobia es un proceso de transformación y no de destrucción de la materia orgánica, como no hay presencia de un oxidante en el proceso, la capacidad de transferencia de electrones de la materia orgánica permanece intacta en el metano producido. En vista de que no hay oxidación, se tiene que la DQO teórica del metano equivale a la mayor parte de la DQO de la materia orgánica digerida (90 a 97%), una mínima parte de la DQO es convertida en lodo (3 a 10%). En las reacciones bioquímicas que ocurren en la digestión anaerobia, solo una pequeña parte de la energía libre es liberada, mientras que la mayor parte de esa energía permanece como energía química en el metano producido (Rodríguez, 2012).

Filtro anaerobio

A diferencia del filtro percolador, en este proceso el filtro está sumergido y la alimentación de agua residual penetra por el fondo de la unidad y la abandona por la parte superior. En consecuencia, el material de relleno está completamente sumergido en el agua residual y por ello no hay aire dentro del sistema.

El filtro anaerobio no requiere reciclado, ya que la biomasa permanece adherida al relleno del filtro y por lo tanto no se pierde con el efluente. Es posible operar los tratamientos anaerobios a temperaturas menores que las requeridas en el proceso de contacto, debido a la concentración elevada de biomasa en el filtro. Además, no resulta indicado para el tratamiento de aguas residuales conteniendo concentraciones elevadas de sólidos en suspensión debido a problemas de obstrucciones (Ramalho, 1996).

Lecho expandido

En el proceso de lecho expandido el agua residual a tratar se bombea a través de un lecho de material adecuado, como puede ser: arena, carbón y conglomerado expandido, en el que se ha desarrollado un cultivo biológico. El efluente se recircula para diluir el agua entrante y para mantener un caudal adecuado que asegure que el medio se halle expandido. Se han llegado a emplear concentraciones de biomasa superiores a 15,000-40,000 mg/l. Debido a las altas concentraciones de biomasa que se pueden conseguir, el proceso de lecho expandido también se puede emplear para el tratamiento de aguas residuales municipales, con tiempos de detención hidráulica muy pequeños. En el tratamiento de este tipo de residuos, la presencia de sulfatos puede producir la generación de sulfuro de hidrógeno. En este proceso la cantidad de lodo producido es considerablemente inferior a la que se produce en los procesos aerobios.

2.2.4 Medida de la biodegradabilidad

La materia orgánica biodegradable se mide en términos de la DBO y la materia orgánica total por la DQO. Si DBO₅/DQO, es mayor que 0.5, los residuos se consideran tratables mediante procesos biológicos. En caso contrario se deberán emplear procesos fisicoquímicos para tratar el agua.

Seoáñez (2004), define la relación de biodegradabilidad como: $K=DQO/DBO$, Y representa la fracción de DQO que es biodegradable. Los casos típicos de relación de biodegradabilidad se presentan en la Tabla 2.4.

Tabla 2. 4, Valores típicos de relación de biodegradabilidad (Seoáñez, 2004)

K	Influente
1.5	Biodegradable de forma natural.
$2 < K < 3$	Urbano biodegradable si se trata.
$k > 5$	No biodegradable. Es típico de influentes industriales.

2.2.5 Trenes de tratamiento

Para lograr una determinada calidad del agua residual tratada y poder ser reusada potencialmente en alguna actividad, se emplean diversos niveles alternativos de tratamiento del agua residual (CONAGUA, 2009).

Es importante hacer notar que dependiendo de los contaminantes que deben de ser removidos de las aguas residuales, se pueden desarrollar un número casi ilimitado de alternativas o diagramas de flujo o trenes de tratamiento, usando las operaciones y los procesos unitarios necesarios. Para acondicionar las aguas residuales crudas a una calidad aceptable de aguas tratadas, para usos definidos se requiere de un tratamiento extensivo. El nivel de tratamiento a considerar es función, principalmente, de la calidad del agua residual cruda, del flujo y de los diversos niveles de calidad esperados en el efluente del tren de tratamiento, dependiendo del uso que se tenga planeado dar a las aguas tratadas. Puesto que con diferentes procesos unitarios, a un mismo nivel de tratamiento, se logran niveles de tratamiento mayores que en otros procesos, a continuación se presenta en la Tabla 2.5 la relación de niveles de tratamiento.

Tabla 2. 5, Relación de niveles de tratamiento del agua residual (CONAGUA, 2009)

Nivel de tratamiento	Sistemas de tratamiento
1	Preliminar seguido de tratamiento primario
2	Lodos activados
	Filtros biológicos
	Biodiscos
	Lagunas aireadas seguidas de infiltración
	Zanjas de oxidación
3	Remoción de nitrógeno
	Biodiscos de dos pasos
	Aireación extendida
4	Intercambio iónico selectivo
	Nitrificación - desnitrificación en dos pasos
5	Filtración de efluentes secundarios

6	Tratamiento terciario del efluente
	Adición de alumbre en tanques de aireación
	Adición de cloruro férrico a tanque primario
7	Tratamiento terciario del efluente nitrificado con cal
8	Adsorción en carbón activado de efluentes secundarios filtrados
9	Adsorción en carbón activado de efluentes terciarios con cal
10	Adsorción en carbón activado de efluentes nitrificados y terciarios con cal
11	Filtración de membranas semipermeables después de tratamiento biológico y físico-químico

Nivel de tratamiento 1

Este nivel se ha considerado como el nivel mínimo de tratamiento a las aguas residuales para su reúso. El sistema de tratamiento para lograr este nivel consiste de un pretratamiento seguido de un tratamiento primario. Dicho sistema está constituido por un tren de tratamiento, que a su vez cuenta con los siguientes procesos unitarios:

- Pretratamiento; cribado y/o desarenación. Es importante notar que en este proceso se puede incluir, unidades de remoción de grasas y aceites, homogeneización y/o regulación. Además de desmenuzado o triturado.
- Tratamiento primario; tanques de sedimentación primarios, ya sean circulares o rectangulares. Los lodos producidos en este proceso pueden ser espesados, desaguados y/o digeridos biológicamente para su disposición final en el suelo o en rellenos sanitarios.

La cloración de las aguas residuales se incluye algunas veces como parte del tratamiento primario por cualquiera de las siguientes dos razones: (a) para el control de olores que se generan al haber condiciones sépticas en las aguas residuales y (b) como agente desinfectante para el control de patógenos en el efluente.

Nivel de tratamiento 2

Este nivel puede ser logrado con el nivel de tratamiento 1, además de alguno de los siguientes procesos de tratamiento:

- Lodos activados convencionales con aireación por difusión, o aeración mecánica, o difusión con mezcla mecánica.
- Filtros biológicos, los cuales pueden ser, según convenga; filtros biológicos con medio sintético, filtros biológicos con roca de alta tasa, o filtros biológicos con roca de media tasa.
- Discos biológicos.

Nivel de tratamiento 3

Con sistemas de tratamiento de lodos activados con nitrificación, discos biológicos en dos pasos y aireación extendida, se puede lograr un nivel de tratamiento superior al anterior, por lo que cualquiera de estos tratamientos se ha considerado como nivel 3 de tratamiento.

Nivel de tratamiento 4

El intercambio iónico selectivo mediante el empleo de clinoptilolita, es un proceso recientemente desarrollado para la remoción de nitrógeno amoniacal de las aguas residuales. En este nivel de tratamiento, el proceso se emplea después de un sistema de lodos activados seguido de filtración en medio mixto; aunque la filtración no es imperativa para este nivel de tratamiento, su empleo es necesario para evitar taponamientos en el medio de intercambio.

Nivel de tratamiento 5

En este nivel el proceso de filtración se sitúa a continuación del efluente del sedimentador secundario del proceso biológico de lodos activados. El influente del proceso de filtración es el correspondiente al nivel 2 sin cloración, la que se efectúa inmediatamente después. El empleo de productos químicos, especialmente polímeros, es necesario en algunas ocasiones como ayuda al proceso de filtración; es importante señalar que los flóculos biológicos, por lo general, presentan resistencia suficiente para ser removidos mediante filtración sin el empleo de productos químicos.

Nivel de tratamiento 6

Para lograr este nivel se requiere de un sistema de tratamiento terciario empleando cal, la cual se suministra a un efluente de nivel 2, correspondiente a lodos activados convencionales. El sistema consiste en mezclar cal con el efluente secundario y agitar la mezcla suavemente en un tanque de floculación, pasando posteriormente a un tanque de sedimentación de los flóculos formados. El alto pH resultante del proceso se ajusta mediante el empleo de un sistema de recarbonatación en dos pasos, antes de la filtración de las aguas.

Nivel de tratamiento 7

En este nivel el sistema es tratamiento terciario con cal de efluentes nitrificados, el cual es esencialmente el mismo que el descrito en el inciso anterior, a diferencia de que se sustituye el proceso de lodos activados convencional por un proceso de nitrificación en dos pasos. Asimismo, debido a que la alcalinidad del efluente nitrificando es menor que la de los lodos activados, los requerimientos de cal para la remoción de fósforo son menores, por lo tanto se obtiene, en este sistema, una menor producción de lodos de cal.

Nivel de tratamiento 8

La adsorción en carbón activado de afluentes secundarios filtrados se ha considerado como el nivel 8 de tratamiento. Este sistema de tratamiento tiene especial importancia en la remoción de la DQO, siendo más eficiente cuando esta precedido por filtración, ya que ésta reduce significativamente el potencial de taponamientos en las torres de adsorción. En algunas ocasiones es recomendable el empleo de cloro antes del proceso de adsorción con objeto de evitar el crecimiento de microorganismos indeseables en las columnas, no requiriéndose decoloración antes de la adsorción ya que el carbón logra esto en forma satisfactoria.

Este tren de tratamiento está formado por un sistema de nivel de tratamiento 4, seguido de columnas de carbón activado de flujo ascendente.

Nivel de tratamiento 9

En este nivel se ha considerado un sistema de tratamiento de adsorción en carbón activado de efluente terciario con cal, que corresponde al tren de tratamiento del nivel 5, adicionando el proceso de adsorción en carbón activado descrito en el inciso anterior (nivel 8).

Nivel de tratamiento 10

En este nivel se considera al sistema de tratamiento de adsorción en carbón activado de afluentes nitrificados y terciario con cal, el cual es un tren de tratamiento correspondiente al nivel 9, adicionando el proceso de adsorción en carbón activado descrito en incisos previos (nivel 8).

Nivel de tratamiento 11

Este nivel consta de un sistema de tratamiento que incluye filtración en membranas semipermeables, después de los tratamientos biológicos y físico-químicos. Este tren de tratamiento representa el efluente de más alta calidad que pueda obtenerse del grupo de sistemas alternos planteados en este informe. El nivel de calidad de las aguas renovadas mediante este sistema está prácticamente libre de DQO, además de haber sido desmineralizado mediante el proceso de ósmosis inversa; en muchos casos el efluente de este tren pudiera representar un nivel de calidad más alto que algunas de las fuentes actuales de agua potable en el país.

En este tren de tratamiento el proceso de ósmosis inversa precede a la desinfección; el tren previo a la ósmosis inversa es igual al definido como nivel 10 (sin desinfección). La adición del proceso de ozonación, seguida de cloración para mantener un residual en el efluente, será necesaria si se desea emplear el agua para fines potables.

2.3 Tratamiento de lodos de desecho

En el tratamiento de las aguas residuales se generan subproductos denominados lodos, en los que se concentran cierta cantidad de contaminantes removidos del agua y cuyo tratamiento y disposición resulta problemático.

La característica de estos lodos es que constituyen un residuo extremadamente líquido, de nulo o escaso valor. Algunos de ellos son químicamente inertes, pero los que proceden de tratamientos biológicos son fermentables. Tanto para su aprovechamiento como para su eliminación, todos los lodos necesitan de un tratamiento para reducir su facultad de fermentación y volumen (Trapote, 2011).

2.3.1 Degradación aerobia

El proceso de la degradación aerobia es un método alternativo para el tratamiento de lodos orgánicos. Los digestores pueden ser usados para tratar solamente lodos activados, mezclas de desechos de lodos activados, lodos primarios y lodos de filtros percoladores, o lodos de plantas de tratamiento de lodos activados sin sedimentación primaria. Las ventajas de la degradación aerobia, comparada con la degradación anaerobia son: (1) la reducción de sólidos volátiles es aproximadamente la misma que la obtenida anaerobiamente, (2) menores concentraciones de DBO en el licor sobrenadante, (3) obtención de un producto final biológicamente estable y sin olor que puede ser de fácil disposición, (4) producción de un lodo con excelentes características de desaguado, (5) recuperación de casi todo el valor básico de fertilización en el lodo, (6) muy pocos problemas de operación, y (7) menor costo de capital. La principal desventaja del proceso parece ser el alto costo del suministro de oxígeno. Entre los

principales objetivos de la digestión aerobia se incluyen la reducción de olores, reducción de sólidos biodegradables y el mejoramiento de las características de desaguado de los lodos. El oxígeno puede ser suministrado con aireadores superficiales o con difusores.

2.3.2 Degradación anaerobia

Existen dos tipos de sistemas de degradación anaerobia de lodo; (1) degradación convencional y (2) degradación de alta tasa.

- 1) **Degradación convencional:** La degradación convencional se lleva a cabo en procesos de un paso o de dos pasos. El lodo es calentado normalmente dentro del tanque o con intercambiadores de calor localizados fuera de los tanques. En el proceso de un solo paso, la degradación, el espesamiento y la formación de material flotante se llevan a cabo separadamente dentro del tanque. Operacionalmente, el lodo crudo se alimenta en la zona de degradación activa y el gas producido se remueve del tanque por la parte superior. Mientras el gas sube a la superficie, éste eleva consigo partículas de Iodos y otros materiales, tales como grasas y aceites, formando una capa de natas. Como resultado de la degradación, el lodo se mineraliza (aumentando el porcentaje de Iodos fijos), y por gravedad éste se espesa; lo que causa la formación de una capa de material flotante sobre la zona de degradación de lodo. El volumen del tanque se utiliza únicamente a un 50% debido a la estratificación y falta de mezcla. Por lo anterior, la degradación convencional se lleva a cabo en un proceso de dos pasos. En el proceso de dos pasos, el primer tanque se usa para la degradación; es calentado y equipado con unidades mezcladoras. El segundo tanque se usa para el almacenamiento y concentración del lodo digerido y para la formación de un sobrenadante relativamente claro. En algunos casos la segunda unidad puede ser un tanque abierto o una laguna de Iodos.
- 2) **Degradación de alta tasa:** Este difiere del proceso anterior en que la carga de sólidos es mayor. El lodo se mezcla íntimamente por la recirculación del gas, bombeo, o por mezcladores mecánicos y se calienta para obtener una degradación óptima. El equipo de mezcla, en este proceso debe tener mayor capacidad, que el proceso anterior, y debe de llegar hasta el fondo del tanque. El tanque es más profundo. El lodo deberá bombearse continuamente o en ciclos de 30 minutos a 2 horas. El lodo digerido tiene una concentración de aproximadamente la mitad de la del influente ya que no existe una separación del lodo.

2.3.3 Estabilización química

La estabilización química de Iodos se lleva a cabo con la adición de cal. El añadir cal al lodo en cantidades suficientes para mantener un pH alto estabiliza al lodo y destruye las bacterias patógenas. El lodo estabilizado con cal se deshidrata bastante bien en lechos de arena, sin problemas de olor. La filtración se mejora con el uso de cal. Este producto también se usa antes de la disposición del lodo en el suelo. La mejor manera de llevar a cabo la mezcla de cal con Iodos líquidos es con una mezcladora de aire. La cal hidratada se usa frecuentemente con sales metálicas para mejorar las características de deshidratación del lodo. La cal se usa principalmente para controlar el pH, reducir el olor, como desinfectante y ayuda de filtración. El tratamiento con cal no produce una destrucción orgánica, por lo tanto se debe tener mucho cuidado cuando se practica la disposición de Iodos en el suelo. La disposición de Iodos con cal en capas gruesas puede causar una situación donde el pH baja a cerca de 7 unidades, después del desecado, causando el crecimiento de organismos y produciendo olores no deseables.

2.3.4 Espesamiento de lodos

El propósito del proceso de espesamiento de lodos es reducir el volumen de los mismos, para posteriormente ser estabilizados y deshidratados. En el proceso, el contenido de sólidos se incrementa removiendo parcialmente el líquido. Las unidades de espesamiento por gravedad son similares a los sedimentadores circulares convencionales, con excepción de que la pendiente del fondo del espesador es mayor. El lodo es alimentado al centro del espesador y los sólidos se sedimentan para ser recolectados en una tolva de lodos. El líquido resultante fluye a través de un vertedor de salida localizado en la periferia del tanque y es retornado al tanque de sedimentación primaria. El grado en el que los lodos pueden ser espesados depende de muchos factores; entre los más importantes se encuentran: tipo de lodo a espesar, concentración de sólidos volátiles y concentración inicial de sólidos. Se ha demostrado que se logran resultados óptimos cuando la concentración de sólidos en el influente se encuentra entre 0.5 y 1.0 por ciento. Con el objeto de prevenir condiciones sépticas y malos olores en el espesador, es deseable mantener un flujo continuo de agua fresca en el influente.

2.3.5 Deshidratación mecánica

Los métodos más comúnmente usados para deshidratar mecánicamente los lodos incluyen la filtración al vacío, centrifugación y filtración a presión. La filtración al vacío es quizás el método más ampliamente usado; ésta se usa para deshidratar lodos con el objeto de producir una masa con las características físicas y el contenido de humedad requeridos para un proceso de lodos subsecuente. La centrifugación es un proceso ampliamente usado en la industria para la separación de líquidos de diferentes densidades y para la remoción de sólidos. El proceso es aplicable para la deshidratación de lodos de aguas residuales y usa la fuerza centrífuga para incrementar la tasa de sedimentación de los sólidos. La filtración a presión ofrece varias ventajas sobre los otros sistemas, tales como una masa de lodos con concentraciones de sólidos mayores, mejor claridad en el filtrado, mejor captura de sólidos, y menor consumo de químicos.

2.3.6 Lechos de secado

Los lechos de secado se usan para la deshidratación de lodos digeridos. El lodo es colocado sobre los lechos en capas de 8 a 12 pulgadas (20 a 30 cm), para su secado. El lodo ya seco es removido de los lechos y se pone a disposición para usarse como fertilizante. Los lechos pueden estar abiertos a la intemperie o cubiertos. Los lechos abiertos se usan cuando existe un área adecuada para evitar problemas ocasionales causados por los malos olores. Los lechos cubiertos con techumbre tipo invernadero son más convenientes donde es necesario deshidratar lodo continuamente durante el año sin importar el clima, y donde no existe el aislamiento suficiente para la instalación de lechos abiertos. El área total de secado es repartida en lechos individuales de aproximadamente 20 pies (6.1 m) de ancho por 20 a 100 pies (6.1 a 30.5 m) de largo. Los lechos generalmente consisten de 4 a 9 pulgadas (10 a 23 cm) de arena sobre una capa de grava o piedra de 8 a 18 pulgadas (20 a 45.7 cm) de espesor. La arena tiene un tamaño efectivo típico de 0.3 a 1.2 mm y un coeficiente de uniformidad menor a 5.0. La grava normalmente se gradúa de 1/8 a 1.0 pulgadas. Los lechos son desaguados por drenes localizados en la grava con espaciamientos de aproximadamente 6 a 20 pies (1.8 a 6.1 m). La tubería de los drenes tiene un diámetro mínimo de 4 pulgadas (10 cm) y una pendiente mínima de aproximadamente uno por ciento. Las paredes de los lechos pueden ser de concreto, madera o tierra, y tienen normalmente una altura de 12 pulgadas (30.5 cm). El lodo puede fluir aproximadamente 100 pies (30.5 m) si la pendiente del lecho es de aproximadamente 0.5 por ciento.

2.3.7 Compostaje de lodos

El compostaje de lodos puede ser definido como la descomposición biológica de sólidos orgánicos a un producto final relativamente estable. El contenido de humedad es normalmente de 40 a 70 por ciento. La descomposición aerobia tiene lugar en el rango termofílico, arriba de 113°F (45°C) y, generalmente, hasta 140°F (60°C). Las temperaturas pico se aproximan a los 194°F (90°C). El proceso es de oxidación y termogénico. Los principales productos de la descomposición son humus, dióxido de carbono, y agua. Aunque cada técnica de composteo de lodos es única, el proceso fundamental es similar. El proceso es el siguiente:

- Al lodo se añade, si se requiere, agentes de abultamiento (tierra, aserrín o virutas de madera, abono no utilizado o de recirculación) para el control de la porosidad y la humedad.
- Se logra una temperatura en el rango de 130° a 150°F (55° a 65°C) para asegurar la destrucción de organismos patógenos y prevenir la evaporación, lo que reduce el contenido de humedad.
- El abono es almacenado por períodos extensos de tiempo después de la operación primaria de composteo, para estabilizar aún más la mezcla a temperaturas menores.
- Si el abono es muy húmedo, después del curado, puede requerirse de un secado adicional con aire, para el proceso posterior.
- Si han de reusarse los agentes de abultamiento, se requerirá de una operación por separado.

El compostaje representa una actividad combinada de poblaciones mezcladas de bacterias, actinomicetos y hongos asociados con el medio ambiente. Los principales factores que afectan el proceso de compostaje son humedad, temperatura, pH, concentración de nutrientes, y disponibilidad y concentración de suministro de oxígeno. El proceso se lleva a cabo en montículos, en pilas o hileras en la superficie de terreno a la intemperie (CONAGUA, 2009).

CAPÍTULO 3. CASO DE ESTUDIO

3.1 Descripción del caso de estudio

Los talleres de mantenimiento de la Línea 12 del Sistema de Transporte Colectivo se encuentran en el predio denominado Terromotitla, ubicado en el Paraje conocido como “La Ciénega” en el Pueblo de San Francisco Tlaltenco, Delegación Tláhuac, en el Distrito Federal.

Además de la zona donde se les dará mantenimiento a los trenes, los talleres contarán con lo siguiente:

- Almacenes;
- Caseta de vigilancia;
- Cuarto de bombas;
- Cisterna;
- Edificio de servicios generales;
- Cuarto de calderas;
- Estación de bombeo;
- Plataforma de pruebas;
- Sanitarios con regaderas;
- Área de comedor;
- Edificio de oficinas.

Así mismo, se tiene contemplada la construcción de una clínica y un parque recreativo.

Dentro de las actividades que se llevarán a cabo dentro de lo que será la zona de talleres de mantenimiento de la Línea 12 del Sistema de Transporte Colectivo, están las referentes al lavado de trenes, piezas mecánicas, limpiezas de áreas comunes, servicios sanitarios y de comedor. Por lo que el consumo y disposición de agua será de un volumen considerable, lo que implica considerar un proyecto integral que permita:

- a) Remover los contaminantes presentes en el agua residual hasta que su concentración cumpla con la normatividad vigente en el caso de disponer el agua residual en la red de alcantarillado
- b) Realizar un manejo sustentable del agua con base en el nivel de tratamiento, lo que implicaría su reuso en las actividades antes mencionadas.

3.2 Caracterización del agua residual en los talleres de mantenimiento del STC

Los talleres de mantenimiento de Tláhuac aún se encuentran en etapa de puesta en marcha, por lo tanto, para realizar las propuestas de tratamiento del agua residual que se generarán en dichos talleres, es posible considerar las características de un agua residual con idénticas actividades a las que se realizaran en los talleres de Tláhuac; por lo anterior, y con el propósito de proponer las alternativas de tratamiento para la elaboración del presente trabajo, se considerarán las características del agua residual que se generan en el taller de mantenimiento Zaragoza.

Las descargas en las que se realizó dicho análisis, provienen del área de mantenimiento menor y taller de vía, por lo tanto tienen un alto contenido de grasas, aceites y sólidos suspendidos. Así mismo, se

tiene la aportación del drenaje proveniente de instalaciones sanitarias y área de comedor. Los resultados de los parámetros analizados se resumen en la Tabla 3.1.

Tabla 3. 1 Resultado de los parámetros analizados

Parámetros	Método de prueba	Resultado	Unidades
Coliformes fecales	NMX-AA-042-1987	1.50E+11	NMP/100 ml
DBO ₅ total	NMX-AA-028-SCFI-2001	780	mg/l
DQO total	NMX-AA-030-SCFI-2001	7800	mg/l
Cianuros	NMX-AA--058-SCFI-2001	<0.02	mg/l
Cromo hexavalente	NMX-AA-044-SCFI-2001	<0.1	mg/l
Grasas y aceites	NMX-AA-005-SCFI-2000	626	mg/l
Sólidos sedimentables	NMX-AA-004-SCFI-2000	1.00	ml/l
Sólidos suspendidos totales	NMX-AA-034-SCFI-2001	362	mg/l
Arsénico	NMX-AA-051-SCFI-2001	0.003	mg/l
Cadmio	NMX-AA-051-SCFI-2001	0.20	mg/l
Cobre	NMX-AA-051-SCFI-2001	21.95	mg/l
Mercurio	NMX-AA-051-SCFI-2001	0.0018	mg/l
Níquel	NMX-AA-051-SCFI-2001	0.18	mg/l
Plomo	NMX-AA-051-SCFI-2001	1.09	mg/l
Zinc	NMX-AA-051-SCFI-2001	2.55	mg/l
Materia flotante	NMX-AA-006-SCFI-2000	PRESENTE	-
Temperatura	NMX-AA-007-SCFI-2000	20.50	°C
pH	NMX-AA-008-SCFI-2000	7.70	-

3.3 Flujo de agua residual generado en los talleres de mantenimiento

Dentro de las instalaciones de los talleres de mantenimiento se tendrán dos tipos de flujo de agua residual, uno es el flujo que generarán las labores de limpieza de trenes, piezas mecánicas y lavado de áreas de uso común. Además, se tendrá un segundo flujo correspondiente al agua residual que provendrá de los sanitarios y de la zona del comedor. Por lo anterior, las características de ambos flujos tendrán diferentes características, por un lado se tendrá un agua residual industrial con un alto contenido de grasas y aceites y por el otro un agua residual doméstica.

El caudal generado con fines de tratamiento, se esperaría de hasta 20 litros por segundo.

3.4 Antecedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales

Con el propósito de cumplir con la normatividad en materia de descargas de aguas residuales que a nivel nacional ha establecido el Gobierno Federal, el Sistema de Transporte Colectivo implementó la operación de plantas de tratamiento en los talleres de mantenimiento de Zaragoza y Ticomán. Para ambos talleres, el STC cuenta con plantas de tratamiento de aguas aceitosas y de aguas residuales

domésticas, a fin de que ambos tipos de efluentes tengan las características necesarias para su reuso y/o disposición en el sistema de alcantarillado de la ciudad.

Además dentro de las actividades de saneamiento de los efluentes generados en los talleres de mantenimiento, lleva a cabo un permanente estudio, caracterización y monitoreo, de las descargas de agua residual generadas en dichos talleres, para lo cual cuenta con un laboratorio especializado ubicado dentro del área de los talleres Zaragoza.

Las características del sistema de saneamiento con que cuenta el STC en los talleres de Zaragoza y Ticomán, son las siguientes:

- Proceso biológico de lodos activados
- Proceso aerobio con difusión de aire mediante sopladores
- Red de difusión de aire con tubería de PVC
- Tratamiento y deshidratación del lodo generado con filtro prensa
- La capacidad instalada en ambas plantas es de 5 l/s.
- En ambos casos el agua residual cumple con los parámetros indicados en la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que “establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público”.

3.5 Planos de lugar

En la Figura 3.1 se observa la ubicación del Paraje conocido como “La Ciénega” en el Pueblo de San Francisco Tlaltenco, Delegación Tláhuac, al sur oriente de la Ciudad de México, donde iniciaron las obras de construcción de la estación terminal y talleres de mantenimiento en el 2010.

La panorámica actual de las instalaciones que incluyen los talleres de mantenimiento y estación terminal “Tláhuac” que fueron inauguradas a finales del 2012 se puede apreciar en la Figura 3.2.

Las áreas con las que cuentan los talleres de mantenimiento se pueden ver en la Figura 3.3. Así mismo, se ubica en el plano la zona más adecuada en donde se podría emplazar la planta de tratamiento de aguas residuales, cuya área es de 2,700 metros cuadrados.

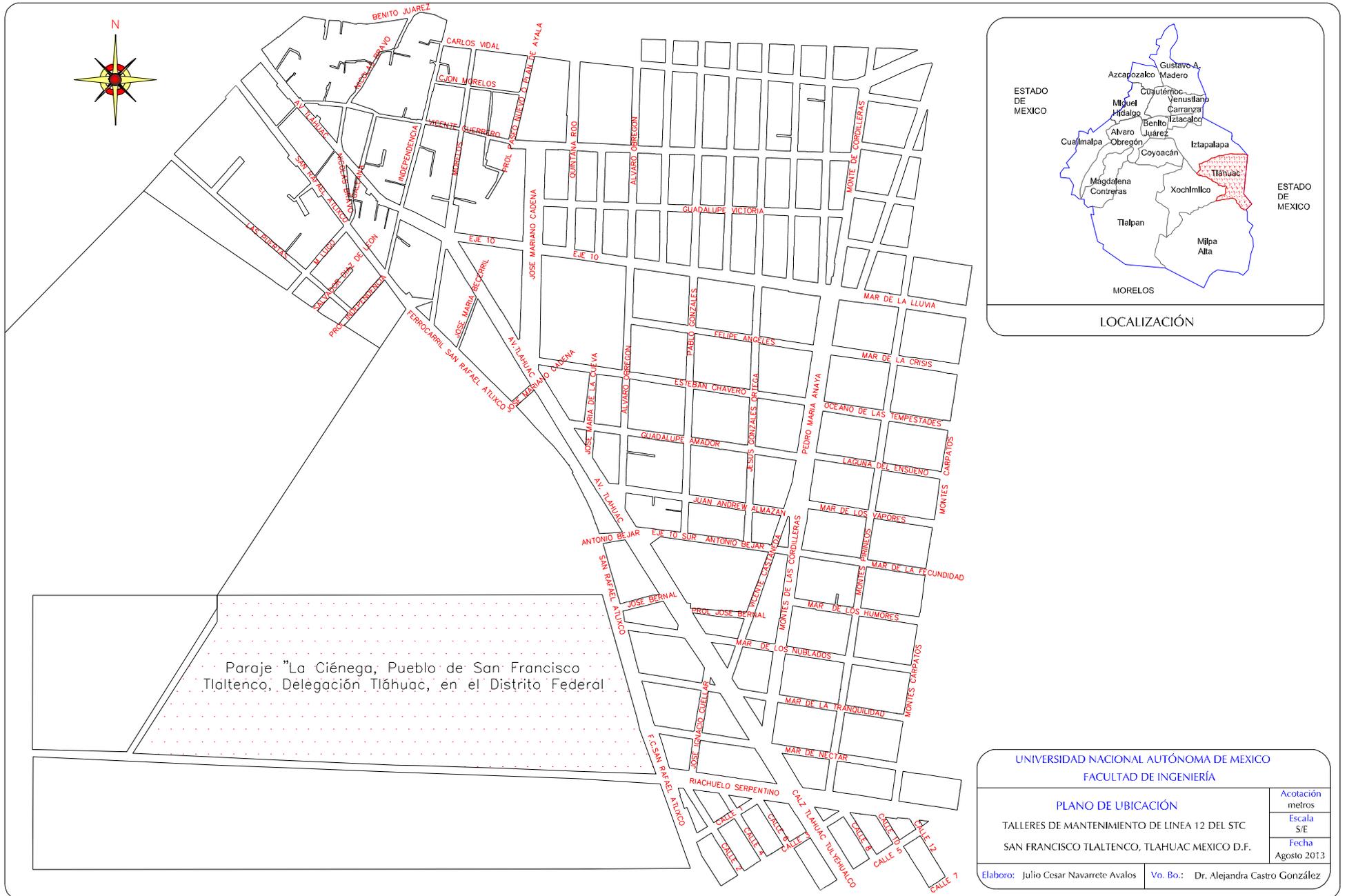
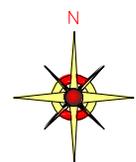


Figura 3. 1 Ubicación del Paraje conocido como “La Ciénega”



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO FACULTAD DE INGENIERÍA	
PANORÁMICA ACTUAL	
TALLERES DE MANTENIMIENTO DE LINEA 12 DEL STC SAN FRANCISCO TLALTENCO, TLAHUAC MEXICO D.F.	
Elaboro: Julio César Navarrete Avalos	Vo. Bo.: Dr. Alejandra Castro González

Figura 3. 2 Panorámica actual de los talleres de mantenimiento

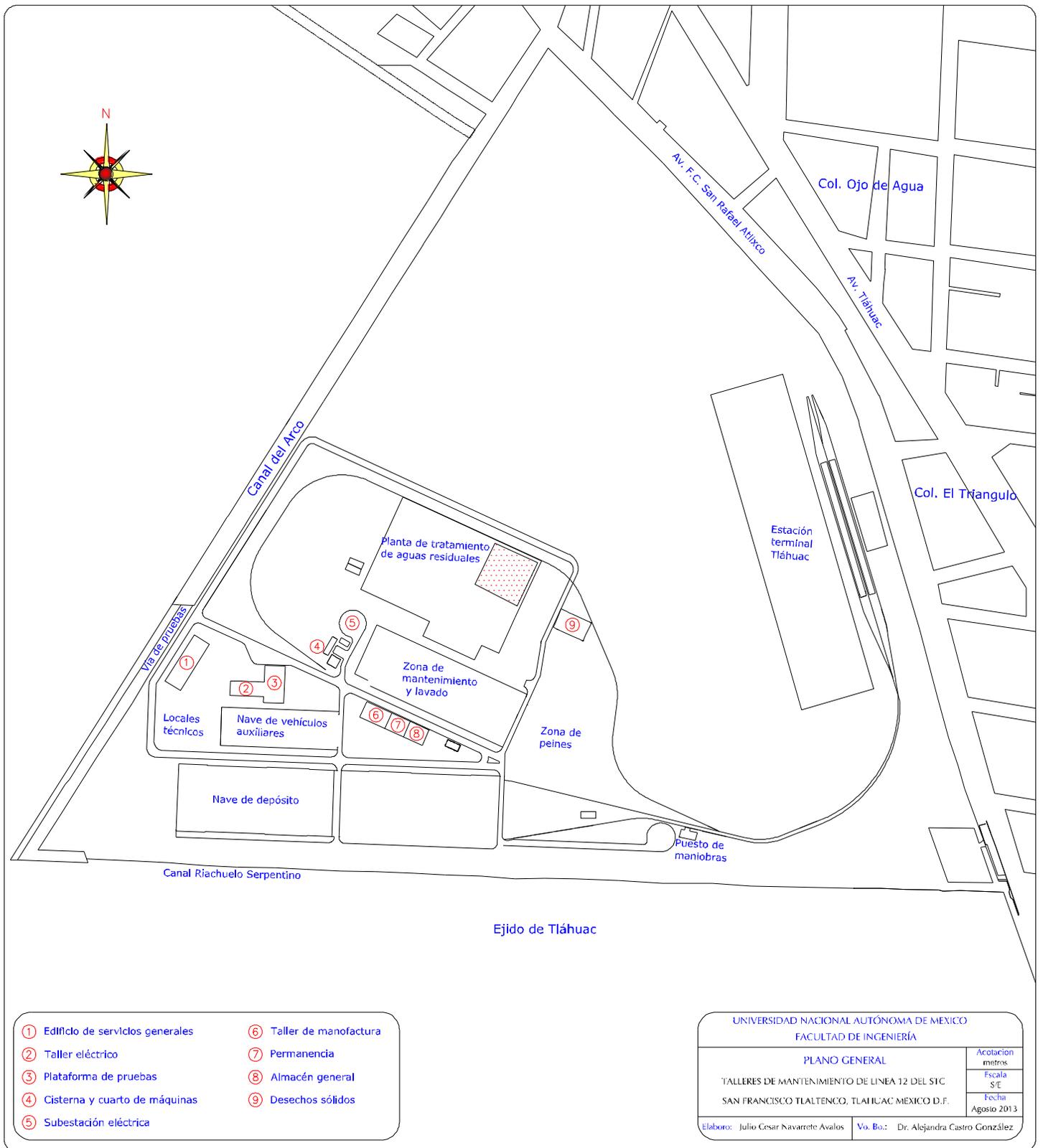


Figura 3. 3 Localización de las áreas que conforman los talleres de mantenimiento

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1 Planteamiento de alternativas

4.1.1 Consideraciones generales para el planteamiento de alternativas

En general, para plantear la solución a un problema de ingeniería, se deben establecer diversas consideraciones a fin de proponer las alternativas más adecuadas. Dichas consideraciones varían dependiendo del problema, en el caso del planteamiento de alternativas para el tratamiento del agua residual, se deben tener en cuenta los aspectos que se mencionan en la Tabla 4.1.

Tabla 4. 1 Aspectos a considerar para la propuesta de alternativas
(Elaboración a partir de CONAGUA, 2009)

Aspecto	Tipo
Técnicos	Características del influente Características del efluente Operación del sistema
Económicos	Inversión Costos de operación Reuso
Ambientales	Control de olores Disposición de efluentes

4.2 Comparación de alternativas

4.2.1 Características del influente

Considerando que los resultados presentados en la Tabla 3.1 correspondientes al efluente de agua residual generada en los talleres de Zaragoza pueden ser representativos para el planteamiento de alternativas para este caso de estudio. Se compararán dichos resultados con los límites permisibles establecidos en la normatividad aplicable descrita en el punto 1.3, a fin de identificar que parámetros son los que no cumplen, y en función de lo anterior proponer los sistemas de tratamiento adecuados.

Con base en los resultados de la caracterización, que se presentan en la Tabla 4.2, se trata de agua con un alto contenido de grasas, aceites y sólidos suspendidos. Es importante mencionar que debido a que las grasas y aceites presentes en el agua provienen del petróleo, generalmente no son biodegradables. Además, como el influente proviene de operaciones de limpieza o de proceso, frecuentemente una mayor proporción de la materia grasa se fija en emulsiones estables y en consecuencia su separación por medio de procesos físicos es más compleja. En la tabla 4.2 se observa que son seis los parámetros que no cumplen con los límites máximos permisibles indicados en las normas. Por lo que el primer punto a considerar para proponer el sistema de tratamiento adecuado, será el que garantice que el efluente de tratamiento cumpla con los parámetros necesarios, en función de la manera en la que se pretenda disponer de dicho efluente.

Tabla 4. 2 Comparativo entre los parámetros del agua residual de los talleres de Zaragoza y los límites máximos permisibles indicados en la normatividad aplicable

Parámetros	Resultado	Límites indicados en la NOM 001-SEMARNAT-1996	Límites indicados en la NOM 002-SEMARNAT-1996	Límites indicados en la NOM 003-SEMARNAT-1996	Unidades
Coliformes fecales	1.50E+11	1.00E+03	-	240	NMP/100 ml
DBO ₅ total	780	30-200	30-200	20	mg/l
DQO total	7,800				mg/l
Cianuros	<0.02	1 a 3	1.50	2.00	mg/l
Cromo hexavalente	<0.1	0.5-1.5	0.75	1.00	mg/l
Grasas y aceites	626	15-25	75.00	15.00	mg/l
Sólidos sedimentables	1.00	1 a 2	7.50	-	ml/l
Sólidos suspendidos totales	362	10-200	40-200	20	mg/l
Arsénico	0.003	0.1 a 0.4	0.750	0.20	mg/l
Cadmio	0.20	0.1 a 0.4	0.75	0.20	mg/l
Cobre	21.95	4 a 6	15.00	4.00	mg/l
Mercurio	0.0018	0.005 a .01	0.0150	0.01	mg/l
Níquel	0.18	2 a 4	6.00	2.00	mg/l
Plomo	1.09	0.2 a 1.0	1.50	0.50	mg/l
Zinc	2.55	10 a 20	9.00	10.00	mg/l
Materia flotante	presente	ausente	ausente	ausente	-
Temperatura	20.50	40	40	-	°C
pH	7.70	5 a 10	5.5-10	-	-

Como se mencionó anteriormente, al tratarse de un efluente con un alto contenido de grasas y aceites provenientes del petróleo, que no se pueden remover mediante un tratamiento preliminar convencional. Además, considerando que la relación DQO/DBO₅ es mayor de 5, será necesario emplear un proceso de coagulación-floculación, después del tratamiento preliminar. Así mismo, independientemente de cual sea el sistema de tratamiento que se recomiende para completar el tratamiento, al final del proceso se debe incluir la desinfección. Con lo anteriormente descrito, se lograría teóricamente tener las concentraciones que se presentan en la Tabla 4.3.

Tabla 4. 3 Concentraciones teóricas después del tratamiento primario
(Elaboración a partir de CONAGUA, 2009)

Parámetros	Resultado de la caracterización	Porcentaje de remoción tratamiento primario	Porcentaje de remoción coagulación-floculación	Concentraciones después del tratamiento primario	Unidades
Coliformes fecales	1.50E+11	-	-	1.50E+11	NMP/100 ml
DBO ₅ total	780	41%	60%	184	mg/l
DQO ₅ total	7800	41%	60%	1840	mg/l
Grasas y aceites	626	62%	90%	23.81	mg/l
Sólidos suspendidos totales	362	53%	80%	34	mg/l
Cobre	21.95	48%	-	11.41	mg/l
Plomo	1.09	51%	-	0.53	mg/l

Nota: los porcentajes de remoción indicados, son resultado del análisis de variabilidad en la eficiencia de remoción de contaminantes correspondiente a los procesos analizados en diversas plantas de tratamiento.

Para continuar con el análisis de la propuesta de tratamiento, conociendo las características del efluente luego del tratamiento primario, y considerando que se pretende reutilizar el caudal tratado en actividades de lavado, riego de áreas verdes y lavado de áreas comunes, las concentraciones que se deberán obtener luego del tratamiento secundario deberán cumplir con los límites permisibles indicados en la NOM 003-SEMARNAT-1996. Los porcentajes de remoción de los tratamientos secundarios son los que se indican en la Tabla 4.4.

Tabla 4. 4 Porcentaje de remoción por tipo de tratamiento
(Elaboración a partir de CONAGUA, 2009)

Parámetros	Porcentaje de remoción (%)				
	Tratamiento primario	Lodos activados y aireación extendida	Nitrificación en dos pasos	Filtros biológicos	Discos biológicos
Coliformes fecales	-	-	-	25	
DBO ₅ total	41	94	98	75	75
DQO total	40	83	92	75	-
Cianuros	-	-	-	-	
Cromo hexavalente	45	85	85		
Grasas y aceites	62	94	94	-	-
Sólidos sedimentables	-	-	-	-	-
Sólidos suspendidos totales	53	91	97	-	-
Arsénico	40	52	52	-	-
Cadmio	39	71	71	25	35
Cobre	48	88	88	75	75
Mercurio	8	23	23	25	75
Níquel	-	-	-	-	-
Plomo	51	85	85	35	75
Zinc	36	67	67	75	75
Materia Flotante	-	-	-	-	-
Temperatura	-	-	-	-	-
pH	-	-	-	-	-

Nota: Los espacios en blanco indican que no existe resultado concluyente o un incremento en el parámetro. Los porcentajes de remoción indicados, son resultado del análisis de variabilidad en la eficiencia de remoción de contaminantes correspondiente a los procesos analizados en diversas plantas de tratamiento.

Considerando los porcentajes de remoción de cada uno de los tipos de tratamiento mencionados en la Tabla 4.4, se tendrían las concentraciones mostradas en la Tabla 4.5.

Tabla 4. 5 Concentraciones teóricas por proceso de tratamiento
(Elaboración a partir de CONAGUA, 2009)

Parámetros	Resultado	Lodos activados y aireación extendida	Nitrificación en dos pasos	Filtros biológicos	Discos biológicos	Unidades
Coliformes fecales	1.50E+11	-	-	-	-	NMP/100 ml
DBO ₅ total	184.08	11.04	3.68	46.02	46.02	mg/l
DQO total	1840.92	312.96	147.27	460.23	-	mg/l
Cianuros	<0.02	-	-	-	-	mg/l
Cromo hexavalente	0.1	0.02	0.02	0.10	0.10	mg/l
Grasas y aceites	23.81	1.43	1.43	-	-	mg/l
Sólidos sedimentables	1	-	-	-	-	ml/l
Sólidos suspendidos totales	34.075	3.07	1.02	-	-	mg/l
Arsénico	0.003	0.00	0.00	-	-	mg/l
Cadmio	0.2	0.06	0.06	0.15	0.13	mg/l
Cobre	11.414	1.37	1.37	2.85	2.85	mg/l
Mercurio	0.0018	0.00	0.00	0.00	0.00	mg/l
Níquel	0.18	-	-	-	-	mg/l
Plomo	0.5341	0.08	0.08	0.35	0.13	mg/l
Zinc	2.55	0.84	0.84	0.64	0.64	mg/l
Materia flotante	PRESENTE	-	-	-	-	-
Temperatura	20.5	-	-	-	-	°C
pH	7.7	-	-	-	-	-

Comparando los valores que se podrían obtener, mostrados en la Tabla 4.5 y los límites permisibles indicados en la Tabla 4.2 correspondientes a la normatividad vigente, los tratamientos mediante lodos activados con aireación extendida y nitrificación en dos pasos, logran un efluente con la calidad suficiente para el reuso en servicios al público. Mientras los tratamientos con filtros y discos biológicos no logran remover la cantidad suficiente de DBO₅, por lo que únicamente cumpliría con la calidad exigida para su correcta disposición en bienes nacionales o en las redes de alcantarillado.

Con base en el análisis anterior, el sistema más adecuado para tratar el efluente es el de lodos activados y aireación extendida, considerando primeramente que es un sistema ampliamente utilizado. Además de que la variante con aireación extendida, facilitará las fluctuaciones tanto en la carga hidráulica como en la carga orgánica que se puedan presentar por las posibles variaciones en las actividades que se lleven a cabo en las instalaciones. De igual manera, este proceso es idóneo por la cantidad de agua que se desea tratar, ya que es recomendado para caudales menores a 25 litros por segundo. Finalmente al tratarse de un caudal menor y con el objetivo del reuso del mismo, los costos iniciales y de operación le

permiten competir favorablemente con otras alternativas de tratamientos biológicos. Respecto a los lodos de desecho generados por la operación de la planta, inicialmente se propone que sean almacenados en recipientes de 200 litros y enviados para su tratamiento, destrucción o disposición final a una empresa autorizada. En la figura 3.4 se muestra el tren de tratamiento propuesto.

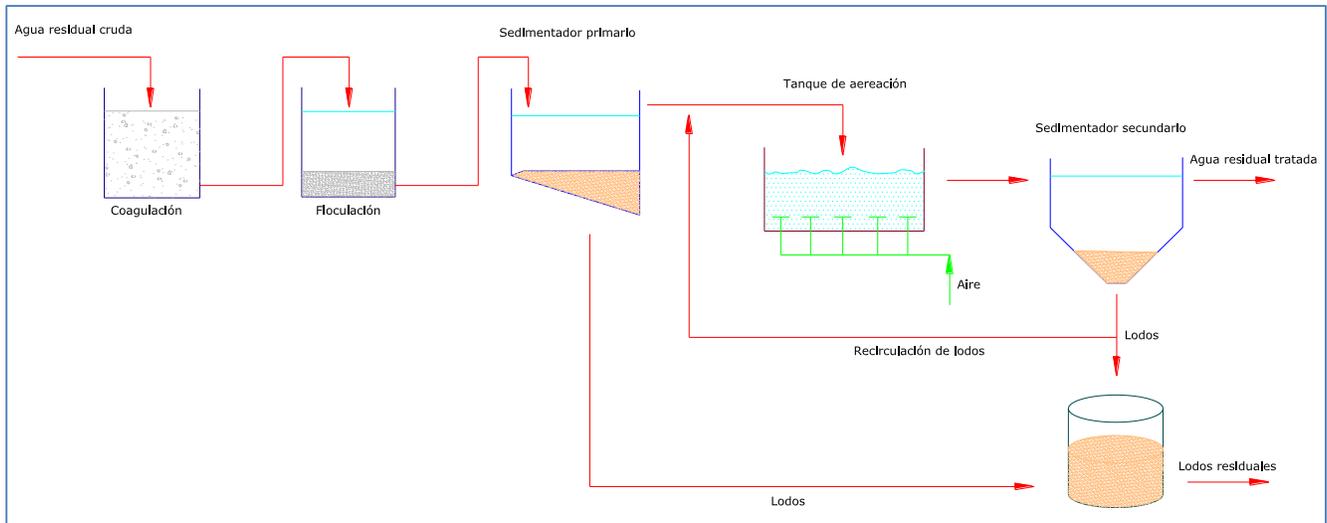


Figura 3. 4 Tren de tratamiento propuesto

4.3 Uso del agua tratada

El agua residual tratada se puede utilizar en diversas actividades, atendiendo las recomendaciones y normatividad existente, los reusos se pueden agrupar en varios tipos, como se mencionan a continuación:

4.3.1 Reuso urbano

Es recomendable usar el agua residual tratada para los siguientes propósitos:

- Riego de parques y jardines;
- Limpieza de patios en instituciones públicas;
- Riego de campos de golf y estadios;
- Albercas públicas y privadas;
- Fuentes ornamentales;
- Control de incendios y redes de agua contra incendio;
- Lavanderías;
- Construcción en general;
- Baños públicos;
- Lavado de vehículos;
- Lavado de zonas comunes.

En este sentido, cabe mencionar que la Ley de Aguas del Distrito Federal, establece dentro de las disposiciones del Artículo 35, lo siguiente:

VI. El riego de parques, jardines públicos y campos deportivos deberá realizarse con agua tratada. En las nuevas edificaciones el riego de las áreas verdes, jardines, lavado de autos, inodoros y demás usos que no requieran de agua potable, se deberá realizar con agua tratada únicamente y en donde no exista red secundaria de distribución, los usuarios implementaran las acciones necesarias para el reuso interno, la captación de agua de lluvia, en su caso se abastecerán a través de carros tanque (LADF, 2003).

Las principales precauciones para la utilización del agua tratada en las actividades anteriormente mencionadas, son las siguientes:

- Lograr la calidad del agua requerida para el propósito correspondiente;
- Cuidar que la operación del agua reciclada sea apropiada, evitando pérdidas volumétricas y sobrecostos por ineficiencia.

4.3.2 Reuso industrial

Los usos del agua residual tratada en actividades de la industria, pueden ser:

- Enfriamiento de maquinaria;
- Alimentación de calderas;
- Limpieza en general.

Los cuidados que se deben de considerar son:

- Controlar la corrosión, incrustaciones, residuo de origen biológico;
- Tener en cuenta la relación entre presión de operación y la calidad del agua. Esta puede alterarse con cambios de presión del agua;
- Evaluar el efecto de elementos patógenos en el agua sobre la corrosión, incrustaciones y calentamiento.

4.3.3 Reuso agrícola

Propósitos del reuso agrícola:

- Riego por gravedad a cielo abierto, por tuberías, surcos o inundación;
- Riego a presión por aspersión en cualquiera de sus formas;
- Riego a presión por goteo.

Consideraciones para su utilización:

- Evitar aplicaciones con baja eficiencia en riego. Si la eficiencia es baja, el esfuerzo económico debiera orientarse preferentemente a mejorar la eficiencia de aplicación del agua de riego, antes que al reuso;
- Prever el aporte e infiltración de agua salina y cloro residual;
- Tomar en cuenta la presencia de nutrientes en el agua de reuso y el consecuente ahorro de fertilizantes;
- Monitorear la calidad del agua tratada durante la aplicación y compararla con los requerimientos del cultivo;

- Disponer de una red de drenaje efectiva para evitar la contaminación acumulada en el suelo.

Para el caso particular de este caso de estudio, el objetivo de calidad del efluente tratado, debe cumplir con la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 para reuso en servicios al público con contacto indirecto, en la Tabla 4.2 se indicaron los límites máximos permisibles. En este caso de estudio, el reuso del agua residual tratada, puede darse en la mayoría de las actividades antes mencionadas, incluso las referentes al reuso agrícola, debido a que en zonas aledañas a los talleres, aún se ubican zonas de cultivo.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

En la actualidad, los grandes núcleos de población continúan con un crecimiento demográfico y económico acelerado, lo que ha implicado la exigencia de cobertura en los servicios básicos, como son: electricidad, agua potable, alcantarillado, recolección de residuos sólidos y transporte entre otros. Si bien es cierto que con los recursos económicos suficientes se pueden cubrir estas necesidades, el tema del agua es más complicado debido a que el recurso ya no tiene la disponibilidad de otros tiempos, por lo que es necesario llevar a cabo acciones que permitan hacer un uso sustentable del mismo.

En este sentido, al ser ineludible cubrir las necesidades de transportación de la población, mediante grandes obras de ingeniería, tiene como consecuencia que se requieran ciertos recursos para operar correctamente, tales como energía eléctrica y agua. En el caso de los Talleres de Mantenimiento de la Línea 12 del Sistema de Transporte Colectivo, se vuelve imperativo establecer las acciones que tengan como objetivo el ahorro y el uso adecuado de los recursos.

En virtud de lo anterior, el objetivo del presente trabajo es el de proponer alternativas de tratamiento para las aguas residuales que se generarán en los talleres de Tláhuac de la Línea 12, a fin de que el efluente tenga la calidad necesaria para su reutilización en actividades que se desarrollen en el mismo, con lo que se estaría logrando el objetivo de preservar el recurso, que como se mencionó anteriormente tiene una disponibilidad limitada. Con base en el trabajo realizado, se pudieron establecer los procesos de tratamiento más adecuados respecto a las características del efluente que se pretende tratar, así como la calidad esperada en función de la posibilidad de reutilizar el caudal tratado. De los cuatro procesos de tratamiento analizados que se ajustaban a las necesidades de operación y mantenimiento de los talleres, se llegó a la conclusión de que un pretratamiento, seguido de un proceso de coagulación-floculación que lograría eliminar una gran cantidad de grasas y aceites, para después someter el caudal a un tratamiento secundario mediante lodos activados y aireación extendida, con la correspondiente desinfección al final del proceso, es la alternativa más adecuada, que permitiría cumplir con la normatividad aplicable y a su vez estar en posición de reutilizar el efluente tratado, con lo que se lograría un uso sustentable del agua dentro de dichos talleres.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cesar V. y Vázquez G., 2003. Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. Publicación de Fundación ICA. México D.F. México.
- CONAGUA, 2009. Comisión Nacional del Agua. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, México.
- Crites R. y Tchobanoglous G., 2000, Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. McGraw-Hill Interamericana S.A., Santafé de Bogotá, Colombia.
- LADF, 2003. Ley de Aguas del Distrito Federal. Publicada el 27 de Mayo de 2003. Gaceta Oficial del Distrito Federal, México, D.F., México.
- LAN, 1992. Ley de Aguas Nacionales, publicada el 01 de Diciembre de 1992. Diario Oficial de la Federación. México D.F., México.
- Ramallo, R. S., 1996. Tratamiento de Aguas Residuales. Editorial Reverté, S.A. Sevilla, España.
- Rodríguez, J. A. 2012, Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales. Universidad El Valle. Cali, Colombia.
- SEMARNAT, 1997. 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 06 de Enero de 1997. Diario Oficial de la Federación. México.
- SEMARNAT, 1998. 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 03 de Junio de 1998. Diario Oficial de la Federación. México.
- SEMARNAT, 2003. Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002.- Protección ambiental, Lodos y biosólidos, Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Publicada el 15 de Agosto de 2003. Diario Oficial de la Federación. México.
- SEMARNAT, 1998. Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. Publicada el 21 de Septiembre de 1998. Diario Oficial de la Federación. México.
- Seoáñez C. M., 2004. Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas de bajo costo. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Trapote, J. A., 2011, Depuración de aguas residuales urbanas. Publicaciones de la Universidad de Alicante. Alicante España.