



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Propuesta de un tren de
tratamiento para la remoción de
metales pesados presentes en el
agua residual de la industria
textil.**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Israel Bello Peza

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Luis Antonio García Villanueva



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021

Índice

Índice de tablas.....	3
Índice de figuras.....	4
Resumen.....	5
Abstract	5
Introducción	6
Planteamiento del problema	7
Objetivos	9
Objetivo general.....	9
Objetivos específicos.....	9
Alcances y limitaciones.....	9
Capítulo 1. El estado del arte	10
1.1 Antecedentes de la industria textil	10
1.1.1 Industria textil en México y el mundo.....	10
1.1.2 Problemática ambiental de la industria textil	13
1.2 Aguas residuales en la industria textil	15
1.2.1 Contaminantes presentes en el agua residual textil	15
1.2.2 Metales pesados en el agua residual de la industria textil	17
1.3 Tratamiento de las aguas residuales	20
1.3.1 Pretratamiento y tratamiento primario	31
1.3.2 Tratamiento secundario	36
1.3.3 Tratamiento secundario: Lodos activados.....	45
1.3.4 Tratamiento secundario: Otros procesos aerobios y anaerobios	48
1.3.5 Tratamiento terciario de las aguas residuales	56
Capítulo 2. Normatividad de las aguas residuales en la industria textil	68
2.1 Normatividad de las aguas residuales internacionales y en México.....	68
2.1.1 Normatividad de aguas residuales en el mundo	68
2.1.2 Normatividad de aguas residuales en México.....	69
2.2 Normatividad de aguas residuales en la industria textil	73
2.2.1 Normatividad de las aguas residuales en la industria y de la industria textil en México.....	73
Capítulo 3. Propuesta del tren de tratamiento de agua residual textil.....	74
3.1 Caso de estudio	74

3.2 Tren de tratamiento	78
Capítulo 4 Conclusiones	105
Referencias bibliográficas	107

Índice de tablas

Tabla 1.1 Principales actividades industriales generadoras de metales pesados.

Tabla 1.2 Porcentaje del contenido de metales y metaloides de determinados colorantes (PPM).

Tabla 1.3 Contaminantes en las aguas residuales.

Tabla 1.4 Generación de aguas residuales por tipo de industria 2011, (millones de m³).

Tabla 1.5 Descarga de aguas residuales industriales después del tratamiento (como % de total de descarga).

Tabla 1.6 Tipos de tratamiento de las aguas residuales en México.

Tabla 1.7 Numero de plantas en México por entidad federativa.

Tabla 1.8 Procesos y sistemas para el tratamiento secundario.

Tabla 1.9 Características de un desinfectante químico ideal.

Tabla 1.10 Remoción de bacterias en diferentes procesos de tratamiento.

Tabla 1.11 Criterio de diseño y calidad esperada del efluente del sistema de plantas flotantes.

Tabla 2.1 Jerarquía de las leyes en México.

Tabla 3.1 Análisis del agua residual del caso de estudio.

Tabla 3.2 Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros.

Tabla 3.3 Límites máximos permisibles para contaminantes básicos.

Tabla 3.4 características de descarga canales Parshall.

Tabla 3.5 Dimensiones estándares de los canales Parshall.

Tabla 3.6 Valores amortiguados por el tanque de igualación primario.

Tabla 3.7 Eficiencia de los discos biológicos.

Tabla 3.8 Parámetros de remoción de los discos biológicos.

Tabla 3.9 Eficiencia de remoción de contaminantes con macrófitas flotantes.

Tabla 3.10 Porcentaje calculado de remoción de metales pesados.

Tabla 3.11 Remoción de metales pesados en el efluente.

Tabla 3.12 comparación de resultados.

Índice de figuras

Figura. 1.1 Diagrama de bloques del proceso productivo.

Figura 1.2 Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales 2017.

Figura 1.3 Relación entre algas y bacterias.

Figura 1.4 Esquema de una unidad de Biodiscos típica.

Figura 3.1 Diagrama del flujo del tren de tratamiento propuesto.

Figura 3.2 Turbina desengrasante AEROFLO.

Figura 3.3 Geometría de un canal Parshall.

Figura 3.4 Geometría de un canal Parshall.

Figura 3.5 Hidrograma.

Figura 3.6 Curva masa de entrada.

Figura 3.7 Zona de un tanque sedimentador.

Figura 3.8 Eficiencia de remoción de S.S.

Figura 3.9 La configuración típica de discos biológicos por etapas.

Resumen

Los metales pesados son unos de los elementos más peligrosos para los ecosistemas y los seres vivos. En la industria textil se utilizan en algunos de los procesos, si las aguas residuales de estos procesos se vierten en ríos, lagos o mares, sin un tratamiento previo, pueden afectar a los seres vivos y los ecosistemas. Los humedales artificiales ayudan a tratar las aguas vertidas con un nivel alto de metales pesados. El presente estudio propone un tren de tratamiento para la remoción de los metales pesados a un nivel teórico. El tren de tratamiento consiste en rejillas, desarenador, desengrasado, medidor de gasto, tanque de igualación, sedimentador primario, discos biológicos, sedimentador secundario, humedales, filtros de carbono y desinfección con filtros UV. Esta investigación se enfoca en los filtros biológicos y los humedales artificiales, su operación y su eficiencia.

Abstract

Heavy metals are one of the most dangerous elements for an ecosystem and for the living beings. In the textile industry some of these elements are used in their processes, if the residual waters of these processes get through the rivers, lakes or oceans, without a previous treatment, this could affect the whole ecosystems. Wetlands can help to treat the high level on heavy metal waters that are poured in them. This study proposes that a treatment train for the removal of the heavy metals at a theoretical level. The treatment consists on grids, sand traps, degreasers, flow meter, equalization tank, primary settler, biological discs, secondary settler, wetlands, carbon filters and U.V. filter disinfectors. This investigation is focused on the biological filters and artificial wetlands, their operation and their efficiency.

Introducción

El agua es uno de los recursos naturales no renovables más importantes para la existencia de la humanidad. A medida que las naciones se industrializan, las aguas residuales llegan a tener metales pesados y plaguicidas. En muchos países se tiende a pasar por alto la contaminación proveniente de la industria, con el propósito de no disminuir el crecimiento (Lord, R. 1982). El sector industrial, de acuerdo con los índices de extracción, consumo y contaminación de agua, se ha configurado en 39 grupos, de los cuales 9 son los mayores productores de aguas residuales, los cuales son azúcar, química, papel y celulosa, petróleo, bebidas, textiles, siderúrgica, electricidad y alimentos (López, R, 1996).

Por tal motivo, se han realizado diferentes investigaciones utilizando una variedad de procedimientos tanto físicos, químicos y biológicos, en busca de una solución óptima para el tratamiento de estos efluentes (Salinas, M. 2011), con esto en mente se propuso un tren de tratamiento para las aguas residuales de la industria textil, ya que esta industria tiene uno de los efluentes más difíciles de tratar.

Esta investigación se divide en cuatro capítulos, en el primer capítulo se desarrolló una investigación de la importancia de la industria textil, tanto a nivel mundial como a nivel nacional, así como la problemática de las descargas de aguas residuales proveniente de esta industria y el tratamiento que deben tener los efluentes antes de su descarga.

Para el capítulo dos se tiene una investigación de toda la legislación con respecto a las descargas de aguas residuales en la República Mexicana y a nivel Internacional.

En el tercer capítulo se explica el tren de tratamiento propuesto y como son los filtros biológicos y los humedales artificiales y un predimensionamiento. Finalmente, en el cuarto capítulo, se exponen las conclusiones.

Planteamiento del problema

En el mundo donde la demanda del agua dulce está en constante aumento y los escasos recursos hídricos se ven cada vez más exigidos por la captación excesiva, la contaminación y el cambio climático. Si se continúa actuando de la misma forma se estará fomentando un mayor deterioro de la situación. Se estima que en el mundo más del 80% de las aguas residuales (95% en países en desarrollo) se vierten al medio ambiente sin tratamiento alguno. En 2012, se registraron más de 800,000 muertes en el mundo a causa de del consumo de agua potable contaminada, cada vez son más las zonas muertas desoxigenadas en mares y océanos a causa del vertido de aguas residuales sin tratar, lo cual afecta a los ecosistemas marinos en una superficie de 245,00 km², con repercusiones en la industria pesquera, medios de subsistencia y cadenas alimenticias (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas, 2017).

Las principales fuentes de abastecimiento de agua en México son los ríos, manantiales y el subsuelo, la disponibilidad de estos recursos es muy variable en todo el territorio nacional. Las aguas superficiales se encuentran contaminadas por descargas domésticas industriales y agropecuarias, la sobreexplotación del agua subterránea se está generalizando, lo que ocasiona deterioros irreversibles, intrusión salina, hundimientos del terreno y necesidad de bombeo a profundidades inabarcables (López, R, 1996).

Los principales contaminantes que modifican la calidad natural de las corrientes de agua son: materia orgánica, grasas, aceites, detergentes, sólidos sedimentables, organismos patógenos, **metales pesados** y plaguicidas. En el sector industrial de acuerdo con los índices de extracción, consumo y contaminación de agua se han configurado en 39 grupos, los cuales son 9 los que producen mayor cantidad de aguas residuales: azúcar, química, papel y celulosa, petróleo, bebidas, **textiles**, siderúrgica, electricidad y alimentos. Estos 9 grupos en conjunto arrojan el 82% del total de aguas residuales de origen industrial. Destacan la industria azucarera y la química con el 59.8% del total. (López, R. 1996).

La industria textil es el sector dedicado a la producción de fibras, hilados, telas y productos relacionados con la confección de ropa y vestidos. Esta industria posee uno de los efluentes más difíciles de tratar. Los efluentes derivados de esta industria se caracterizan por tener un intenso color, pH elevado y alta demanda de química de oxígeno (DQO) (Carrión, S. 2014). Esta industria genera millones de metros cúbicos de agua residual anualmente, los contaminantes mas importantes en efluente de los textiles son colorantes, sustancias tóxicas, surfactantes y sales, metales, cloro, sulfatos y nitrógeno.

Objetivos

Objetivo general

Plantear una propuesta de tren de tratamiento para la remoción de metales pesados presentes en el agua residual en la industria textil basada en un caso hipotético y considerando los límites de descargas que marcan las normas mexicanas.

Objetivos específicos

1. Establecer el estado del arte sobre los procesos textiles y su problemática con el agua residual generada en las diferentes operaciones o procesos unitarios, considerando los tratamientos convencionales y avanzados.
2. Determinar la importancia de los tratamientos de los efluentes de la industria textil para el cumplimiento de la normatividad nacional e internacional.
3. Definir el destino del efluente de la industria textil una vez tratado mediante el esquema propuesto, considerando la eficiencia de remoción de los contaminantes y las condiciones de descarga autorizadas.

Alcances y limitaciones

Se considerará un caso de estudio hipotético, pero tomando en cuenta los datos reportados en literatura.

Los metales pesados se establecerán como los contaminantes principales a remover, no así los colorantes de tipo orgánico.

Capítulo 1. El estado del arte

1.1 Antecedentes de la industria textil

1.1.1 Industria textil en México y el mundo

El término “*Industria textil*” (del latín *texere, tejer*) se refiere, en un inicio, al tejido de las telas a partir de fibras, pero en la actualidad abarca una amplia gama de procesos. (Warshaw, L.,2000). Esta industria se encarga de la producción de fibras, hilados, telas y productos relacionados con la confección de ropa (Carrión, S.,2014).

Cada individuo está rodeado por textiles desde su nacimiento hasta su muerte. Se camina sobre productos textiles y se viste con ellos, se sienta en sillas o sofás cubiertos de telas, se duerme sobre telas. Los textiles secan o mantienen seco a una persona, le ayudan a estar caliente y lo protegen del sol, el fuego y las infecciones. Los textiles en el hogar dan apariencia estética; varían en color, diseño y textura. Los usos industriales y hospitalarios de los textiles son muy variados. La industria automotriz, una de las más importantes en diferentes países utiliza textiles para fabricar vestiduras, alfombras, revestimientos, acabados y cinturones. El hombre ha viajado a la luna con trajes especiales de 100,000 dólares de veinte capas diferentes. Los médicos y enfermeros usan prendas desechables. Los soldados y cazadores se protegen con chalecos a prueba de balas y cinturones de seguridad. Los textiles siempre están en constante cambio. Cambian con la moda y para hacer frente a las necesidades del estilo de vida de las personas. Los nuevos desarrollos en procesos de producción también provocan cambios significativos en los textiles. La industria textil se desarrolló desde ser una artesanía, a través de la revolución industrial en los siglos XVIII y XIX, luego con el adelanto científico y tecnológico en el siglo veinte se crearon hilos con textura modificada. Se desarrollaron nuevos métodos de fabricación de telas y se incrementó la producción, se desarrollaron acabados y la producción textil se hizo compleja estableciendo nuevos sistemas de comercialización (Hollen, N., 1987).

La industria textil ha evolucionado de diferentes formas en todo el mundo y en cada continente ha tenido diferentes puntos de relevancia conforme a la economía de cada país (Hollen, N., 1987).

Europa

La industria textil europea fue una de las primeras en recibir el impulso de la Revolución Industrial, iniciada en Inglaterra, y puede decirse que fue en donde se efectuaron los primeros ensayos sistematizados de los procesos textiles. Al margen del empirismo sentaron las bases para posterior desarrollo de la investigación textil en Europa. Con la excepción de Inglaterra y algunos centros alemanes, la investigación textil europea se desarrolló a partir de la Segunda Guerra Mundial, habiendo alcanzado su máximo desarrollo hacia el periodo de 1965-1970. La evolución de la investigación textil europea fue fundamentada en una industria de tipo tradicional que se desarrolló bajo el Imperialismo (Cegarra. J., 1977).

Asia

En la década de los 70's y 80's, las grandes marcas de ropa decidieron trasladar la confección de los países industrializados de Europa a los nuevos países industrializados de Asia. Encontrando en países como China, Bangladés, India y Turquía, una mano de obra más barata y un aumento en la productividad. En el siglo XIX en occidente, y más recientemente en China, la industria textil ha sido el principal factor para que despegue una economía moderna y una industria de mayor valor. China es todavía el principal productor y proveedor mundial de algodón, fibras sintéticas y tejidos de prendas confeccionadas. El gigante asiático también lidera la importación global de maquinaria textil. En el año 2000, países como China exportaban el 7% de las manufacturas del mundo. Después del 2001, cuando entró a la Organización Mundial del Comercio, ha aumentado sus exportaciones hasta el 20% (Peña, M., 2019).

África

África despertó un interés para la Industria Textil internacional, buscando que su algodón sea competitivo, además que este continente es la última frontera del negocio textil mundial. La mayoría de los países africanos tienen acuerdos de libre comercio con Estados Unidos. El aumento de los costos de producción en China ha hecho que las empresas de este sector textil busquen otras alternativas como Etiopía. Varios gigantes de la industria están empezando a derivar su producción a África. La casa matriz de Calvin Klein y Tommy Hilfiger, han estado empezando a fabricar algunas prendas en Kenia (Kapnur, S. y Passarielo, C.,2015).

América latina

La Industria Textil constituye una de las actividades productivas más antiguas de América Latina. La producción de textiles era ya muy importante en los tiempos prehispánicos y continuó en los años de la dominación colonial (Belini. C., 2009). En Chile, se sabe que la instalación de la primera fábrica de tejidos de algodón fue en 1804, pero la instalación de la industria se registra en la época comprendida entre 1880 y 1905 (Comisión Económica para América Latina de las Naciones Unidas 1968). A lo largo de los siglos XIX y XX, esta importancia no disminuyó. Durante la etapa de crecimiento industrial inducido por las exportaciones, la rama textil lideró el crecimiento sectorial en Brasil y México, dos de las economías más grandes de la región, con un retraso considerable en los países del Río de la Plata (Argentina y Uruguay). Esta industria se convertiría en el motor del proceso de industrialización (Belini. C., 2009).

México

En México la Industria Textil es una de las más importantes porque, en términos económicos, es el mayor empleador de mano de obra femenina. Este sector es conocido como una Industria Social por el requerimiento de mano de obra, y no requiere de una gran inversión de capital, por lo tanto, esto le viene muy bien a países emergentes como México (Pérez, L., 2015).

Empezó a tener reconocimiento a partir de 1830 y en 1837 se crearon cuatro fábricas en el estado de Puebla. Para 1844 ya había 47 fábricas en el país y por mucho tiempo se tejía con antiguas prácticas artesanales. El desarrollo del capitalismo promovió la modernización de los talleres textiles y en los 20 años del periodo de 1850 a 1870, la inversión de textiles llegó a constituir el 25% de la inversión total en industria. Para 1877 funcionaban 98 fábricas y en 1895 había 110 fábricas. En 1910 se registraban hasta 123 fábricas. Para la época de 1940 las materias primas que venían del extranjero y se consumían en la industria textil eran colorantes, una gran diversidad de sustancias químicas industriales y fibras artificiales. El número de empresas establecidas para 1970 era de 2210 y para 1981 ya había 2495, después de esto se genera un cambio muy grande para la industria con el Tratado de Libre Comercio (TLCAN), las reglas comunes del Acuerdo General de Aranceles y Comercio (GATT), la entrada en vigor de la Organización Mundial del Comercio y el Acuerdo de los Textiles y el Vestido, con estos hechos las exportaciones mexicanas se favorecieron. México es uno de los grandes productores de mezclilla en el mundo y un proveedor muy importante para el mercado de los E.U.A (Arrollo López, M., y Cárcamo Solís, M., 2010).

1.1.2 Problemática ambiental de la industria textil

Las aguas superficiales se encuentran contaminadas por descargas domésticas, industriales y agropecuarias. Los sitios con mayor desarrollo demandan cada vez más este importante líquido y son los que aportan más contaminantes al descargar sus aguas residuales municipales e industriales en los cuerpos receptores. En la mayoría de los casos sin ningún tratamiento (Langford, M. y Khalfan, A. 2006).

La industria textil es una industria que consume grandes cantidades de agua, necesitando de 100 a 200 litros de agua para producir un kilogramo de productos textiles (Carvalho et al. 2016). Estos efluentes poseen elevadas concentraciones de colorante, contaminantes orgánicos refractarios, compuestos tóxicos, tensioactivos, componentes clorados, por lo tanto, se constituyen en uno de los efluentes de más difícil tratamiento. Los procesos más usados para tratar estas aguas son biológicos,

como son los lodos activados; este método consiste en la biodegradación de la materia orgánica mediante la acción de microorganismos en condiciones aeróbicas, y la separación solido-líquido, que se genera mediante un clarificador secundario (Salazar, I., Crespi, M. y Salazar, R. 2009).

El tratamiento de las aguas residuales de la industria textil es un problema al que se le ha dado mucha atención, ya que muchos colorantes y aditivos son textiles y no biodegradables. Estas aguas residuales son descargadas a canales y ríos, permaneciendo en el ambiente; para su tratamiento existen procesos físicos, químicos y biológicos, que pueden ser aplicados para remover colorantes de las aguas residuales, cada método tiene sus limitaciones técnicas y económicas (Miranda, 2019).

Proceso textil

Los diferentes sectores que involucran a la industria textil, iniciando desde la generación de fibras hasta la confección de las prendas de vestir, son:

Fibra: Las fibras utilizadas en los procesos textiles son naturales y químicas. Las primeras son el algodón, la lana, la seda y el lino; las segundas pueden ser sintéticas y artificiales. En el caso de las fibras sintéticas son el poliéster, el nylon y el acrílico; en las fibras artificiales son el rayón y el acetato (Flores, G. E. 2004).

Hilado: Existen dos formas de proceso de hilado; el proceso de lana y el de algodón (Flores, G. E. 2004).

Telas y tejidos: Los tipos de tejido son planos y de punta, que se utilizan en la confección de ropa, artículos textiles para el hogar, la industria automotriz y de muebles (Flores, G. E. 2004).

Acabado: El acabado comprende el teñido, el estampado, el secado final y la mercerización de tejidos de algodón. El teñido es un proceso aplicado en el hilo y la tela, en el cual se utilizan químicos (tintes y colorantes) y agua. El

estampado se realiza en telas utilizando tintes y colorantes (Flores, G. E. 2004).

1.2 Aguas residuales en la industria textil

1.2.1 Contaminantes presentes en el agua residual textil

La composición de los efluentes generados en la industria textil es muy variable, típicamente caliente, alcalino y coloreado. Un intenso color, un elevado pH y alta Demanda Química de Oxígeno (DQO). Los principales contaminantes presentes son sólidos suspendidos, aceites minerales y compuestos orgánicos, los cuales se consideran compuestos xenobióticos recalcitrantes a los procesos biodegradables. También están presentes concentraciones significativas de metales pesados, como son: cromo, cobre, zinc, níquel y plomo. En el proceso de fabricación de la fibra natural, el agua residual puede contener plaguicidas y contaminantes microbiológicos, como bacterias hongos y otros patógenos (Miranda, E., 2019).

En el proceso de tintura hay una concentración de colorante que no queda adherido al tejido, las aguas residuales procedentes de este proceso de tintura y acabados representa el 80% del total de aguas residuales de todo el proceso. Se muestra en la figura 1.1 los procesos productivos y los contaminantes que cada una arroja (Carrión, S., 2014).

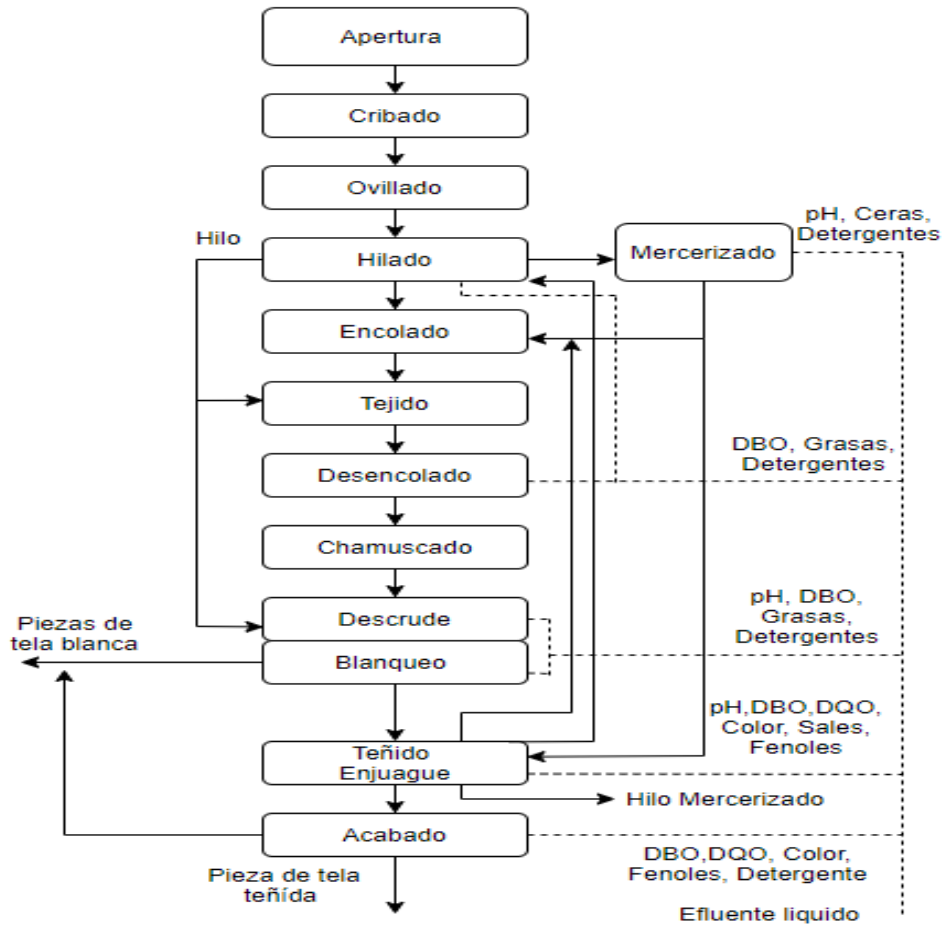


Figura. 1.1 Diagrama de bloques del proceso productivo

Fuente: Flores, G. E. 2004.

La mayor contaminación orgánica se concentra en las operaciones de desencolado y descrude, la contaminación inorgánica se tiene del lavado de sales de sodio, mercerizado, blanqueo y teñido. Los efluentes suelen ser alcalinos, coloreados y con una DBO (Demanda Biológica de Oxígeno) comprendida entre los 300 y 1000 mg/l. Los principales contaminantes son: almidones, glucosa, ceras, plaguicidas, agentes humectantes, sulfuros, sulfitos, ácido acético, detergentes, hipoclorito, agentes reductores y colorantes no biodegradables (Flores, G. E. 2004).

1.2.2 Metales pesados en el agua residual de la industria textil

La implementación de metales en los procesos industriales ha permitido que grandes concentraciones de metales pesados potencialmente tóxicos sean emitidas a la atmósfera y vertidos en los ambientes acuáticos y terrestres. En el medio hidrosférico, cantidades cercanas a 10^9 kg/año de metales traza se han vertido, siendo las aguas residuales de origen doméstico, las plantas térmicas y las acererías las principales fuentes de emisión, como se muestra en la tabla 1.1. La toxicidad de los metales pesados depende de su movilidad en el medio que, a su vez, depende de su especiación química, persistencia y tendencia de acumulación o bioacumulación (Cavides, R. [et al.] 2005).

Tabla 1.1 Principales actividades industriales generadoras de metales pesados.

Industria	Metales	Contaminación
Minera de metales ferrosos	Cd, Cu, Ni, Cr, Co, Zn	Ácido de minas, relaves, escombreras
Extracción de minerales	As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn	Presencia de menas
Fundición	As, Cd, Pb, Tl	Procesado de minerales para obtención de metales
Metalúrgica	Cr, Cu, Mn, Pb, Sb, Zn	Procesado térmico de metales
Aleaciones y aceros	Pb, Mo, Ni, Cu, Cd, As, Te, U, Zn	Fabricación, eliminación y reciclaje de metales, relaves y escoriales
Gestión de residuos	Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Cr, Hg, Mn	Incineración de residuos o en lixiviados
Corrosión metálica	Fe, Cr, Pb, Ni, Co, Zn	Inestabilidad de los metales expuestos al medio ambiente
Galvanoplastia	Cr, Ni, Zn, Cu	Los efluentes líquidos de procesos de recubrimiento
Pinturas y pigmentos	Pb, Cr, As, Ti, Ba, Zn	Residuos acuosos procedentes de la fabricación
Baterías	Pb, Sb, Zn, Cd, Ni, Hg	Fluido de pilas de residuo
Electrónica	Pb, Cd, Hg, Pt, Au, Cr, As, Ni, Mn	Residuos metálicos acuosos y sólidos
Agricultura y ganadería	CD, Cr, Mo, Pb, U, V, Zn, As, Mn, Cu	Contaminación de escorrentía

Cavides, R. [et al.] (2005).

Los elementos metálicos, debido a que están presentes en los sistemas acuáticos a muy bajas concentraciones, son denominados elementos traza. Algunos son nutrientes esenciales para plantas y animales, micronutrientes como Mg (Magnesio), Mo (Molibdeno), Cu (Cobre), Co (Cobalto), Zn (Zinc), Sc (Escandio) y V (Vanadio), mientras que otros elementos como el Ni (Níquel), Sn (Estaño) y Cr (Cromo) son esenciales únicamente para animales, pero cuando estos elementos están presentes en sistemas ambientales a concentraciones superiores a ciertos niveles, debido a los desequilibrios naturales o por introducción antropogénica, puede ser tóxica para los seres vivos (Cavides, R. [et al.] 2005).

El término “*metal pesado*” es utilizado para referirse de una manera amplia a aquellos elementos, metales o metaloides, con potencial de causar problemas de toxicidad, y se define como un elemento que tiene propiedades metálicas (ductilidad, densidad, estabilidad como catión). Bajo la denominación de metales pesados se incluye a un conjunto de 65 elementos de la tabla periódica con número atómico mayor a 20 y con una alta densidad relativa mayor o igual a 5 g/cm³ en su forma elemental (Vera. M., 2019).

Los metales pesados de los componentes de las emisiones de algunas empresas de diferentes industrias y transporte concentran la contaminación más peligrosa del aire, agua, vegetación, animales y humanos (Zaikov. G. et al., 2017).

La presencia de metales en cantidades diversas en distintas clases de colorantes se presenta en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Porcentaje del contenido de metales y metaloides de determinados colorantes (PPM).

Metal	Acido	Básico	Directo	Disperso	Reactivo de la fibra	De tina
Arsénico	<1	<1	<1	<1	1.4	<1
Cadmio	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Cromo	9	2.5	3	3	24	83
Cobalto	3.2	<1	<1	<1	<1	<1
Cobre	79	33	35	45	71	110
Plomo	37	6	28	37	52	6
Mercurio	<1	0.5	0.5	<1	0.5	-1
Zinc	z13	32	8	3	4	4

Flores, G. E. (2004)

1.3 Tratamiento de las aguas residuales

El agua

El agua es el compuesto químico más abundante y el de mayor significado para la humanidad. La importancia desde el punto de vista químico reside en que casi la totalidad de los procesos químicos que ocurren en la naturaleza, no solo en organismos vivos, animales y vegetales, sino en la superficie no organizada de la tierra, así como los que se lleva a cabo en los laboratorios y en las industrias, tienen lugar entre sustancias disueltas en agua, esto es, en disoluciones acuosas (Crespi, M. 1996).

El crecimiento de las poblaciones, así como el aumento de la actividad económica y los estándares de vida, han sido causantes de la competencia por obtener el recurso hídrico en óptimas condiciones y con estándares de alta calidad. Las preocupaciones actuales con respecto a la viabilidad y el cambio climático requieren de una gestión del recurso hídrico que tenga un enfoque participativo y

una visión de producción más limpia (Villalobos-Guateros y Ruíz-Martínez, L. 2019). El agua en uso se carga de sustancias, que le confieren propiedades perjudiciales para la salud, de modo que se tiene que tratar al ser devuelta a los cauces receptores, con esto su impacto es mínimo en el cauce receptor (Crespi, M. 1996).

Aguas residuales

Es común clasificar las aguas residuales en dos tipos: industriales y municipales. En muchos casos las aguas residuales industriales requieren tratamiento antes de ser descargadas en el sistema de alcantarillado municipal; como las características de estas aguas residuales cambian de una a otra industria, los procesos empleados para tratar los diferentes tipos de aguas residuales son muy variables. (Cesar y Vásquez, 2001). Las aguas residuales incluyen las aguas residuales municipales y la escorrentía urbana.

Las aguas residuales domésticas se caracterizan por su elevada concentración de partículas en suspensión, materia orgánica, nutrientes, compuestos antropogénicos y patógenos que pueden causar daños a la vida acuática y la calidad de las fuentes hídricas (Sacar-Larrota et. al., 2018).

El agua residual municipal fresca y aerobia, tienen olor a queroseno y color gris, además con más tiempo de haber sido generada es séptica y pestífera, su olor característico es a sulfhídrico, similar al de los huevos podridos. El agua residual séptica es de color negro, colectada en los sistemas de alcantarillado municipal corresponde a una amplia variedad de usos. En la tabla 1.3 se describen los contaminantes de las aguas residuales (Cesar y Vásquez, 2001).

Tabla 1.3 Contaminantes en las aguas residuales.

Contaminantes	Fuente	Importancia ambiental
Sólidos suspendidos.	Uso doméstico, desechos industriales y agua infiltrada en la red.	Causa depósitos de lodo y condiciones anaerobias en ecosistemas acuáticos.
Compuestos orgánicos biodegradables.	Desechos domésticos e industriales.	Causa degradación biológica, que incrementa la demanda de oxígeno en los cuerpos receptores.
Microorganismos patógenos.	Desechos domésticos.	Causan enfermedades transmisibles.
Compuestos orgánicos refractarios.	Desechos industriales.	Pueden causar problemas de sabor y olor, puede ser tóxicos y cancerígenos.
Nutrientes.	Desechos domésticos e industriales.	Pueden causar eutroficación.
Metales pesados.	Desechos industriales, minerales, etc.	Son tóxicos, pueden interferir con el tratamiento y reúso del efluente.
Sólidos inorgánicos disueltos.	Debido al uso doméstico o industrial.	Pueden interferir con el reúso del efluente.

Cesar y Vásquez. (2001)

Las aguas residuales industriales son las que proceden de cualquier actividad industrial y derivan directamente de la fabricación de todo tipo de productos. Consisten en disoluciones acuosas a distintas concentraciones de los productos empleados en el proceso productivo. Estas aguas presentan una gran cantidad de contaminantes que tienen una acción muy compleja sobre el medio ambiente, afectando el desarrollo de los ecosistemas (Pérez, J. 2015).

Aguas residuales a nivel mundial

En todo el mundo las áreas urbanas se enfrentan enormes desafíos como la aceleración del crecimiento urbano, el cambio climático, la falta de agua, la migración en zonas de conflicto, por mencionar algunas (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas 2017).

La mayoría de los países han tratado de resolver estos problemas de acuerdo con sus posibilidades. Con respecto al agua, y más en concreto a los efluentes, se ha legislado y se han establecido las formas en que se recolectan y tratan estas, pero en la mayoría de los países, solo se recolecta formalmente una parte de las aguas residuales. Un porcentaje elevado de estas, que proviene de sobre todo de entornos de bajos ingresos, se eliminan en el drenaje de aguas superficiales o en los canales de drenaje informal más próximo. En muchos casos, los grandes volúmenes de aguas residuales que se vierten en redes de saneamiento deficientes, tanto en redes combinadas como separadas, nunca llegan a una planta de tratamiento. Un gran porcentaje se pierde en el camino por daños en las tuberías o termina en el drenaje de aguas superficiales. La generación de aguas residuales implica uno de los mayores retos es el crecimiento de barrios marginales en los países en desarrollo. En África, el 62% de la población urbana vive en estos barrios. Los datos más alarmantes provienen de países que salen de conflictos y de Asia Occidental. Con esto se usan sanitarios comunales que no están conectados a una red de saneamiento (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas, 2017).

Después de la Revolución Industrial del Siglo XVIII, en los países actualmente desarrollados se marcó el comienzo del dilema de las aguas residuales industriales que, con la presión social y con el cuidado del medio ambiente, dio lugar a un creciente movimiento que ínsito a las industrias a reducir la cantidad de aguas residuales que producían y a tratarlas antes de su disposición final. Ahora se valora a las aguas residuales como un potencial recurso después de un buen tratamiento (Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas, 2017).

A nivel mundial, los datos y la información de los volúmenes de aguas residuales producidas por la industria textil son muy escasos, se dispone de parte de la información consolidada sobre países desarrollados. En la Unión Europea la generación de aguas residuales ha disminuido, por otra parte, los datos de algunos países indican que las aguas residuales industriales reciben tratamiento antes de su eliminación. En la tabla 1.4 se observa el total en millones de m³ de generación de aguas residuales de las industrias europeas en el año 2011 y en la tabla 1.5 indica el porcentaje de aguas residuales tratadas (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas, 2017).

Tabla 1.4 Generación de aguas residuales por tipo de industria 2011, (millones de m³).

País	Total de industrias	Minas y canteras	Sector manufacturero	Producción y distribución de electricidad	Construcción
Alemania	1,539.6	227.6	1,180.6	75.4	0.6
Austria	1,487.2	n/d	889.6	363.6	n/d
Bélgica	360.0	42.0	239.9	7.9	0.4
Bosnia y Herzegovina	9.5	n/d	9.5	n/d	n/d
Bulgaria	135.6	12.5	91.3	37.9	0.6
Chipre	1.9	n/d	1.9	0.0	n/d
Croacia	84.7	1.7	81.4	0.5	n/d
España	6,335.2	47.2	602.0	n/d	n/d
Ex República Yugoslavia	687.7	9.2	408.1	251.6	n/d
Finlandia	n/d	n/d	14.4	26.5	14.7
Hungría	154.3	17.8	129.7	3.9	0.0
Letonia	45.5	5.5	20.2	6.1	1.3
Lituania	40.4	0.6	33.9	2.6	0.7
Polonia	n/d	342.9	484.6	79.8	6.6
Rumania	n/d	47.3	n/d	n/d	n/d
Serbia	76.8	10.3	36.3	30.2	n/d
Eslovaquia	192.2	20.5	163.0	7.9	0.1
Eslovenia	n/d	0.1	42.8	n/d	0.1
Suecia	878.0	26.0	839.0	14.0	n/d
Turquía	528.7	41.9	460.8	26.1	n/d

Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas (2017).

Tabla 1.5 Descarga de aguas residuales industriales después del tratamiento (como % de total de descarga).

País	2007	2008	2009	2010	2011
Alemania	46.7	n/d	n/d	46.5	n/d
Bosnia y Herzegovina	0.0	56.0	62.5	65.4	58.5
Bulgaria	59.7	57.1	49.6	50.8	46.8
Croacia	0.0	17.0	16.8	25.7	8.5
Ex República Yugoslava de Macedonia	4.4	25.9	7.2	n/d	n/d
Lituania	0.0	73.5	72.5	60.4	51.8
Republica Checa	47.7	44.3	45.7	52.4	60.2
Rumania	0.0	12.7	9.7	14.1	5.6
Turquía	0.0	38.1	n/d	71.9	n/d

Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas (2017).

Antecedentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales

El manejo inadecuado de las aguas residuales tiene consecuencias en la salud pública y en los ecosistemas, la práctica de coleccionar y tratar las aguas residuales antes de su disposición es reciente. En las ruinas de las ciudades de Creta, Asiria y Roma se han encontrado restos de alcantarillas sanitarias, pero en esta última no se usaban para el transporte de aguas residuales (César, V. y Vázquez, 2001).

Con la aparición del cólera en forma epidémica e intensa en Europa, a mediados del Siglo XIX, y principalmente en Inglaterra, que tenía un comercio activo con India, obligó al parlamento a formar una Comisión Real que estudiara y construyera el sistema adecuado de alcantarillado en Londres. En París, al igual que en Londres, una epidemia de cólera obligó al diseño y construcción de un sistema adecuado de alcantarillado por el año de 1832 (César, V. y Vázquez, 2001).

La invención del inodoro en el siglo XIX cambio drásticamente las prácticas de disposición, no se podían manejar los volúmenes tan grandes de líquido que se incrementaban paulatinamente con el uso del inodoro. Como solución al problema, las ciudades comenzaron a usar los sistemas naturales de drenaje y los alcantarillados pluviales para conducir las aguas residuales (César, V. y Vázquez, 2001).

Se construyeron alcantarillados combinados en las grandes ciudades, durante la segunda mitad del Siglo XIX, y dado que los sistemas pluviales terminaban en cursos naturales del agua, los desechos humanos eran descargados directamente en corrientes, lagos, sin un tratamiento. Esto provocó una severa contaminación y problemas a la salud pública (César, V. y Vázquez, 2001).

A finales de del siglo XIX y principios del XX se probaron varios procesos de tratamiento; alrededor de 1920, el tratamiento de las aguas residuales llegó a los procesos que hoy se usan comúnmente. Sin embargo, el diseño de las plantas de tratamiento de aguas residuales se hizo empíricamente hasta mediados del siglo XX. A partir de 1960 se tuvieron avances importantes en el conocimiento del tratamiento de aguas residuales, y se formularon y cuantificaron los procesos que se usa actualmente (César, V. y Vázquez, 2001).

Plantas de tratamiento de aguas residuales en México

México tiene 2526 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación en todo el territorio nacional. En el año 2017 se trataron 135.6 m³/s de estas aguas, es decir el 63% de los 215.2 m³/s recolectados a través de los sistemas de alcantarillado. En la figura 1.2 se puede ver la distribución de las plantas de tratamiento (Comisión Nacional del Agua 2018).

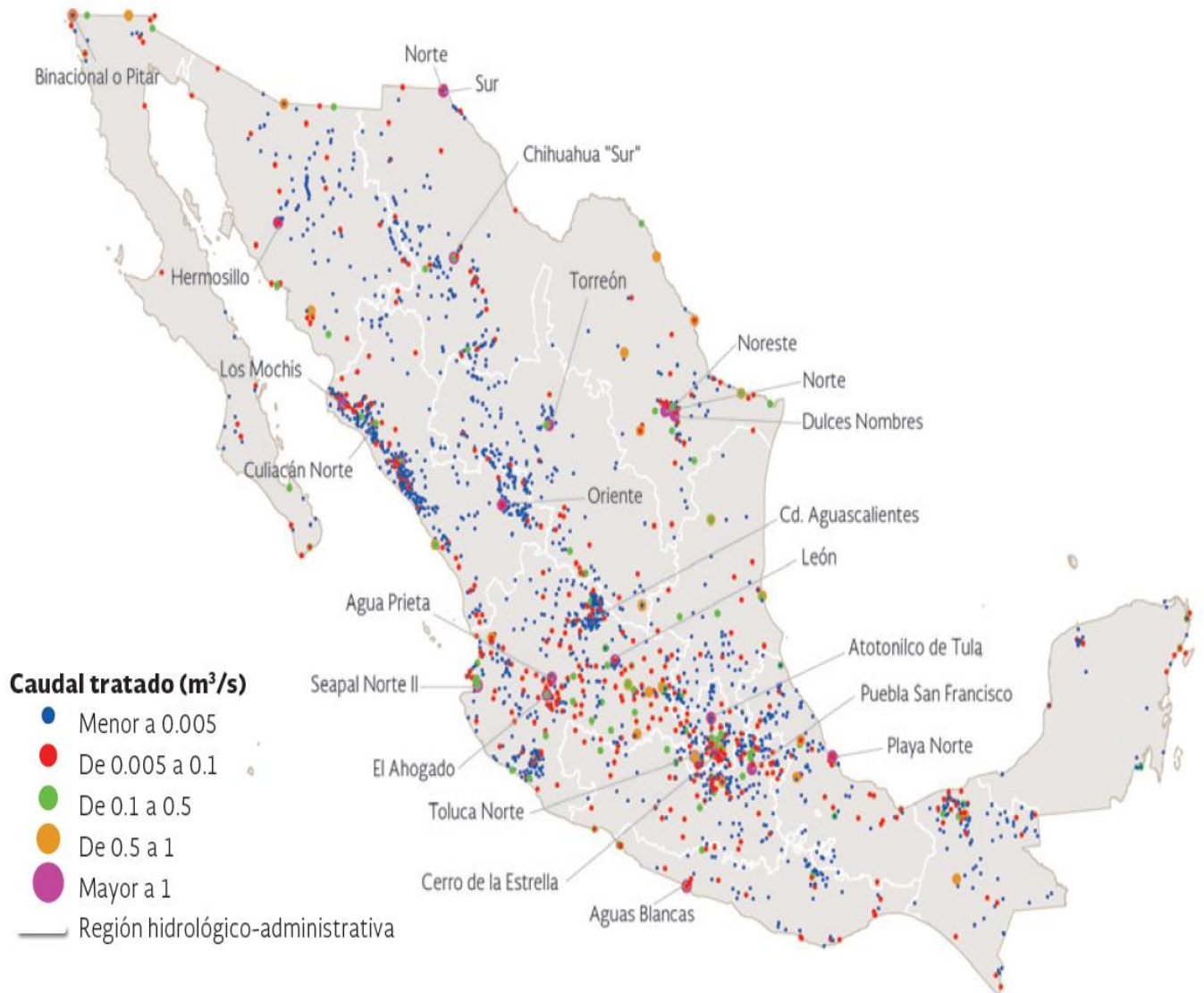


Figura 1.2 Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales 2017

Conagua (2017)

Plantas de tratamiento para las industrias en México

En el año 2017, la industria trató 83.7 m³/s de aguas residuales. En la tabla 1.6 se muestra los tipos de tratamiento que hay en México y en la tabla 1.7 el número de plantas que hay por entidad federativa.

Tabla 1.6 Tipos de tratamiento de las aguas residuales en México

Tipo de tratamiento	Propósito	Número de plantas	Gastos de operación (m ³ /s)	Porcentaje
Primario	Ajustar el pH y remover materiales orgánicos y/o inorgánicos en suspensión con tamaño igual o mayor a 0.1 mm.	951	23.60	28.2%
Secundario	Remover materiales orgánicos coloidales y disueltos.	1833	55.08	65.8%
Terciario	Remover material disuelto que incluye gases, sustancias orgánicas naturales y sintéticas, iones, bacterias y virus.	150	2.18	2.6%
No especificado		150	2.18	2.6%
	Total	3025	83.69	100.0%

CONAGUA. (2017b)

Tabla 1.7 Número de plantas en México por entidad federativa

Entidad federativa	Número de plantas en operación	Capacidad instalada (m ³ /s)	Caudal tratado (m ³ /s)
Aguascalientes	69	0.34	0.17
Baja california	118	13.05	13.03
Baja California sur	28	4.96	4.96
Campeche	191	4.06	4.06
Coahuila de zaragoza	64	0.81	0.55
Colima	15	0.46	0.29
Chiapas	121	1.98	1.65
Chihuahua	15	0.65	0.28
Ciudad de México	8	0.01	0.01
Durango	46	1.13	0.66
Guanajuato	129	0.91	0.65
Guerrero	7	0.02	0.02
Hidalgo	48	1.43	1.43
Jalisco	102	1.91	1.80
México	279	3.38	2.47
Michoacán de Ocampo	134	3.74	3.20
Morelos	104	1.18	1.14
Nayarit	18	0.81	0.81
Nuevo León	97	4.11	2.98
Oaxaca	23	3.39	3.07
Puebla	218	1.14	101
Querétaro	158	1.26	0.67
Quintana Roo	5	0.07	0.07
San Luis Potosí	60	0.97	0.59
Sinaloa	80	13.41	10.97
Sonora	233	6.69	6.46
Tabasco	149	1.52	1.37
Tamaulipas	105	8.61	9.20
Tlaxcala	64	0.36	0.26
Veracruz de Ignacio de la Llave	155	12.62	9.31
Yucatán	165	0.40	0.37
Zacatecas	16	0.19	0.17
Total	3025	95.61	83.69

CONAGUA. (2017 b)

Plantas de tratamiento de aguas residuales en la industria textil

La industria textil tiene procesos químicos, los cuales oxidan los colorantes presentes en su agua residual; el problema es que, con estos métodos, los subproductos que arroja resultan más tóxicos que las aguas residuales originales. Por otro lado, están los procesos biológicos que utilizan bacterias aerobias y anaerobias. Estos procesos tienen limitantes, donde uno de ellos es el tiempo, ya que es un proceso lento de días, lo que resulta en una planta de tamaño grande (Buitrón, 2015).

Plantas de tratamiento de aguas residuales para la remoción de metales pesados en la industria textil

Actualmente hay varios procedimientos para la remoción de metales pesados en diferentes industrias como son la de metales ferrosos, de extracción de minerales, fundición, metalurgia, aleaciones y aceros, gestión de residuos, galvanización, pinturas y pigmentos, electrónica y agricultura y ganadería. Pero en funcionamiento no hay ninguno.

1.3.1 Pretratamiento y tratamiento primario

La selección de los procesos de tratamiento de aguas residuales, o la serie de procesos de tratamiento, depende de un cierto número de factores entre los que se incluyen:

- a)** Características del agua residual: DBO, material en suspensión, pH, productos tóxicos, etc.
- b)** Calidad del efluente de salida requerido.
- c)** Costo y disponibilidad de terreno.
- d)** Consideración de las futuras ampliaciones, o la previsión de límites de calidad de vertido más estricto, que se necesiten en el diseño del tratamiento más sofisticado en el futuro.

Los pretratamientos de aguas residuales implican la reducción de sólidos en suspensión o el acondicionamiento de las aguas residuales para su descarga en los

receptores o para pasar a un tratamiento secundario a través de una neutralización u homogenización. Los tipos fundamentales de tratamientos primarios son (Ramalho, R.S. 1996):

Cribado

El pretratamiento con rejillas es uno de los procesos más antiguos, las rejillas remueven los contaminantes gruesos procedentes de la corriente para proteger de posibles daños la operación al equipo y unidades siguientes (CONAGUA, 2020).

El cribado se emplea para la reducción de sólidos en suspensión de tamaños distintos. La distancia a las aberturas de las rejillas depende de los objetos de éstas. Los materiales sólidos recogidos se clasifican en finos y gruesos. Las rejillas de finos tienen abertura de 5 mm o menos. Generalmente están fabricados de mallas metálicas de acero y se usan muchas veces en lugar de tanques de sedimentación. Sin embargo, aunque puede llegarse a eliminar entre el 5 y 25 % de sólidos en suspensión, de un 40 a un 60% se eliminan por sedimentación. Las rejillas o cribas de gruesos tienen abertura que pueden oscilar entre 4, 8 o 9 cm. Se usan como elementos de protección para evitar que sólidos de grandes dimensiones dañen las bombas y otros equipos mecánicos. A veces se utilizan trituradoras en lugar de las rejillas de gruesos. Estos elementos rompen o desgarran los sólidos en suspensión, que se eliminan por suspensión (Ramalho, R.S. 1996).

Sedimentación

La sedimentación se utiliza en los tratamientos de aguas residuales para separar sólidos en suspensión de éstas; la eliminación de las materias por sedimentación se basa en la diferencia de pesos específicos entre las partículas sólidas y el líquido donde se encuentran. En algunos casos, la sedimentación es el único tratamiento al que se somete el agua residual. La sedimentación puede producirse en una o varias etapas o en varios de los

puntos del proceso de tratamiento. En una planta típica de lodos activados, la sedimentación se utiliza en tres de las fases del tratamiento: 1) En los desarenadores la materia inorgánica (arenas) se elimina del agua residual; 2) En los clarificadores o sedimentadores primarios; 3) En los clarificadores o sedimentadores secundarios (Ramalho, R.S., 1996).

Tipos de sedimentación

1) Sedimentación discreta.

Las partículas que se depositan mantienen su individualidad, no se someten a un proceso de coalescencia con otras partículas. En este caso, las físicas de la partícula (tamaño, forma, peso específico) no cambian durante el proceso.

2) Sedimentación con floculación.

La aglomeración de las partículas va acompañada de cambios en la densidad y en la velocidad de sedimentación o precipitación. La sedimentación que se lleve a cabo en los clarificadores o sedimentadores primarios es un ejemplo de este proceso.

3) Sedimentación por zonas.

Las partículas forman una especie de manta que sedimenta como una masa total presentando una interfase distinta con la fase líquida (Ramalho, R.S. 1996).

Flotación

La flotación es un proceso para separar sólidos de baja densidad o partículas líquidas de una fase líquida. La separación se lleva a cabo introduciendo un gas (normalmente aire) en la fase líquida, en forma de burbujas. La fase líquida se somete a un proceso de presurización para alcanzar una presión de funcionamiento que oscila entre 2 y 4 atm., en presencia del suficiente aire para conseguir la saturación en aire del agua. Luego, este líquido saturado de aire se somete a un proceso de despresurización llevándolo hasta la presión atmosférica por paso a través

de una válvula reductora de presión. En esta situación, y debido a la despresurización se forman pequeñas burbujas de aire que se desprenden de la solución. Los sólidos en suspensión o las partículas líquidas (aceites o petróleo) flotan, debido a que estas pequeñas burbujas, asociándose a los mismos, les obligan a elevarse hacia la superficie. Los sólidos en suspensión concentrados pueden separarse de la superficie por sistemas mecánicos (Ramalho, R.S. 1996).

Para la industria petrolera la tecnología convencional de los sistemas de flotación para la separación de aceites y sólidos en suspensión en aguas fueron desarrolladas originalmente por la industria del petróleo. Para tratar las aguas residuales de la industria del petróleo se emplean tres tipos de separadores (López, R, 1996):

- API (American Petroleum Institute).
- PPI (Paralele Plate Interceptor).
- CPI (Corrugated Plate Interceptor).

API

La función principal de los separadores API es separar los aceites de agua residual, pero como no es capaz de separar sustancias solubles, nunca debe emplearse en dichas funciones. Sin embargo, lo mismo que en cualquier otro equipo de sedimentación, a la vez que el aceite se separa, se decantan los sólidos en suspensión. El diseño de los separadores se basa en la velocidad ascensional de partículas esféricas de aceite de un diámetro de 0.015 cm (López, R, 1996).

PPI

En los separadores PPI las mejoras corresponden a la incorporación de placas paralelas inclinadas en los canales de un

separador API convencional. De esta manera se consigue la separación de partículas de aceite menores de 150 μm , un rendimiento mayor, menos espacio y un costo menor que en el caso de un separador API (López, R, 1996).

CPI

El separador CPI representa un perfeccionamiento del PPI, emplea placas corrugadas con una inclinación de 45° con respecto a la horizontal en la dirección del flujo de aguas residuales. Además de las ventajas del PPI, el CPI resulta más económico que el primero y los rendimientos en la separación de aceite son mayores (López, R, 1996).

Neutralización y homogenización.

El tratamiento de neutralización se utiliza en los siguientes casos:

- 1) Antes de la descarga de aguas residuales en un medio receptor. La justificación para la neutralización es que la vida acuática es muy sensible a variaciones en el pH fuera de intervalos cercano a $\text{pH}=7$.
- 2) Antes de la descarga de aguas residuales industriales al alcantarillado municipal. La especificación del pH de las descargas industriales en las alcantarillas se hace de forma frecuente. Es más económico hacer una neutralización de las corrientes de aguas residuales industriales antes de descargar en el alcantarillado municipal, que intentar hacer una neutralización de los mayores volúmenes de las aguas residuales mixtas combinadas, domésticas e industriales.
- 3) Antes del tratamiento químico o biológico. Para los tratamientos biológicos, el pH del sistema se mantiene en un intervalo comprendido entre 6.5 y 8.5 para asegurar una actividad biológica óptima. El proceso biológico en sí mismo puede conseguir una neutralización. El grado de preneutralización requerido para el tratamiento biológico depende de dos factores:

- 1- La alcalinidad o acidez presente en el agua residual.
- 2- Los mg/L de DBO que deben eliminarse en el tratamiento biológico (Ramalho, R.S. 1996).

Los métodos para la neutralización de aguas residuales incluyen

- 1) Homogenización
- 2) Métodos de control de pH (Ramalho, R.S. 1996).

Tanque de igualación.

Las variaciones horarias del gasto de aguas residuales pueden tener un efecto adverso en el funcionamiento de los procesos de la planta, el cambio consiste en la cantidad y concentración del agua residual al ser tratada. Propicia que la operación eficiente de los procesos sea difícil. Además, muchas unidades de tratamiento tendrían que diseñarse para las condiciones de gasto máximo extraordinario, provocando su sobredimensionamiento para las condiciones promedio. Para prevenir esta situación, es conveniente considerar en el proyecto la construcción de un tanque de igualación u homogenización, cuya función es amortiguar las variaciones de las descargas de aguas residuales con el fin de tratar un gasto uniforme. La igualación se puede usar también para amortiguar las variaciones en el pH y en la concentración de constituyentes tóxicos presentes en el agua residual a tratar. La igualación del gasto no es un proceso de tratamiento per se, pero puede mejorar significativamente el funcionamiento de una planta existente e incrementar su capacidad útil. La igualación del gasto puede reducir el tamaño y el costo de las unidades de tratamiento (César, V. y Vázquez, 2001).

1.3.2 Tratamiento secundario

EL tratamiento secundario es el proceso complementario de la depuración de las aguas residuales, consistente en una serie de operaciones y procesos químicos o biológicos al que son sometidos los efluentes del tratamiento primario, ya que los efluentes de tal tratamiento contienen aún sólidos suspendidos finos, sedimentables, coloidales y solubles, los cuales deben ser separados para obtener

un agua apropiada para otro uso o para su disposición final en cuerpos receptores (López, R, 1996).

El tratamiento secundario agrupa procesos y operaciones unitarias, capaces de eliminar los sólidos que aún contienen los efluentes primarios. Los procesos utilizados en el tren de tratamiento secundario se clasifican en fisicoquímicos y biológicos, justo como se muestra en la tabla 1.8 (López, R, 1996).

Tabla 1.8 Procesos y sistemas para el tratamiento secundario

Tratamiento fisicoquímico	Precipitación química	
	Coagulación química	
	Floculación	
Tratamiento biológico	Sistemas aerobios	
	Microorganismos en suspensión	Lodos activados
		Lagunas aireadas
		Zanjas de oxidación
	Microorganismos adheridos a un medio fijo	Filtros rociadores
		Biodiscos
	Combinación	Medio granular fluidizado
		Torre de madera resistente
		Lodos activados con medio fijo
	Sistemas anaerobios	
	Microorganismos en suspensión	Tratamiento con contacto anaerobio
		Lecho fluidizado
	Microorganismo adherido a un medio	Filtro anaerobio
Combinación	Medio granular fluidizado	

López, R, (1996).

Tratamiento fisicoquímico

Los procesos fisicoquímicos se enfocan en el tratamiento de sustancias contaminantes específicas, como son los metales, fosfatos, nitrógeno y productos orgánicos sintéticos. Estos procesos pueden servir para favorecer la sedimentación de la materia en suspensión, pero son especialmente útiles para eliminar la materia coloidal y los sólidos orgánicos disueltos, los cuales sin reactivos químicos jamás sedimentarían; estas sustancias son muchas veces responsables de la turbidez, color y DBO de las aguas residuales. Los procesos fisicoquímicos son en general más costosos que los procesos biológicos, sin embargo las limitaciones de los procesos biológicos para tratar residuos tóxicos como metales y sustancias orgánicas sintéticas ha hecho que los procesos fisicoquímicos sean adaptados para cargas industriales de características agresivas a los procesos biológicos (López, R, 1996).

Tratamientos biológicos

El tratamiento biológico de las aguas residuales tiene como finalidad remover, mediante la coagulación, la materia orgánica en estado coloidal y disuelta, la cual no fue removida con el tratamiento primario, y además estabilizar la materia orgánica. El tratamiento biológico se lleva a cabo por la transferencia de la materia orgánica hacia la película o flóculo también llamado "FLOC" (biomasa), por contacto interfacial, adsorción y absorción asociadas. La materia orgánica es utilizada por los microorganismos para su metabolismo y generación de células nuevas, las cuáles mueren, deslavándose y precipitándose al fondo. En estos sistemas se tienen complejas poblaciones de microorganismos mezclados e interrelacionados, en los que cada uno de ellos tiene su propia curva de crecimiento, lo cual depende de las condiciones del sistema, pH, temperatura, aeración o anaerobiosis y disposición de nutrientes (López, R, 1996).

La eficiencia de los procesos biológicos depende de las características de las aguas residuales, condiciones ambientales del sistema y tipo de microorganismo. Es importante conocer si el agua residual a tratar por medios biológicos contiene

compuestos químicos tóxicos que pueden ser inhibitorios para el crecimiento de los microorganismos, en tal caso se podría hacer un pretratamiento para su eliminación. En condiciones aerobias, los microorganismos utilizan el oxígeno en sus procesos vitales (metabolismo y reproducción), en cambio en ausencia de oxígeno como aceptores de electrones (López, R, 1996).

Los procesos biológicos para el tratamiento de las aguas residuales constan de equipos que ponen en contacto la materia orgánica con los microorganismos adecuados, durante el tiempo suficiente para llevar a cabo su oxidación, bajo condiciones aerobias o anaerobias. Los principales microorganismos responsables de remover grandes cantidades de materia orgánica en los procesos biológicos aerobios son las bacterias, en su mayoría aerobias y facultativas heterótrofas. Pruebas realizadas sobre un número diferente de bacterias indican que están constituidas por, aproximadamente 80 % de agua y 20 % de material seco, del cual 90 % es orgánico y 10% es inorgánico. Una fórmula aceptada para la materia orgánica es $C_5H_7O_2N$, del cual es 53% de peso seco es carbono (López, R, 1996).

Coagulación

Se considera como coagulación al proceso de desestabilización de las partículas en estados de suspensión y coloidal. Este proceso tiene dos etapas: la primera es la adición de uno o más productos químicos (coagulantes) para hacer inestables las partículas coloidales. La segunda consiste en la conglomeración de estas partículas desestabilizadas al entrar al contacto unas con otras. La coagulación es empleada para la remoción de materiales de suspensión presentes en forma de coloides. Los coloides están presentes como partículas sobre un rango de 1nm (1×10^{-7} cm) o 0.1 nm (1×10^{-8} cm). Los coloides presentes en las aguas pueden ser hidrofóbicos o hidrofílicos. Los coloides hidrofóbicos no poseen afinidad en los medios líquidos y carecen de estabilidad en presencia de electrolitos, estos son realmente susceptibles a la coagulación. Los coloidales hidrofílicos son semejantes a las proteínas, exhiben una afinidad disfrazada para el agua, la absorción de retardantes de floculación es especialmente requerida en los tratamientos para llevar a cabo una efectiva coagulación. La estabilidad de un

coloide se debe principalmente a las fuerzas de repulsión electrostática y, en caso de coloides hidrofílicos se debe a una capa de solución de agua que retarda la coagulación (Cerecedo, L. 2013).

Coagulación-Floculación

Se llama coagulación-floculación al proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas con un peso específico superior a las de agua llamadas flóculos. Dicho proceso se usa para:

- Remoción de la turbiedad orgánica o inorgánica que no pueda sedimentar rápidamente.
- Remoción del color verdadero y aparente.
- Eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles a ser separados por coagulación.
- Destrucción de algas o plancton en general.
- Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos (Cerecedo, L. 2013).

Hay que distinguir dos aspectos fundamentales en la coagulación-floculación del agua:

1. La desestabilización de las partículas suspendidas, la remoción de las fuerzas que las mantienen separadas.
2. El transporte de ellas dentro del líquido para que hagan contacto, generalmente estableciendo puentes entre sí y formando una malla tridimensional de coágulos porosos (Cerecedo, L. 2013).

La coagulación empieza en el primer instante en que se agregan los coagulantes al agua y dura solamente fracciones de segundo. Básicamente consiste una serie de reacciones físicas y químicas entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma. La floculación es el fenómeno por el cual las partículas, ya desestabilizadas, chocan unas con otras para formar coágulos mayores. Tres mecanismos pueden actuar en el primer

fenómeno: el de adsorción-desestabilización basado en las fuerzas electroestáticas de atracción y repulsión, el de puente químico que establece una relación de dependencia entre las fuerzas químicas y la superficie de los coloidales, y el de sobresaturación de la concentración de coagulantes en el agua. En el segundo aspecto debe distinguirse entre: floculación ortocinética y pericinética, o en escala de turbulencia por encima o por debajo de la microescala de Kolmogorov η . La primera es inducida por la energía comunicada al líquido por las fuerzas externas. La segunda es promovida, internamente dentro del líquido; por el movimiento de agitación que las partículas tienen dentro de aquel (movimiento browniano), y se realiza en un tiempo muy corto después de desestabilizada la partícula hasta que este tiene un tamaño que se acerca a la escala de Kolmogorov (Cerecedo, L. 2013).

Coagulantes

Los coagulantes se pueden clasificar en dos grupos: los polielectrolitos o ayudantes de coagulación y los coagulantes metálicos. Ambos grupos básicamente actúan como polímeros además de la carga eléctrica que poseen. En los polímeros, las cadenas poliméricas están ya formadas cuando se les agrega al agua. En segundos, la polimerización se inicia cuando se pone el coagulante en el agua, después de lo cual viene la etapa de adsorción por coloidales presentes en la fase acuosa (Cerecedo, L. 2013).

Coagulantes y floculantes poliméricos (polielectrolitos)

Un polímero puede definirse como una sustancia formada por una cantidad de unidades básicas, llamadas monómeras, unidas por enlaces covalentes que se repiten sucesivamente. Su grado de polimerización está dado por el número de monómeros que conforman su cadena polimérica. El tipo de polímero que se forma depende de la naturaleza de los grupos funcionales que lo integran. Todos los monómeros capaces de formar polímeros deben tener por lo menos dos núcleos activos para que la macromolécula formada puede conservar su configuración inicial. Los que se usan en plantas de tratamiento son compuestos de alto peso

molecular (1×10^4 a 1×10^7) que se aplican en muy pequeñas concentraciones (0.01 a 1.0 mg/l) (Cerecedo, L. 2013).

Los polielectrolitos en el tratamiento de aguas residuales pueden clasificarse de acuerdo con su origen o su carga (Cerecedo, L. 2013).

Según su origen

Polímeros naturales: son aquellos que se producen en las reacciones bioquímicas naturales de animales y plantas, tales como proteínas, carbohidratos y polisacáridos. Muchos de estos componentes tienen propiedades coagulantes o floculantes (Cerecedo, L. 2013).

Polímeros sintéticos: son compuestos orgánicos producidos por medios de transformación química derivados del carbón y del petróleo (Cerecedo, L. 2013).

Según su carga

Un polímero puede tener o no carga eléctrica, pueden ser catiónicos (carga positiva) o aniónicos (carga negativa) y, debido a la multiplicidad de los grupos iónicos presentes en las cadenas poliméricas, reciben en nombre de polielectrolitos (Cerecedo, L. 2013).

Coagulantes metálicos

Existe una gran variedad de coagulantes metálicos que se pueden clasificar en tres tipos

- Sales de aluminio
- Sales de hierro
- Compuestos varios (Cerecedo, L. 2013).

Coagulación con sales minerales

Las sales de aluminio forman un flóculo ligeramente pesado. Los más conocidos son el sulfato de aluminio, sulfato de aluminio amoniacal y el cloruro de polialuminio (Cerecedo, L. 2013).

Coagulación con sales de hierro

Las sales de hierro tienen ventajas sobre las sales de aluminio, en algunos casos, porque forman un flóculo más pesado y de mayor velocidad de asentamiento y porque pueden trabajar con un rango de pH más amplio (Cerecedo, L. 2013).

Floculación

Los productos hidrolizados formados por coagulantes metálicos presentan una sedimentación lenta. En estos casos, la adición de los polielectrolitos, aumentan la eficiencia de sedimentación notablemente. La floculación por medio de sustancias químicas (polielectrolitos) aumenta el contacto entre las partículas finas en la coagulación, para formar flóculos, los cuales sedimentan fácilmente. La floculación es favorecida por la agitación moderada del agua residual, por medio de paletas de baja velocidad, si la agitación es muy rápida, los flóculos se rompen, por tal motivo, se debe controlar la velocidad dentro de un rango en el que se puedan formar los flóculos para que sedimenten. Los compuestos utilizados para la floculación son polielectrolitos de origen natural o sintético. El funcionamiento de un polielectrolito se especifica dependiendo del tamaño, densidad y carga de las partículas a flocular (Cortina, C. Marqués, R. 2008).

Tipos de floculación

Floculación natural

En este tipo de floculación actúan los procesos naturales de sedimentación, provocados por la agregación de partículas suspendidas para formar flóculos capaces de precipitarse a causa de su volumen y aumento de

masa. Este tipo de floculación requiere un tiempo de retención muy grande, ya que no se controla el movimiento browniano y el tiempo de sedimentación (Cortina, C. Marqués, R. 2008).

Floculación inducida

En la floculación inducida u ortocinética se proporcionan las colisiones de las partículas, por medios mecánicos o hidráulicos, para acelerar y controlar el proceso de sedimentación (Cortina, C. Marqués, R. 2008).

Se usa la agitación para acelerar la agregación de partículas coloidales. Las partículas se mueven en el sentido de la rotación del agua debido a diferencias en sus pesos y viajan a diferentes velocidades, lo que promueve una colisión entre ellas y por consiguiente un aumento en su tamaño (Cortina, C. Marqués, R. 2008).

La agitación en los floculadores se produce por medios hidráulicos o mecánicos.

1. La floculación hidráulica es el método más simple que se emplea para generar gradientes de velocidad y oír disipación de energía en el fluido, mediante baffles o deflectores instalados en la trayectoria del fluido de alimentación al tanque de sedimentación.
2. La floculación mecánica se basa en la disponibilidad de agitadores mecánicos que ofrecen una mayor versatilidad en el diseño y operación de los equipos (Cortina, C. Marqués, R. 2008).

Tipos de floculantes

Los floculantes pueden ser de origen natural o sintético, orgánicos e inorgánicos (Cortina, C. Marqués, R. 2008).

Floculantes inorgánicos naturales

Bentonita

Las arcillas del tipo de la bentonita son floculantes naturales, se utilizan con la combinación de coagulantes del tipo hidróxidos metálicos.

Sílice activado

Es un polisilicato cargado negativamente, que se prepara mediante la neutralización de parcial a un pH de 6 a 7, de una solución concentrada de silicato de sodio. Esta se diluye subsecuentemente y debe ser empleada cuando esta recientemente preparada.

Floculantes sintéticos orgánicos

Los floculantes sintéticos orgánicos son polímeros con cadenas ramificadas o lineales, se caracterizan por el número de subunidades o por su peso atómico. Las dosis que se emplean por lo general son pequeñas de 1 mg/l.

1.3.3 Tratamiento secundario: Lodos activados

El proceso de lodos activados es un sistema de cultivo suspendido desarrollado en Inglaterra por Arden y Lockett en 1914 (César Valdez, E. y Vásquez González, A. 2001).

La expresión tratamiento secundario se refiere a todos los procesos de tratamiento biológico de las aguas residuales tanto aerobios como anaerobios. El proceso de los lodos activados ha sido utilizado para el tratamiento de las aguas residuales industriales como urbanas. El diseño de las plantas de lodos activados se empezó de una forma empírica, en los años sesenta se desarrolló una solución racional para el sistema de lodos activados. Si cualquier agua residual, urbana o industrial, se somete a aeración durante un período de tiempo se reduce su contenido de materia orgánica, formándose a la vez un lodo floculante (Ramalho, R.S. 1996).

Los procesos de lodos activados se utilizan tanto para tratamiento secundario como tratamiento completo de las aguas residuales sin sedimentación primaria. En este proceso los desechos líquidos son alimentados continuamente a un tanque aereador (rector) en el que se encuentra el cultivo de los microorganismos (lodos activados), en su mayoría bacterias en suspensión, las cuales en su conjunto se les conoce como “licor mezclado”, siendo los que metabolizan y flocculan biológicamente los compuestos orgánicos. El medio ambiente aerobio, así como la mezcla del sustrato y microorganismos se mantiene mediante el uso de aireación mecánica o inyección de aire mediante sopladores. Después de un determinado tiempo de retención el “licor mezclado” pasa a un tanque de sedimentación, donde se lleva a cabo la separación de microorganismos en forma de flóculos del agua, la cual sale por la parte superior del tanque. Una parte de la biomasa sedimentada es retornada al tanque de aireación para mantener una concentración deseada de sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado y la otra es retirada del sistema como lodo de desecho (López, R, 1996).

El lodo residual es un subproducto del tratamiento de las aguas residuales. Este generalmente contiene de un 93% a un 95% de agua, así como sólidos y sustancias disueltas que están presentes en el agua residual. Las características del lodo dependen, tanto de la composición inicial del agua residual, como de los sistemas usados para el tratamiento del agua residual y el lodo. Las características del lodo afectan la viabilidad para las opciones de su uso y disposición. Dependiendo del lugar donde se generan los lodos dentro de la planta de tratamiento se pueden clasificar en primarios, secundarios y terciarios:

- **Lodos primarios:** son lodos generados durante el tratamiento primario del agua residual que remueve sólidos que se sedimentan fácilmente. El lodo primario contiene de 3% a 7% de sólidos; generalmente este contenido de agua puede ser reducido por deshidratación o desaguado. Este tratamiento es esencialmente de tipo físico.

- **Lodos secundarios:** también llamados “lodo biológicamente procesado” es generado por un tratamiento biológico. En este tratamiento los microorganismos degradan el contenido de materia orgánica que se encuentra en suspensión o disuelta en el agua. Este proceso incluye los sistemas de lodos activados y sistemas de película fija como los filtros percoladores y biodiscos.
- **Lodos terciarios:** Es producido por sistemas avanzados de tratamiento, tales como precipitación química o filtración. Las características del lodo terciario dependen de los procesos de tratamientos anteriores. Los lodos químicos resultan de procesos de tratamiento con químicos, tales como cal, polímeros orgánicos y sales de hierro y aluminio (López, R, 1996).

Este lodo está formado por una población heterogénea de microorganismos, que cambian continuamente en función de las variaciones de la composición de las aguas residuales y de las condiciones ambientales. Los microorganismos presentes son bacterias (unicelulares, hongos, algas, protozoos y rotíferos). De estos, las más importantes son las bacterias, encontrándose en todos los tipos de procesos de tratamiento biológico. El proceso de lodos activados se ha desarrollado como una operación continua mediante el reciclado de lodos biológicos. Las corrientes están caracterizadas por 3 tipos de concentraciones (Ramalho, R.S. 1996):

1) Concentración de la DBO soluble.

La DBO soluble está formada principalmente por compuestos carbonosos en disolución. Las plantas de lodos activados se basan en el consumo de la DBO soluble. Este consumo es el resultado de los procesos de oxidación biológica que se presenta en el reactor. Por otra parte, la DBO insoluble se separa mediante sedimentación en los clarificadores primarios y secundarios (Ramalho, R.S. 1996).

2) Concentraciones de los sólidos volátiles en suspensión (VSS).

Los sólidos volátiles en suspensión corresponden a los lodos biológicos, constituidos por una población heterogénea de microorganismos. La

determinación experimental de los VSS se lleva a cabo midiendo la pérdida de peso de los sólidos totales en suspensión después de incineración en una estufa de laboratorio a 600° C. Esta pérdida de peso corresponde principalmente a la volatilización del lodo biológico. Los sólidos remanentes después de la incineración a 600° C corresponden a los sólidos en suspensión no volátiles (Ramalho, R.S. 1996).

3) Concentración de sólidos no volátiles en suspensión (CSNVS)

Sólidos en suspensión totales

= *sólidos volátiles en suspensión*

+ *sólidos no volátiles en suspensión*

Modelos matemáticos del proceso de lodos activados.

El proceso de lodos activados se determina usando modelos matemáticos a partir de datos experimentales empleando una serie de reactores de laboratorio. Las relaciones correspondientes al desarrollo de estos modelos matemáticos caen dentro de tres grupos (Ramalho, R.S. 1996):

- 1- Relación cinética.
- 2- Balance de materia para la determinación del consumo de oxígeno y la producción neta de lodos biológicos.
- 3- Ecuación para calcular las condiciones óptimas de sedimentación del lodo.

1.3.4 Tratamiento secundario: Otros procesos aerobios y anaerobios

1) Aireación prologada o proceso de oxidación total

Este proceso, al que se conoce también como oxidación total, es una modificación del proceso de lodos activos. La idea fundamental de la aireación prolongada, al compararla con el proceso convencional de lodos activados, es disminuir la cantidad de lodo residual. Esto se consigue aumentando el tiempo de residencia; de esta forma el volumen del reactor

es comparativamente mayor que el requerido en el proceso convencional de lodos activados. Como consecuencia de todo ello, esencialmente todo el lodo degradable formado se consume mediante respiración endógena (Ramalho, R.S. 1996).

2) *Contacto-estabilización*

El proceso de contacto-estabilización es otra modificación de los lodos activados. El agua residual afluyente se mezcla con lodo estabilizado y esta mezcla se somete a aireación en el tanque de contacto inicial para el cual el tiempo de retención es solamente de 20 a 40 minutos. Durante el contacto inicial se separa una fracción apreciable de demanda biológica de oxígeno, en suspensión y disuelta, mediante bio-absorción, después de estar en contacto con el lodo activo suficientemente aireado. El efluente clarificado y la descarga del clarificador se lleva a un tanque de estabilización en donde es aireada durante un periodo de 1.5 a 5 horas. Durante este periodo de estabilización los productos orgánicos en adsorción se rompen mediante degradación aerobia. El lodo estabilizado que abandona el tanque de estabilización lo hace en condición de inanición y dispuesto por lo tanto a adsorber residuos orgánicos (Ramalho, R.S. 1996).

3) *Lagunas aireadas*

Las lagunas aireadas son balsas con profundidad de 1 a 4 metros en las que la oxigenación de las aguas residuales se realiza mediante unidades de aireación bien sean superficiales, turbinas o difusores. La diferencia fundamental entre lagunas aireadas y el sistema de lodos activados es que en este lleva a cabo la recirculación del lodo como forma de controlar la cantidad de lodo biológico en el reactor de aireación. Las lagunas aireadas son sistemas sin reciclado de lodos. La concentración de sólidos en las lagunas está en función de las características de agua residual y del tiempo de residencia. Dicha concentración está comprendida entre 80

y 200 mg/l, esto es mucho menor que la que se utiliza en las unidades de lodos activados convencionales orgánicos (Ramalho, R.S. 1996).

4) **Balsas de estabilización de aguas residuales**

El oxígeno necesario en las balsas se obtiene de la superficie natural de aireación y en las algas que producen por fotosíntesis. El oxígeno liberado por la fotosíntesis de las algas lo utilizan por las bacterias para la degradación aerobia de la materia orgánica. Los productos de esta degradación (CO_2 , amoníaco, fosfatos) son utilizados de nuevo por las algas. En la figura 1.3 se observa la interacción de algas y bacterias (Ramalho, R.S. 1996).

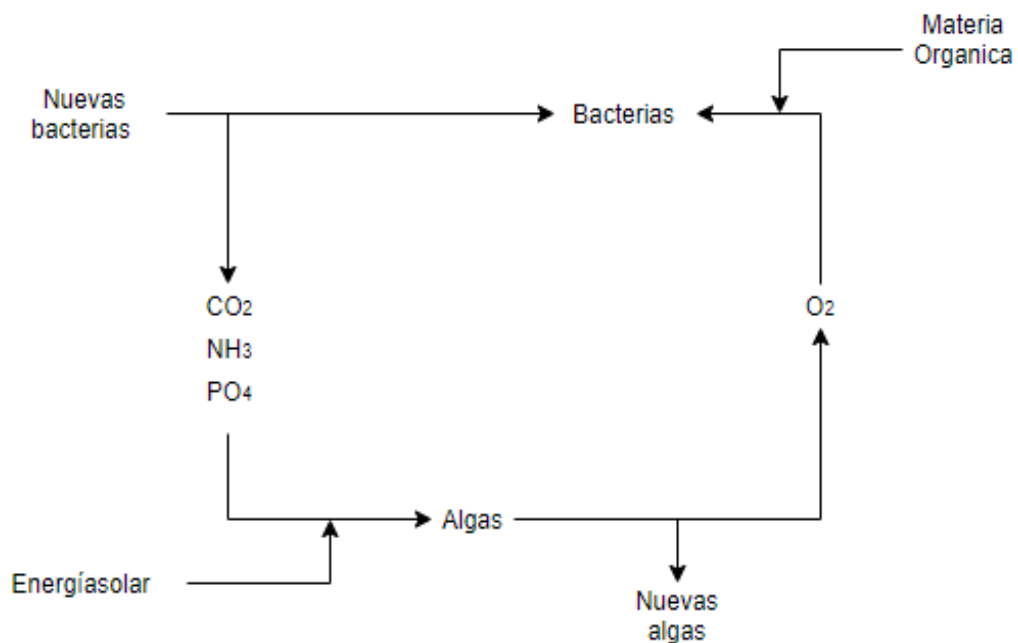


Figura 1.3 Relación entre algas y bacterias

Ramalho, R.S. (1996)

El mecanismo representado en la figura 1.3 explica las variaciones diurnas del nivel de oxígeno disuelto y del pH que se presenta en las balsas de estabilización de aguas residuales. Durante la noche no hay

producción de oxígeno, aunque las algas y bacterias lo utilizan, lo que da lugar a una disminución del oxígeno disuelto. Así mismo, en la noche se libera dióxido de carbono haciendo disminuir el pH. Durante el día el amoníaco resultante de la degradación de los compuestos orgánicos nitrogenados contribuye al aumento del pH. En consecuencia, las balsas de estabilización de aguas residuales pueden ser ácidas en la noche y básicas durante el día. Las balsas de estabilización de aguas residuales son factibles cuando se dispone de grandes superficies de terreno a bajo costo y cuando la calidad del oxígeno es superior a la que se puede cubrir mediante fotosíntesis y aireación superficial natural (Ramalho, R.S. 1996).

5) *Filtros percoladores*

Todos los reactores biológicos aerobios, descritos anteriormente mencionan la presencia de un crecimiento biológico que se mantiene en suspensión dentro del reactor. Por esto se denominan reactores de crecimiento biológico en suspensión. Se ha desarrollado otro tipo de reactor en el que se utiliza algún tipo de soporte del crecimiento biológico que se mantiene fijo en él. Estos reactores se denominan reactores de crecimiento biológico asistido. Los filtros percoladores pertenecen a este tipo de reactores de crecimiento asistido. El filtro percolador es un relleno cubierto de limo biológico a través del cual se percola el agua residual. Normalmente el agua residual se distribuye en forma de pulverización uniforme sobre el lecho de relleno mediante un distribuidor rotativo de flujo. El agua residual percola en forma descendente a través del relleno y el efluente se recoge en el fondo (Ramalho, R.S. 1996).

6) *Biodiscos*

Los biodiscos son sistemas que fueron desarrollados para obtener el tratamiento biológico aerobio de las aguas residuales, donde la biomasa se presenta simultáneamente en la forma de crecimiento asistido (como

en el caso de los filtros percoladores) y de crecimiento en suspensión (como en el caso de los lodos activos). En la figura 1.4 se presenta un diagrama de una unidad típica de tres etapas (Ramalho, R.S. 1996).

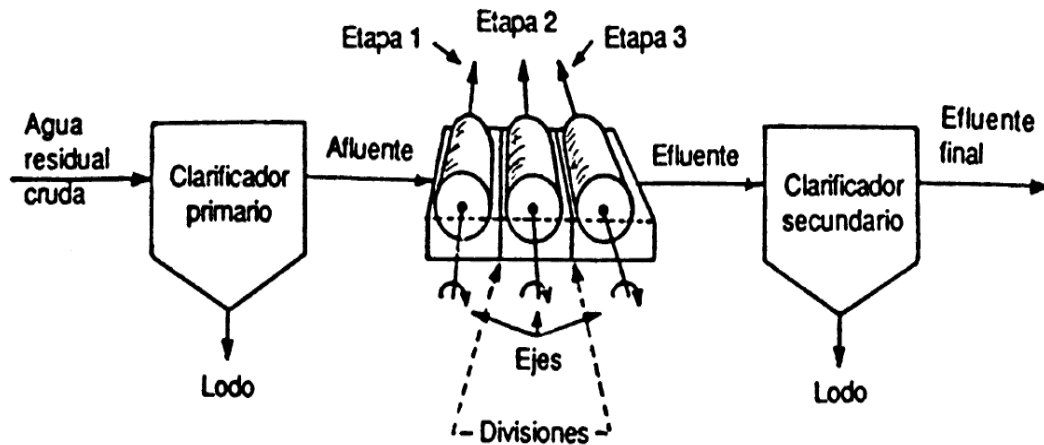


Figura 1.5 Esquema de una unidad de Biodiscos típica

Ramalho, R.S. (1996)

Cada etapa está formada por una serie de discos no muy separados, normalmente fabricados de poliestireno o polietileno, con diámetros comprendidos entre 3-4 m. Estos discos se mantienen paralelos entre sí y unidos a un eje horizontal que pasa a través de sus centros. Los ejes tienen longitudes de 7.5 m aproximadamente, pudiendo alojar de esta forma un gran número de discos. Estas unidades se disponen en tanques divididos por paredes tal como se muestra en la figura 1.4. La alimentación de las aguas residuales pasa a través de estos tanques en serie de forma tal que los ejes se mantienen ligeramente por encima de la superficie del líquido. Esto significa que la superficie de los discos está sumergida aproximadamente, el 40 % en todo momento. Los ejes giran continuamente a una velocidad de 1 y 2 rpm. Se forma gradualmente un limo biológico de 1 a 3 mm de espesor que comienza a depositarse en la superficie de los discos (Ramalho, R.S. 1996).

Parte del crecimiento de limos se separa de los discos, además del que se pierde por arrastre de la materia, debido al mecanismo descrito para el caso de los filtros percoladores. Debido a que la acción rotativa de los discos provoca cierta turbulencia en el depósito de líquidos, existiría en todo momento una concentración limitada de biomasa en suspensión. En consecuencia, la disminución de la DBO en los biodiscos se presenta simultáneamente mediante un mecanismo similar al del filtro percolador, por la presencia del limo formado junto al disco, así como también mediante un mecanismo análogo al de los lodos activos, por la presencia de biomasa en suspensión (Ramalho, R.S. 1996).

Debido a que los tiempos de residencia hidráulica son bajos, normalmente menos de una hora, y con ello la concentración de biomasa en suspensión es relativamente pequeña, la mayoría de la DBO que se separa en los biodiscos se debe al mecanismo correspondiente al limo formado en los discos. El efluente de la última etapa de los biodiscos fluye a un clasificador secundario; normalmente los sistemas de biodiscos se proyectan para un valor total de la DBO, del efluente de la última etapa del orden de 10-25 mg/l del cual la 1/3 parte es soluble y aproximadamente las 2/3 partes resultan insolubles. Con mucha frecuencia los discos están formados de placas alternadas planas y corrugadas de poliestireno o polietileno; esta disposición suministra un área superficial mayor para el caso de discos con superficies planas únicamente. Para el caso de un juego de discos de 3.6 m de diámetro montado sobre un eje de 7.5 m puede lograrse un área superficial total superior a los 9000m², ya que esta superficie es muy grande, resultan adecuados periodos de residencia cortos, normalmente de menos de 1 hora (Ramalho, R.S. 1996).

Algunas de las ventajas de los sistemas de biodiscos sobre el proceso convencional de lodos activos son:

- 1- Bajo consumo de energía y mantenimiento más sencillo.

- 2- Ya que es posible tener en cada etapa un cultivo biológico diferente se cuenta con un grado adicional de flexibilidad en el proceso.
- 3- La biomasa presente en general tiene buenas características de sedimentación, con lo que se disminuye el costo de la clarificación secundaria.
- 4- No se necesita reciclado de la biomasa.

En las desventajas se presenta una pequeña película líquida de gran superficie sobre la zona húmeda de los discos expuesta al aire ambiental, lo que lleva al peligro de congelación en el caso de operar en sitios fríos (Ramalho, R.S. 1996).

7) *Tratamiento anaerobio de las aguas residuales*

El tratamiento anaerobio se utiliza tanto para las aguas residuales como para la digestión de lodos. El proceso comprende dos etapas:

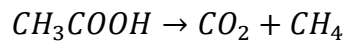
- 1- Fermentación ácida
- 2- Fermentación metánica

Fermentación ácida.

Los compuestos orgánicos complejos del agua residual (proteínas, grasas e hidratos de carbono) se hidrolizan en primer lugar para producir unidades moleculares menores, las cuales son sometidas a biooxidación, convirtiéndose principalmente en ácidos orgánicos de cadena corta. Una población heterogénea de bacterias facultativas y anaerobias es responsable de estas reacciones de hidrólisis y oxidación. En la etapa de fermentación ácida no se produce una reducción importante de la DQO, ya que principalmente lo que ocurre es la conversión de las moléculas orgánicas complejas en ácidos orgánicos de cadena corta que ejercen también una demanda de oxígeno (Ramalho, R.S. 1996).

Fermentación metánica.

Microorganismos metalogénicos que, son estrictamente anaerobios, convierten los ácidos de cadena más larga a metano, dióxido de carbono y ácidos orgánicos de cadena más corta. Las moléculas ácidas se rompen repetidamente dando lugar finalmente a ácido acético que se convierte en CO₂ y CH₄



El grupo de bacterias facultativas y anaerobias responsables de la etapa de fermentación ácida tiene una velocidad de crecimiento más elevada que las bacterias metanogénicas responsables de la etapa de fermentación metánica. Como resultado, la etapa de fermentación ácida es relativamente rápida por lo que la etapa de fermentación metánica es la que controla la velocidad en los procesos anaerobios. Ya que la fermentación metánica controla la velocidad del proceso, es importante mantener las condiciones de una fermentación metánica eficaz. El tiempo de residencia para los microorganismos metánicos debe ser el adecuado o si no son eliminados del sistema. Los datos experimentales demuestran que el tiempo de residencia requerido varía desde 2 a 20 días. El nivel óptimo de pH va de 6.8 a 7.4 (Ramalho, R.S. 1996).

Las ventajas del tratamiento anaerobio sobre el aerobio son:

- No se emplean equipos de aireación, se produce un ahorro en el consumo energético en el tratamiento anaerobio
- El coeficiente de producción de biomasa para los procesos anaerobios es mucho menor que para los sistemas aerobios. Esto significa que se produce menos biomasa por unidad de reducción de sustrato y en consecuencia se presentan ahorros considerables en los procesos de manejo y evacuación de del exceso de lodos. Esto significa también un menor requisito de nutrientes.

- En los procesos anaerobios es posible operar cargas orgánicas del effluente superiores que para el caso de los procesos aerobios. Este hecho resulta de la limitación de velocidad de la transferencia de oxígeno de los procesos aerobios.
- La producción de metano en los procesos anaerobios es una ventaja debido a su valor como combustible. Una parte sustancial de la necesidad energética de los procesos anaerobios puede obtenerse de los gases emitidos.

Algunas de las desventajas del tratamiento anaerobio con respecto al aerobio son:

- Se necesitan mayores tiempos de residencia.
- Los malos olores asociados a los procesos anaerobios.
- Se necesitan mayores temperaturas para asegurar que los procesos anaerobios se produzcan a velocidades razonables.
- La sedimentación de la biomasa anaerobia en el clarificador secundario es más difícil que la decantación de la biomasa en el proceso de lodos activados (Ramalho, R.S. 1996).

1.3.5 Tratamiento terciario de las aguas residuales

1. *Eliminación de sólidos en suspensión*

Los sólidos en suspensión que no han sido eliminados en las operaciones convencionales de tratamiento primario y secundario pueden constituir una parte importante de la DBO. De los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales se tienen los siguientes procesos (Ramalho, R.S. 1996):

A) Microtamizado

Los microtamices se construyen sobre tambores rotativos. El agua residual se alimenta de forma continua en la parte interior del tambor, fluyendo hasta una cámara de almacenamiento de agua

clara en la parte exterior. Con el microtamizado se consigue la eliminación del 70 -90% de los sólidos en suspensión.

B) Filtración

Los elementos que se usan en la filtración son arenas, antracita y tierra de diatomeas.

C) Coagulación

La coagulación se lleva a cabo utilizando sulfatos de alúmina, polielectrolitos, cal y otros reactivos químicos.

2. Desinfección

La desinfección se refiere a la destrucción selectiva de los organismos patógenos. En el tratamiento de las aguas residuales la desinfección que comúnmente se emplean es mediante (López, R, 1996):

A) Agentes químicos

B) Agentes físicos

C) Medios mecánicos

D) Radiación

A) Agentes químicos

Las características que debe tener un agente químico ideal se presentan la tabla 1.9 (López, R, 1996).

Los agentes químicos que se han usado como desinfectante incluyen: fenol y compuestos fenólicos, alcoholes, iodo, cloro y sus compuestos. El desinfectante universalmente usado es el cloro (López, R, 1996).

Tabla 1.9 Características de un desinfectante químico ideal.

Características	Indicaciones
Toxicidad para los microorganismos	Debe tener un amplio espectro de actividad a altas diluciones.
Solubilidad	Debe ser soluble en aguas o en tejidos celulares.
Estabilidad	La pérdida de su acción germicida en almacenamientos debe ser baja.
No debe ser tóxico a las formas de vida superior	Debe ser tóxico a los microorganismos patógenos y no ser tóxico al hombre y otras formas de vida.
Homogeneidad	La solución debe ser uniforme en su composición.
Interacción con materias	No debe ser adsorbido por materia orgánica.
Toxicidad a temperatura ambiente	Debe ser efectiva en un rango de temperatura ambiente.
Penetración	Debe tener capacidad de penetración a través del agua.
No corrosivo y no teñidor	No debe corroer los metales o manchar la ropa.
Habilidad para desodorizar	Debe desodorizar mientras desinfecta.
Capacidad detergente	Debe tener acción limpiadora para mejorar su efectividad desinfectante.
Disponibilidad	Debe estar disponible en grandes cantidades y a un precio razonable.

López, R, (1996)

B) Agentes Físicos

Los desinfectantes físicos que se han usado son calor y luz, calentando el agua hasta el punto de ebullición se pueden destruir las bacterias. El calor se emplea en las industrias de bebidas y derivados de la leche (López, R, 1996).

La luz solar también es buena desinfectante, en particular se emplea la radiación ultravioleta, existen lámparas de luz

ultravioleta para esterilizar pequeñas y grandes cantidades de agua. La eficiencia del proceso depende de la penetración de la luz en el agua (López, R, 1996).

C) Medios mecánicos

Las bacterias se eliminan también por medios mecánicos durante el tratamiento de las aguas residuales. Las eficiencias típicas de remoción para varios procesos de tratamiento se ven en la tabla 1.10. Los primeros 5 procesos que se enlistan se pueden considerar físicos (López, R, 1996).

Tabla 1.10 Remoción de bacterias en diferentes procesos de tratamiento

Proceso	% de remoción
Filtros gruesos	0-5
Filtros finos	10-20
Cámaras griff	10-25
Sedimentación simple	25-75
Precipitación química	40-80
Filtros percoladores	90-95
Lodos activados	90-98
Cloración en efluentes tratados	98-99

López, R, (1996).

D) Radiación

Los principales tipos de radiación son: electromagnética, acústica y de partículas. Los rayos gamma emitidos por radioisótopos, como cobalto 60, tienen una fuerte penetración, y se han usado para esterilizar agua y aguas residuales (López, R, 1996).

3. Filtración

Es el proceso más efectivo para la remoción de sólidos y es el proceso que vino realmente a hacer posible el tratamiento avanzado. La filtración es una operación unitaria de separación sólido-líquido en el cual el líquido pasa a través de un medio poroso para eliminar la mayor cantidad posible de sólidos suspendidos. En el campo de tratamiento de aguas residuales es utilizada para filtrar (López, R, 1996):

- Efluentes secundarios no tratados
- Efluentes secundarios tratados químicamente
- Aguas residuales brutas tratadas químicamente

4. Adsorción en carbono activo

Adsorción es la concentración de un soluto en la superficie de un sólido. Este fenómeno no tiene lugar, se coloca dicha superficie en contacto con una solución. Una capa de molécula de soluto se acumula en la superficie del sólido debido al desequilibrio de las fuerzas superficiales. En el interior del sólido, las moléculas están rodeadas totalmente por moléculas similares y por lo tanto sujetas a fuerzas equilibradas. Las moléculas en la superficie están sometidas a fuerzas no equilibradas. Debido a que estas fuerzas residuales son suficientemente elevadas, pueden atrapar moléculas de un soluto que se halle en contacto con el sólido. Este fenómeno se denomina adsorción física. El sólido (por ejemplo, carbono activo) se denomina adsorbente y el soluto a adsorber se denomina adsorbato. La capacidad de adsorción es función de la superficie total del adsorbente, ya que cuanto mayor sea esta superficie se dispone de mayor número de fuerzas residuales no equilibradas para la adsorción. Los carbones activos, granulares, en forma de polvo, se han empleado profundamente como adsorbente en las plantas de tratamiento de agua para la eliminar los olores y sabores que producen los contaminantes (Ramalho, R.S. 1996).

5. Intercambio iónico

El intercambio iónico es un proceso en que los iones que se mantienen unidos a grupos funcionales sobre la superficie de un sólido, por fuerzas electrostáticas, se intercambian por iones de una especie diferente en disolución. Ya que la desmineralización completa puede alcanzarse mediante intercambio iónico, es posible utilizar procesos de tratamiento de corriente partida, en los que parte del agua residual afluente se desmineraliza y se combina después con parte del efluente que ha sido desviado del tratamiento para producir un efluente de calidad específica como de una determinada dureza (Ramalho, R.S. 1996).

6. Electrodialisis

La electrodialisis se desarrolló para la desalación del agua de mar, es un método de eliminación de nutrientes inorgánicos (fósforo y nitrógeno) de las aguas residuales (Ramalho, R.S. 1996).

7. Procesos de oxidación química (cloración y ozonación)

Cloración

La cloración es un proceso muy usado en el tratamiento de aguas residuales industriales y municipales (Ramalho, R.S. 1996).

El objetivo de la cloración es:

- Desinfección
- Reducción de la DBO
- Eliminación o reducción de colores y olores
- Oxidación de los iones metálicos
- Oxidación de los cianuros o productos inocuos

8. Azonación

La oxidación química con ozono es un método efectivo para tratar las aguas residuales, basándose en los siguientes factores (Ramalho, R.S. 1996):

- El ozono reacciona fácilmente con los productos orgánicos no saturados presentes en las aguas residuales.
- La tendencia a la formación de espuma de las aguas residuales se reduce después del tratamiento con ozono.
- La ruptura de los anillos y la oxidación parcial de los productos aromáticos deja a las aguas residuales más susceptibles de tratamiento convencional biológico.
- El ozono presente en el efluente se convierte rápidamente a oxígeno. Este oxígeno es beneficioso para las corrientes receptoras y ayuda a mantener la vida acuática.

9. Eliminación del fósforo

Los procesos para eliminar el fósforo son:

- Precipitación química
- Proceso de lodos activados
- Balsas de estabilización
- Ósmosis inversa
- Electrodialisis (Ramalho, R.S. 1996).

10. Eliminación del nitrógeno

Existen varias razones importantes que justifican la eliminación de los compuestos de nitrógeno de las aguas residuales antes de su descarga a los cauces receptores. Estas razones son:

- El nitrógeno junto con el fósforo, juegan un papel importante como nutrientes en el proceso de eutroficación.
- Los compuestos nitrogenados exigen una demanda de oxígeno.
- La presencia de $N-NH_4^+$ en aguas residuales conduce a la formación de cloraminas y tricloruro de nitrógeno por reacción con el cloro utilizado como desinfectante.
- El $N-NH_4^+$ es tóxico para la vida acuática.

Humedales

Los humedales naturales, aparte de ser un gran ecosistema y un importante hábitat para muchos seres vivos, actúan como filtros naturales de agua, esto se debe a que las plantas hidrófitas, que conforman al humedal, en sus tejidos almacenan y liberan agua y, de esta forma, comienza con el proceso de filtración. Antiguamente los humedales eran drenadores por ser considerados una simple inundación de los terrenos, pero hoy en día se sabe que los humedales representan un gran ecosistema y se valoran más. Sin embargo, por descuido o desconocimiento, también ha sido receptores de descargas de agua residual desde hace más de un siglo. La observación de la mejora de la calidad del agua en estos humedales naturales dio lugar el desarrollo de humedales artificiales, donde se emulan los procesos de purificación (Comisión Nacional del Agua. 2020).

Los humedales artificiales inicialmente fueron utilizados para la depuración de descargas con baja concentración de materiales orgánicos, o bien para el tratamiento de aguas grises, sin embargo, a partir de los años ochenta comenzaron a utilizarse en sistemas de mayor capacidad, es decir, para mayores caudales. Durante los años noventa fueron diseñados para una diversidad de aplicaciones entre las que se incluyen en el tratamiento de las aguas residuales municipales, aguas de retorno agrícola y las relacionadas con algunas industrias generadoras de aguas residuales de tipo orgánico. Para el año 2000 se habían formado un sin número de agrupaciones científicas involucradas con el desarrollo y mejoramiento de la tecnología, con importantes avances en el conocimiento de los mecanismos físico, químicos, biológicos e hidráulicos. Actualmente, en México, se han construido

humedales de flujo subsuperficial y se ha reportado una alta remoción de sólidos suspendidos (SST), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nitrógeno (N) y patógenos (Comisión Nacional del Agua. 2020).

Las ciénegas o pantanos son áreas de tierra inundadas, con profundidades típicas menores de 60 centímetros de profundidad, que apoyan al crecimiento de plantas emergentes, tales como tule, espadaña, carrizo y junco. La vegetación provee la superficie para la formación de una película de bacterias estas ayudan en la filtración y adsorción de los componentes de las aguas residuales, transferencia de oxígeno y controla el crecimiento de algas al restringir la penetración de la luz solar (López, R, 1996).

Humedales artificiales

Ofrecen todas las capacidades de tratamiento de las ciénegas naturales, pero sin las limitaciones asociadas con las descargas a los ecosistemas naturales. Se ha desarrollado la construcción de dos tipos de sistemas de ciénegas artificiales para el tratamiento de las aguas residuales (López, R, 1996).

1- Sistemas de superficie libre

Consisten en depósitos paralelos o canales con un suelo de fondo relativamente impermeable, vegetación emergente y superficial con profundidad de 0.1 a 0.6 metros.

El agua residual tratada previamente, se aplica normalmente en forma continua a estos sistemas, y el tratamiento ocurre cuando el efluente fluye lentamente a través de los tallos y raíces de la vegetación emergente.

Los sistemas de superficie libre también pueden diseñarse para crear nuevos hábitats de especies silvestres o aumentar las ciénegas naturales cercanas existentes (López, R, 1996).

2- Sistemas de flujo subsuperficial

Estos sistemas se diseñan con el objetivo del tratamiento a nivel secundario o avanzado, a estos sistemas también se les llama zona de raíces, biofiltros horizontales o filtros roca-carrizo.

Consisten en un filtro biológico de grava o arena, sembrado con plantas del pantano y atravesado de forma horizontal con aguas residuales. Las bacterias responsables para la degradación de la materia orgánica utilizan la superficie del sustrato para la formación de una película bacteriana y de esta manera una población bastante estable que no puede ser arrastrada hacia la salida como sucede en las lagunas de oxidación. Las plantas más famosas y utilizadas en biofiltros, a nivel mundial es el carrizo (*phragmites australis*) (López, R, 1996).

Tratamiento de aguas residuales con plantas flotantes

El sistema de plantas acuáticas es similar, conceptualmente, a las ciénegas con sistemas de superficie libre, excepto que las plantas son especies flotantes, como el lirio. La profundidad del agua es semejante a la profundidad de las ciénegas variando de 0.5 a 1.8 metros. Se ha utilizado aireación suplementaria con el sistema de plantas flotantes para incrementar su capacidad de tratamiento y para mantener las condiciones aerobias necesarias para el control biológico de mosquitos. La carga hidráulica anual y el área específica requerida para este sistema es similar al de las ciénegas como se ve en la tabla 1.11 (López, R, 1996).

Tabla 1.11 Criterio de diseño y calidad esperada del efluente del sistema de plantas flotantes.

Parámetros	Tipos de sistemas de tratamiento de lirio		
	Secundaria aerobia (sin aerear)	Secundario aeróbico (eareado)	Remoción de nutrientes (sin aerear)
Aguas residuales del efluente	Cribada o sedimentada	Cribada o sedimentada	Secundario
DBO5 efluente mg/l	130-180	130-180	30
Carga DBO5 lb/acre*día	40-80	150-300	10-40
Profundidad del agua pies	1.5-3	3-4	2-3
Tiempo de retención días	10-36	4-8	6-18
Carga hidráulica Mga/acre*día	0.02-0.06	0.10-0.30	0.04-0.16
Temperatura del agua °C	>10	>10	>10
Calendario de cosechas	Anual o estacional	Dos veces al mes o continuamente	Dos veces al mes o continuamente

López, R, (1996).

Las plantas acuáticas flotantes, en especial el lirio acuático, tienen la capacidad de extraer una amplia gama de sustancias tóxicas del agua, tales como los metales pesados y plaguicidas. Pero tienen un gran problema es la disposición final de estas plantas, ya que están peligrosamente contaminada con sustancias tóxicas (Lord, R. 1982).

Los lirios acuáticos han demostrado tener la capacidad para concentrar plomo, cadmio y mercurio. Se estima que una hectárea de lirio acuático podría purificar 2 millones de litros de agua contaminada de 1 ppm de cadmio, 2.2 millones de litros de agua contaminada con 10 ppm de plomo y 3.4 millones de litros de agua contaminada con 1 ppm de mercurio, todo esto en 96 horas. Una laguna de un acre,

con una profundidad de un metro, podría extraer esta carga. También se hicieron pruebas con la Lemna minor y con Lemna perpusilla, para la absorción de los metales pesados, dando muy buenos resultados (Lord, R. 1982).

Capítulo 2. Normatividad de las aguas residuales en la industria textil

2.1 Normatividad de las aguas residuales internacionales y en México

Las obligaciones internacionales pueden ser pertinentes cuando las aguas residuales fluyen hacia ríos y lagos internacionales o acuíferos. Para esto hay dos tratados mundiales principales que abordan la gestión del agua dulce transfronteriza:

- 1- La Convención de las Naciones Unidas, sobre el Derecho de los usos de los cursos de agua internacionales para fines distintos de la navegación, esta exige que los estados adopten todas las medidas apropiadas para evitar causar “Daño Considerable” a otros estados que comparten un curso de agua internacional.
- 2- El Convenio Sobre la Protección y Utilización de los Cursos de Agua Transfronterizos y de los Lagos Internacionales fue desarrollado como un instrumento regional para la Comisión Económica para Europa. Entro en vigor en 1996 y ha estado abierto a los estados miembros de la ONU de todo el mundo desde 2013. La Convención del Agua aborda los impactos transfronterizos, los principios de sostenibilidad, de precaución y de que quien contamina paga e incluye las obligaciones de controlar las emisiones de contaminantes y de autorización previa del vertido de aguas residuales (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura 2017).

2.1.1 Normatividad de aguas residuales en el mundo

En África la legislación y las leyes existentes para el sector hídrico, en todos los niveles del gobierno, no suelen tomar en cuenta las aguas residuales. Por poner un ejemplo, en Nigeria la mayoría de las leyes federales y estatales hacen escasa o nula mención del tema de las aguas residuales. En la región de arabia, que es una de las más secas del mundo, el Consejo Ministerial Árabe sobre recursos hídricos (AMWC), a través de la iniciativa MDG, controla la supervisión y presentación de informes regionales

sobre los servicios de agua, saneamiento y aguas residuales. Al menos en 11 de los 22 estados árabes ha aprobado leyes que permiten el uso de aguas residuales tratadas. Jordania adoptó la Política de Sustitución y Reutilización del Agua, que formaliza el uso de aguas residuales tratadas como política nacional. En Europa, la Directiva sobre el Tratamiento de las Aguas Residuales Urbanas de la Unión Europea, que se complementa con los otros instrumentos de control de la contaminación y protección del medio ambiente de la Unión Europea, adoptada en 1991, se refiere a la recolección, descarga y tratamiento de aguas residuales urbanas. Su principal objetivo es la protección de las aguas superficiales de los efectos adversos de las descargas de aguas residuales (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura 2017).

2.1.2 Normatividad de aguas residuales en México

En la tabla 2.1 se muestran las leyes que regulan en México el uso del agua, su recolección y su disposición final.

Tabla 2.1 Jerarquía de las leyes en México

Jerarquía de las leyes			
Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos	ART 4	Salud	Toda persona tiene derecho a la protección de la salud. La Ley definirá las bases y modalidades para el acceso a los servicios de salud y establecerá la concurrencia de la Federación y las entidades federativas en materia de salubridad general, conforme a lo que dispone la fracción XVI del artículo 73 de esta Constitución.
	ART 27	Aguas propiedad de la nación	La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional corresponde originariamente a la Nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada.
	ART 73	Consejo de salubridad	El Congreso tiene facultad: 1a. El Consejo de Salubridad General dependerá directamente del presidente de la República, sin intervención de ninguna Secretaría de Estado, y sus disposiciones generales serán obligatorias en el país. 2a. En caso de epidemias de carácter grave o peligro de invasión de enfermedades exóticas en el país, la Secretaría de Salud tendrá obligación de dictar inmediatamente las medidas preventivas indispensables, a reserva de ser después sancionadas por el

			<p>presidente de la República. Base reformada DOF 02-08-2007</p> <p>3a. La autoridad sanitaria será ejecutiva y sus disposiciones serán obedecidas por las autoridades administrativas del País.</p>
	ART 115	Municipios	<p>Los Municipios tendrán a su cargo las funciones y servicios públicos siguientes:</p> <p>a) Agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales.</p> <p>b) Alumbrado público</p> <p>c) Limpia, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de residuos.</p> <p>d) Mercados y centrales de abasto.</p> <p>e) Panteones</p> <p>f) Rastro.</p> <p>g) Calles, parques y jardines y su equipamiento.</p> <p>h) Seguridad pública, en los términos del artículo 21 de esta Constitución, policía preventiva municipal y tránsito</p>
Leyes	Federales	Aguas nacionales	Todas

	Generales	Equilibrio ecológico y protección del ambiente	ART 117 al 133
		Salud	ART 116, 118 y 122
Reglamento	Aguas Nacionales	Todas	
	Prevención y control de la contaminación del agua	Art 5 al 29	
	Establecimientos y servicios	ART 1335 al 1346	
Criterio Normas Oficiales Mexicanas Normas Mexicanas	Calidad del agua, Descargas, muestreo agua potable	<p>001-002-003-004-005 SEMARNAT</p> <p>Normas oficiales mexicanas</p> <p>NOM-001-Semarnat-1996</p> <p>Establece los límites máximos permisibles de contaminación en las descargas de aguas residuales en agua o bienes nacionales. Publicada el 6 de enero de 1997.</p> <p>NOM-002-Semarnat-1996</p> <p>Establece los límites máximos permisibles de contaminación en las descargas de agua residual a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Publicada el 3 de junio de 1998</p> <p>NOM-003-Semarnat-1998</p> <p>Establece los límites máximos permisibles de contaminación para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios públicos. Publicada el 21 de septiembre de 1998</p>	

	NOM-004-Semarnat-2001 Establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminación en lodos y biosólidos para su aprovechamiento y disposición final. Publicada el 15 de agosto de 2003
--	---

López, R, (1996)

2.2 Normatividad de aguas residuales en la industria textil

2.2.1 Normatividad de las aguas residuales en la industria y de la industria textil en México

La NOM-001-SEMARNAT-1996 abrogó la Nom-14-ECOL-1993, que establecía los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria textil.

Capítulo 3. Propuesta del tren de tratamiento de agua residual textil

3.1 Caso de estudio

Para el caso de estudio se propone una industria textil, en un municipio de Michoacán. Las descargas de aguas residuales se han incrementado en el estado, en el municipio de Zinapécuaro, por eso se han hecho varios estudios de los efluentes de esta industria. No se ha tenido un control de la contaminación y del tratamiento de esta. Se sabe que las aguas provenientes de este proceso se caracterizan por tener la presencia de concentración de metales pesados, por lo anterior se propone un tren de tratamiento para la remoción de estos últimos.

El agua residual producida por el proceso de la industria textil es $Q=259.12 \text{ m}^3/\text{día}$, el gasto instantáneo es $Q_{\text{ins}}=0.0133 \text{ m}^3/\text{seg}$ (Cortina, C. Marqués, R. 2008).

Para el caso de estudio se muestra la caracterización de estas aguas en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Análisis del agua residual del caso de estudio.

Determinación	Unidades	Resultado
pH	-	9.5
Sólidos disueltos totales	mg/l	314.83
Grasas y aceites	mg/l	115.644
Coliformes fecales	NMP/100 ml	740.33
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/l	2973
Mercurio	mg/l	0.0009
Plomo	mg/l	0.56
Arsénico	mg/l	0.0076
Cadmio	mg/l	<0.05
Cobre	mg/l	<0.05
Cromo	mg/l	<0.05
Mercurio	mg/l	<0.001
Níquel	mg/l	<0.05
Plomo	mg/l	<0.1
Zinc	mg/l	<0.0937
Color	U Pt-Co	600
DBO 5 total	mg/l	454

Flores, G. E. (2004).

En la tabla 3.2 se describen los límites máximos permisibles de metales pesados y cianuros en las descargas de aguas residuales que marca la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Tabla 3.2 Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros.

Límite máximo permisibles para metales pesados y cianuros						
Parámetros	Ríos					
mg/l	Uso de riego agrícola		Uso público urbano		Protección de vida acuática	
	Promedio diario	Promedio mensual	Promedio diario	Promedio mensual	Promedio diario	Promedio mensual
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2
Cianuro	1	3	1	2	1	2
Cobre	4	6	4	6	4	6
Cromo	1	1.5	0.5	1	0.5	1
Mercurio	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01
Níquel	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4
Zinc	10	20	10	20	10	20

CONAGUA

En la tabla 3.3 se observan los límites máximos permisibles de contaminantes básicos en las descargas de aguas residuales que marca la Nom-001-SEMARNAT-1996.

Tabla 3.3 Límites máximos permisibles para contaminantes básicos.

Límites máximos permisibles para contaminantes básicos						
Parámetro	Ríos					
mg/l	Uso de riego agrícola		Uso público urbano		Protección de vida acuática	
	Promedio diario	promedio mensual	Promedio diario	promedio mensual	Promedio diario	promedio mensual
Temperatura °C	No aplicable	No aplicable	40	40	40	40
Grasas y aceites	15	25	15	25	15	25
Materias flotantes	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
Sólidos sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	1	2
Sólidos suspendidos totales	150	200	75	125	40	60
Demanda Bioquímica de Oxígeno ₅	150	200	75	150	30	60
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25
Fósforo total	20	30	20	30	5	10

CONAGUA

Con los datos obtenidos de las pruebas de laboratorio y los límites máximos permisibles que nos da la NOM-001-SEMARNAT-1996, se propone el siguiente tren de tratamiento para las aguas residuales.

3.2 Tren de tratamiento

Este tren de tratamiento se seleccionó para poder tratar las aguas residuales de la industria textil, que en sus aguas contienen detergentes, ceras, grasas, colorantes y metales pesados. Este tren pretende dar una solución para la remoción de los metales pesados como se muestra en la Figura 3.1.

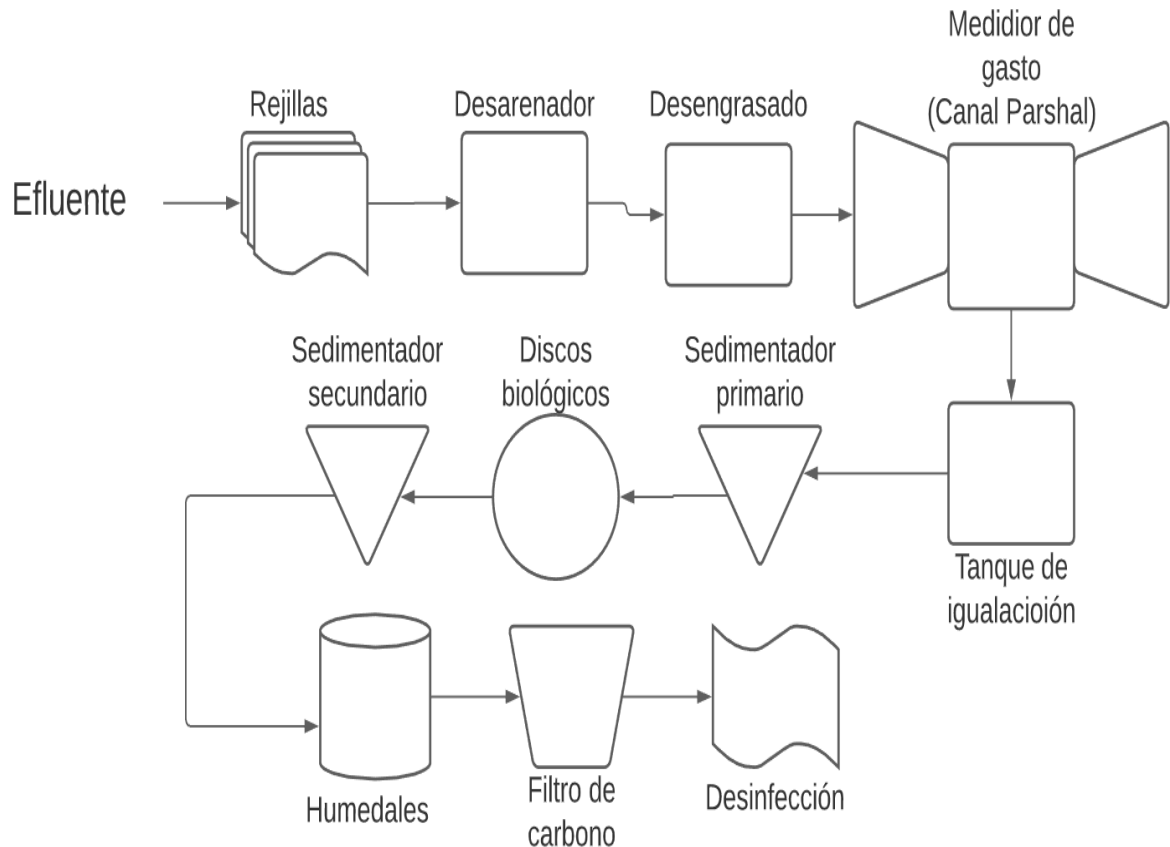


Figura 3.1 Diagrama del flujo del tren de tratamiento propuesto

Pretratamiento

Rejillas

No es necesaria la implementación de las Rejillas dado que solo las aguas residuales de la fábrica textil serán vertidas, pero ya que estas son para la protección de las bombas, otros equipos electromecánicos y prevenir el atascamiento de las válvulas, se proponen.

Las rejas gruesas cuentan con aperturas grandes, que van de 38 a 150 mm y están diseñadas para evitar que los troncos, maderas y residuos grandes entren en los procesos de tratamiento. Las rejillas retienen la basura y normalmente van seguidas de rejillas con aperturas más pequeñas. Las rejas para basura se pueden limpiar mecánica o manualmente. Cuando el espacio es limitado, a veces, las plantas tienen rejas retenedoras de basura tipo cesta que se izan para limpiarse manualmente (Comisión Nacional del Agua. 2020).

Existen dos tipos de rejillas: de limpieza manual y de limpieza mecánica. Para este proyecto se seleccionaron las rejillas de limpieza manual porque el gasto es menor a 0.5 m³/s.

Se propone un ancho de 0.2m, un espesor de 0.005m, una separación de barras de 0.025 y una inclinación de 60°.

Rejillas de limpieza mecánica

Se tiene un gasto instantáneo de $Q_{inst}=0.0133 \frac{m^3}{s}$

$$Q_{inst} := 0.0133 \frac{m^3}{s} = 13.3 \frac{l}{s}$$

Se propone que la velocidad mínima sea mayor a 0.6 m/s, para evitar sedimentación de sólidos orgánicos.

$$V := 0.6 \frac{m}{s}$$

$Q=AV$

$$A := \frac{Q_{inst}}{V} = 0.022 m^2$$

Se propone un ancho de 0.2 m

$$bn := 0.2 m$$

$$A = bn * h$$

$$h := \frac{A}{bn} = 0.111 m$$

Para el emparrillado se propone un espesor $S=0.005\text{m}$ y una separación entre barras de 0.025

$$bn = ((bg/e) - 1)(S + e) + e$$

$$S := 0.005 \text{ m} \quad e := 0.025 \text{ m} \quad \text{hipotenusa} := \frac{h}{\sin(60^\circ)} = 0.128 \text{ m}$$

$$bg := e \cdot \left(\left(\frac{bn - e}{S + e} \right) + 1 \right) = 0.171 \text{ m}$$

$$\text{Área libre} = \text{hipotenusa} \cdot bg$$

Área libre

$$Al := \frac{Q_{inst}}{V} = 0.022 \text{ m}^2$$

$$\text{Arealibre} := \text{hipotenusa} \cdot bg = 0.022 \text{ m}^2$$

$$vl := \frac{Q_{inst}}{\text{Arealibre}} = 0.608 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Número de barras

$$n := \left(\frac{bg}{e} \right) - 1 = 5.833$$

Desarenador

Los desarenadores pueden ser omitidos como las rejillas, pero ya que una planta es una gran inversión, se tienen que tomar todas las medidas para proteger los elementos de esta.

El desarenador es una parte importante del tren de tratamiento de aguas residuales, evita la abrasión innecesaria y desgaste de los equipos mecánicos, la deposición de arena en tuberías y canales, y la acumulación de arena en digestores y tanques de aireación. Además, reduce la frecuencia de limpieza del digestor causada por la acumulación excesiva de arena. Sin el desarenador, la arena sería eliminada en los clarificadores primarios o, si la planta carece de tratamiento primario, en tanques de aireación y clarificadores secundarios. La instalación de un sistema de desarenadores es ahora una práctica común para las plantas de

tratamiento con equipos mecánicos y procesos de manejo de lodos, ya que la retención de las arenas evita que los equipos se deterioren (Comisión Nacional del Agua. 2020).

El propósito de separar la arena del material orgánico susceptible de putrefacción es evitar depósitos de arena en los tanques de aeración, obstrucción de tuberías, desgaste de rastras en sedimentadores, etc. (César, V. y Vázquez, 2001). Se propone un sistema de dos canales desarenadores de flujo horizontal, para remover partículas de hasta 7.5×10^{-3} cm de diámetro y con densidad de 2650 kg/m^3 (Cortina, C. Marqués, R. 2008).

Diseño del tanque desarenador, $Q_{inst}=13.3 \text{ l/s}$, una temperatura de 40° C , removiendo partículas de 7.5×10^{-3} de diámetro y una densidad de 2650 kg/m^3 .

Viscosidad dinámica del agua a 40°

$$\mu := 0.000653 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right)$$

$$d := 7.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

Velocidad de sedimentación

$$v := \frac{\left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \cdot \left(2650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 998.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot (7.5 \cdot 10^{-5} \text{ m})^2}{18 \cdot \mu} = 0.008 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad de arrastre

$$k := 125 \quad \text{factor dimensional}$$

$$\rho_s := 2.65 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{densidad relativa}$$

$$v_a := k \cdot \sqrt{(2.65 - 1) \cdot 7.5 \cdot 10^{-5}} = 1.391 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad de traslación horizontal

$$v_{tr} := \frac{1}{3} \cdot v_a = 0.464 \frac{m}{s}$$

Área de la sección transversal del desarenador

$$a := \frac{0.0113}{0.464} = 0.024 \text{ m}^2$$

Se propone un ancho

$$w := 0.4$$

Con este ancho se obtiene la profundidad

$$hd := \frac{a}{w} = 0.061 \text{ m}$$

Con el ancho se propone la longitud

$$L := \frac{v_{tr} \cdot hd}{v} = 3.64 \text{ m}$$

Desengrasado

Se propone un desengrasado AEROFLO de la empresa teqma, que es la única turbina diseñada exclusivamente para la flotación de partículas, aceites, grasas y cualquier tipo de flotantes mediante la aireación. El equipo tiene una construcción muy simple pues está constituido por un motor de accionamiento, una cámara de viento acoplado a una toma de aire mediante un tubo de aspiración por encima del nivel del agua, una turbina de doble etapa y un plato difusor circular, como se puede observar en la figura 3.2 (Teqma. 2020).



Figura 3.2 Turbina desengrasante AEROFLO

Teqma. (2020).

Entre las principales características del aireador AEROFLO se tiene el rendimiento del desengrasante con una eficiencia del 80% para la separación de grasas y aceites por flotación, la cámara de compresión es de una sola pieza de fundición, silencioso, de fácil mantenimiento y resistente (Teqma. 2020).

Las turbinas se instalan sumergidos en el agua. Aspiran el aire de la superficie mediante el tubo de aspiración, y lo distribuye en el tanque en forma de microburbujas. El plato difusor circular asegura una repetición homogénea de las microburbujas en el líquido, con un radio igual a la profundidad de inmersión del aparato. Las microburbujas se adhieren a las partículas en suspensión y a la grasa y las empujan a subir a la superficie. Una vez flotadas, por la propia acción de empuje del flujo que provoca en la superficie, la materia es desplazada a la zona de recolección (Teqma. 2020). Se propone el desengrasante AEROFLO Modelo F206.

Con esta eficiencia del desengrasante, siendo la remoción del 80% de grasas y aceites, de 115.64 mg/l queda en **23.12 mg/l** y con esto, se está dentro de la norma para las grasas y aceites.

Medidor de gasto (Canal Parshall)

Cuando las plantas de tratamiento de aguas residuales tienen desarenadores horizontales tipo gravedad, consistentes en al menos dos canales desarenadores, se requiere controlar la velocidad del flujo que pasa a través de ellos. Normalmente, los flujos de entrada a las plantas de tratamiento de aguas son muy variables. A pesar de estas variaciones en gasto, la velocidad del flujo debe permanecer constante o casi constante en el desarenador, con un valor recomendado generalmente de 0.3 m/s. Para lograr mantener esta velocidad constante, a flujos variables, se debe colocar un dispositivo de control hidráulico en cada canal, que puede ser un vertedor proporcional o por medio de un canal Parshall, colocado al final de cada canal desarenador. Una ventaja del uso del canal Parshall como dispositivo de control de velocidad, es que la pérdida de carga, suponiendo que trabaja con la sumergencia recomendada, es mucho menor que la pérdida de carga con vertedores proporcionales, ya que estos vertedores requieren caída libre y un espacio mínimo por debajo de la cresta para que funcionen adecuadamente (Comisión Nacional del Agua. 2020).

Se seleccionó el canal Parshall, como se muestra en la figura 3.3 porque es un método de aforo bastante exacto, además de que tiene un costo bajo y verifica la velocidad en los desarenadores (César, V. y Vázquez, 2001).

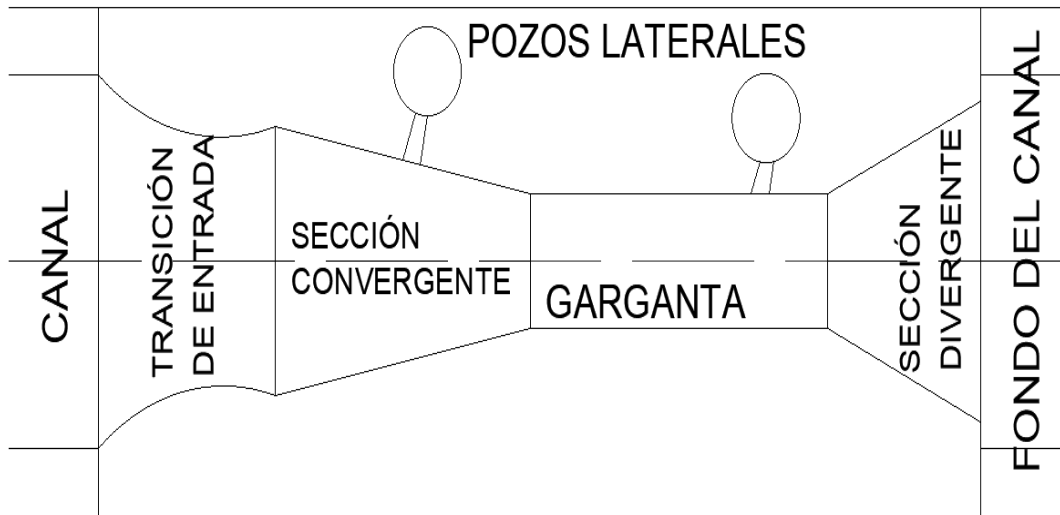


Figura 3.3 Geometría de un canal Parshall

Oliveras, J., (2020).

Diseño de Medidor de gasto.
Se tiene un gasto instantáneo.

$$Q_m := 0.0133 \frac{m^3}{s} = 13.3 \frac{l}{s}$$

Tabla 3.4 características de descarga canales Parshall.

Ancho de garganta	Intervalo de descarga		Ecuación del gasto	Intervalo de cargas hidráulicas		Límite modular
	mínimo	máximo		mínimo	Máximo	
w en mm	Q (l/s)	Q (l/s)	h ₁ en m	h ₁ en m	h ₁ en m	h _w /h ₁
76.2	0.77	32.1	0.177h ₁ ^{1.550}	0.03	0.33	0.5

César Valdez, E. y Vásquez González, A. (2001).

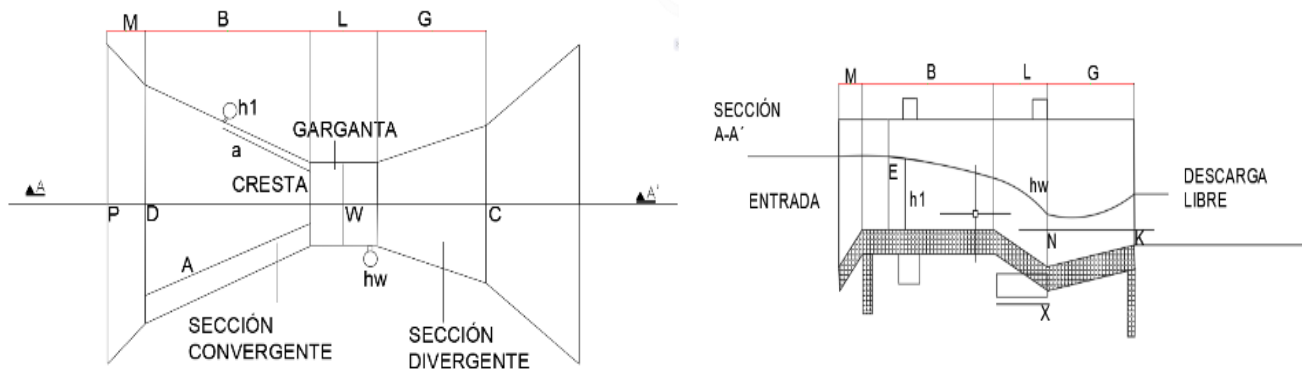


Figura 3.4 Geometría de un canal Parshall.

César Valdez, E. y Vásquez González, A. (2001).

Características de descarga de canal Parshall.

$$w := 76.2 \text{ mm} \quad Q_M := 0.77 \frac{l}{s} \quad Q_m := 32.1 \frac{l}{s} \quad h_1 := 0.03 \text{ m}$$

Tabla 3.5 Dimensiones estándares de los canales Parshall.

w mm	A mm	B mm	C mm	D mm	E mm	L mm	G mm	K mm	M mm	N mm	P mm	X mm	Y mm
76.2	467	457	178	259	457	152	305	25	-	57	-	25	38

César Valdez, E. y Vásquez González, A. (2001).

La decisión del ancho de garganta (w) se tomó en función del máximo y mínimo del gasto que tiene.

Tanque de igualación

El uso de un tanque de igualación permite la amortiguación de las variaciones de flujo y proporciona un caudal relativamente constante a los procesos y operaciones subsecuentes del sistema, mejorando el tratamiento (López, R, 1996).

No solamente amortigua las variaciones diarias del flujo, sino también la variación en las concentraciones de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y

sólidos suspendidos durante el día. Puede mejorar el funcionamiento de las plantas y se reduce el tamaño de las unidades de tratamiento (López, R, 1996).

Esta operación se aplica cuando se tienen las siguientes situaciones:

- Para amortiguar variaciones de flujo de varias descargas, de manera que se tenga una corriente compuesta con un flujo relativamente constante en la planta de tratamiento.
- Cuando se tienen variaciones en la DBO de la descarga.
- Para propósitos de neutralización, incluyendo el mezclado de los desechos ácidos y alcalinos en el tanque (Cortina, C. Marqués, R. 2008).

El tanque de igualación se encarga de modular el gasto, además de funcionar como un homogeneizador, regular el pH y la concentración de los constituyentes tóxicos en las aguas residuales. La igualación del gasto no es propiamente parte del proceso del tratamiento, pero ayuda a mejorar el funcionamiento de la planta incrementando su capacidad útil (Arredondo, C. 2013).

Los valores que permanecerán constantes para su remoción son los de pH, SDT y la DBO, como se muestra en la tabla 3.6, con ello no se tendrá variación de estos ni un sobredimensionamiento de la planta.

Tabla 3.6 Valores amortiguados por el tanque de igualación primario

Determinación	Unidades	Resultado
pH	-	9.5
Sólidos disueltos totales	mg/l	314.83
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/l	2973

Diseño del tanque de igualación.

Se propone un hidrograma para el diseño del tanque de igualación, este hidrograma es el mismo de entrada y de salida.

"Hora"	"m3/s"	"Volumen acumulado m3/s"
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0.0093	0.0093
11	0.0103	0.0196
12	0.0113	0.0309
13	0.0123	0.0432
14	0.0133	0.0565
15	0.0123	0.0688
16	0.0103	0.0791
17	0.0093	0.0884
18	0	0.0884
19	0	0.0884
20	0	0.0884
21	0	0.0884
22	0	0.0884
23	0	0.0884
24	0	0.0884

Figura 3.5 Hidrograma

Si la curva masa de entrada está por encima de la de salida, la diferencia de ordenadas representará un excedente; en caso contrario equivaldrá a un faltante. El volumen del tanque de igualación será el correspondiente a la suma del máximo excedente más el máximo faltante.

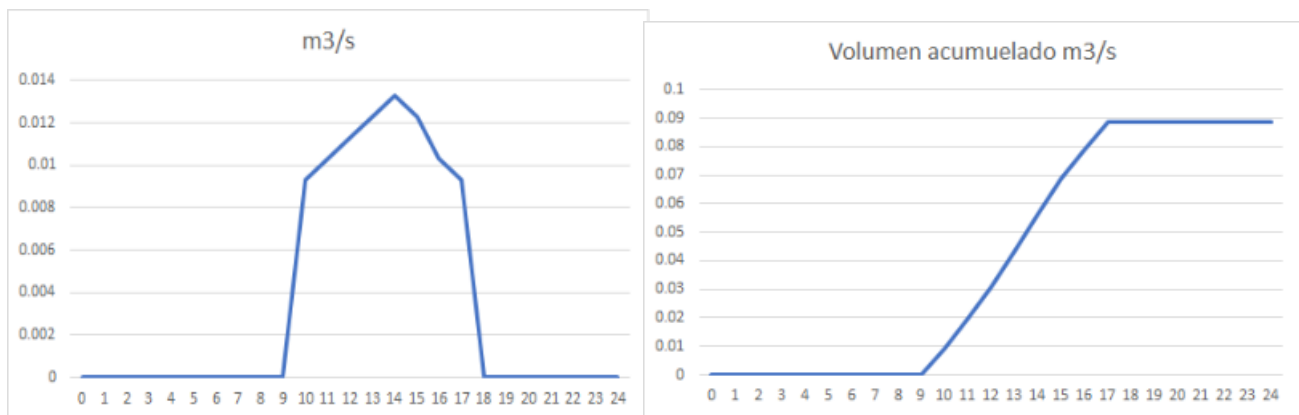


Figura 3.6 Curva masa de entrada.

Como el valor máximo es a las 14 horas con un valor de 0.0565 m³/s ese es volumen requerido.

Tratamiento primario

Tanque de sedimentación primaria

Los clarificadores primarios pueden ser rectangulares o circulares y por lo general están diseñados para proporcionar de una a tres horas de tiempo de retención. En un tanque de dos horas de retención se puede eliminar del 50 a 70 % de sólidos en suspensión por sedimentación o flotación. La eliminación de estos sólidos reduce la demanda bioquímica de oxígeno. En tanques rectangulares la relación longitud-ancho varía entre 3:1 y 5:1, con profundidades de agua mayores a dos metros, longitudes menores de 90 m, ancho de 3 a 24 m y pendientes suaves en el fondo hacia la tolva de lodos. Cuando el ancho es mayor de seis metros se prefiere usar equipos de limpieza múltiple con varias tolvas de lodo, permitiendo así el uso de anchos iguales o mayores a 24 m (Comisión Nacional del Agua. 2020).

En este tanque el tiempo de residencia de las aguas residuales es por un rango de 0.5 a 3 horas para poder eliminar del 40 al 60% de los sólidos suspendidos totales y el 65% de la DBO. Se propone un tanque rectangular y un tiempo de retención de 2 a 2.5 horas, como se muestra en la figura 3.7. Los materiales orgánicos más ligeros, principalmente grasa y aceites, flotan en la superficie y se deben desnatar (César, V. y Vázquez, 2001).

Este método va a reducir de 314.83 ml/l a 157.46 ml/l de sólidos suspendidos totales y una DBO de 2973 mg/l a 1040.55 mg/l.

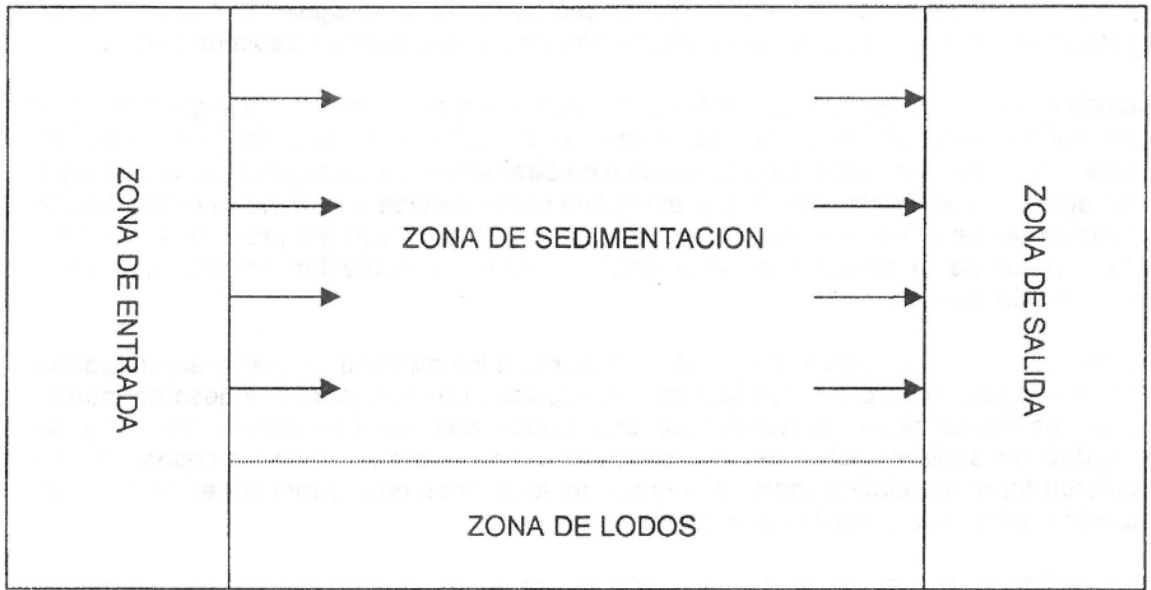


Figura 3.7 Zona de un tanque sedimentador.

Fuente: López, R, (1996)

Diseño del tanque de sedimentación primario.

Para conseguir una eficiencia de remoción de solidos suspendidos de aproximadamente 70% según la tabla, debemos tener una carga superficial de 20m³/m²d.

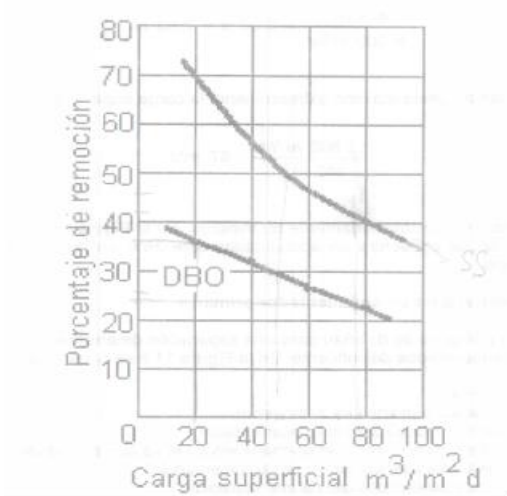


Figura 3.8 Eficiencia de remoción de S.S.

César Valdez, E. y Vásquez González, A. (2001).

$$Q = 259.12 \frac{m}{dia}$$

Remoción de DBO y Sólidos suspendidos en función de la carga superficial.

$$\frac{259.12}{20} = 12.956 \text{ m}^2$$

Se propone un tanque circular, el diámetro es

$$d := \sqrt{\frac{4 \cdot 12.956}{\pi}} = 4.062 \text{ m}$$

Se ponen muros de 1m de profundidad, el volumen del tanque es
 4.062 m^3

El tiempo de retención a gasto medio es:

$$\frac{12.956}{259.12} = 0.05$$

d=102 horas

Tratamiento secundario

Discos biológicos

El sedimentador primario puede omitirse en las plantas con bio-torres y discos biológicos, siempre y cuando se efectuó un cribado adecuado antes de aplicar el agua residual sobre el medio, con el propósito de evitar la obstrucción de los espacios en el medio (César Valdez, E. y Vásquez González, A. 2001).

También son conocidos como filtros percoladores, filtros rociadores o biofísicos. Se proponen los discos biológicos porque este proceso es muy eficiente y barato ya que no tiene complejidad en su operación y en su mantenimiento (López, R, 1996), con esto tendría una disminución en el costo con respecto a otros métodos.

Los discos biológicos están formados por discos de plástico, sujetos y soportados por una flecha horizontal rotatoria. En la actualidad estos sistemas usan discos, o secciones de discos, de plásticos de alta densidad y de 1 a 1.5 mm de espesor. El sistema tiene aplicaciones en tratamientos secundarios y nitrificación. En estas aplicaciones los discos se posicionan dentro de los tanques, de tal forma que queda el 40% sumergido. Los discos rotan lentamente de 1 a 2 r/min, pero generalmente de 1.4 a 1.6 r/min mientras están en 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 que habitan 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 (Comisión Nacional del Agua. 2020).

Las etapas de los biodiscos consisten en subdivisiones que se le instalan al reactor, separando el volumen del reactor en diferentes tanques con el propósito de distribuir el material de soporte (discos). Cada etapa recibe una carga orgánica menor a la etapa anterior debido a la depuración o tratamiento continuo. Es recomendable dividir el reactor de biodiscos en etapas cuando se tiene altas cargas orgánicas y para maximizar la remoción de carbono y nitrógeno amoniacal (Pérez, J. 2010).

Se propone un reactor con 4 etapas.

En la tabla 3.7 se muestra la eficiencia de los discos biológicos y en la figura 3.9 la configuración típica de discos biológicos por etapas. La eficiencia de este proceso se encuentra en la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Eficiencia de los biodiscos

Parámetro	Eficiencia
DQO	68%
DBO	95%
Fósforo	38%
SST	70%
Nitrógeno (NTK)	90%
DBO 5	95%

Pérez, J. 2010.

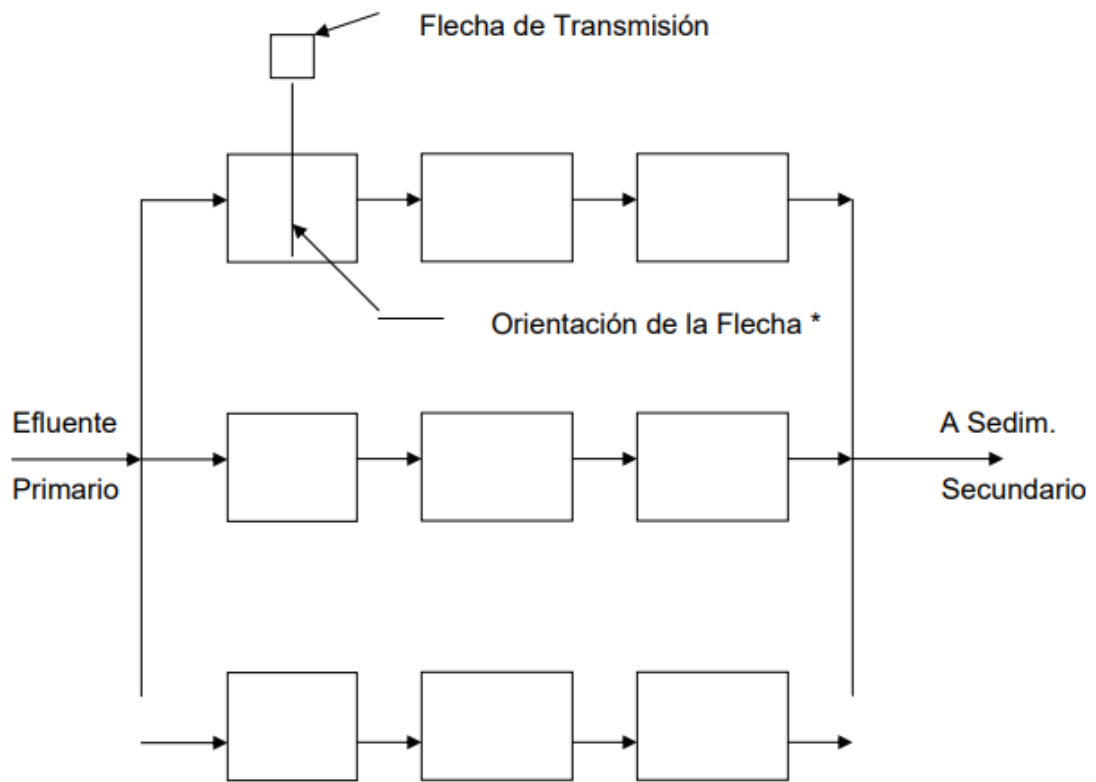


Figura 3.9 La configuración típica de discos biológicos por etapas.

CONAGUA (2007).

Con este método quedan los parámetros como se muestra en la tabla 3.8.

Tabla 3.8 Parámetros de remoción de los discos biológicos

Parámetro	Eficiencia	Valor antes de los biodiscos (mg/l)	Valor después de los biodiscos (mg/l)
DBO	95%	1040.55	52.0275
SST	70%	157.415	47.2245
DBO 5	95%	454	22.7

Diseño de los biodiscos

El procedimiento de diseño se basa en curvas empíricas de cargas suministradas por los fabricantes de los biodiscos, a partir de estas curvas puede estimarse la carga superficial, $\frac{m^3}{s \cdot m^2}$ para reducir una DBO dada en el efluente hasta el valor deseado de la DBO del efluente. El área superficial requerida para un caudal total es:

$$A = \frac{Q_0}{L}$$

Kornegay desarrollo un procedimiento de diseño.

Velocidad neta de cambio de sustrato en el reactor = Velocidad a la que el sustrato entra al reactor - Velocidad a la que el sustrato deja el reactor - Velocidad a la que el sustrato es oxidado en el reactor

En condiciones de equilibrio la concentración del sustrato en el reactor permanece constante y por tanto el primer miembro de la ecuación anterior se vuelve Cero

0 = Velocidad a la que el sustrato entra al reactor - Velocidad a la que el sustrato deja el reactor - Velocidad a la que el sustrato es oxidado en el reactor

Los dos primeros términos del segundo miembro de la ecuación se refieren a la disminución neta del sustrato debido a la acción hidráulica y se definen como:

Velocidad a la que el sustrato entra al reactor = $Q_0 S_0$

Velocidad a la que el sustrato deja el reactor = $Q_0 S_e$

La ecuación queda:

Velocidad a la que el sustrato = $\left(\frac{ds}{dt}\right)_A V_A - \left(\frac{ds}{dt}\right)_S V_S$

$$0 = Q_0 S_0 - Q_0 S_e - \left(\frac{ds}{dt}\right)_A V_A - \left(\frac{ds}{dt}\right)_S V_S$$

Sedimentador Secundario

Los tanques de sedimentación secundaria son generalmente circulares, pero también existen en forma rectangular, cuadrada, hexagonal y octagonal, sin embargo, esto no tiene influencia sobre la calidad del efluente. El mecanismo de remoción más usado es el de tipo cadena y paletas metálicas, el cual permite una remoción continua de sólidos. Para tanques circulares con tolvas, es recomendable una pendiente en el fondo de 1/12; pero si se emplea piso plano para el arreglo del mecanismo de remoción de lodos, se aconseja la disminución de la carga superficial en aproximadamente $7 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{d})$. La profundidad óptima de un tanque de sedimentación secundaria depende de muchas variables, la tendencia actual es el aumento de la profundidad para el mejoramiento de la eficiencia, pero es reconocido que un tanque poco profundo opera con igual eficiencia que un tanque con mayor profundidad si se mantiene un manto de lodo mínimo. A la vez, se considera que un manto de lodos gruesos mejora la concentración de sólidos del lodo y disminuye los requerimientos de recirculación y su tratamiento posterior. La estructura de entrada al sedimentador secundario se diseña para una velocidad de flujo menor a 0.6 m/s, para la minimización de la rotura del flóculo biológico, el rendimiento del sedimentador se mejora mediante plantillas interiores colocadas debajo del vertedero del efluente que permite el desvío del lodo que se levanta a lo largo de la pared del tanque. La carga de rebose sobre el vertedor de salida es generalmente

menor de 2.2 L/(m*s). En tanques rectangulares los vertedores adicionales se extienden en el último tercio del tanque, espaciados aproximadamente 3 m entre si (Comisión Nacional del Agua. 2020).

El diseño de sedimentadores secundarios es similar al de sedimentadores primarios, con la excepción de que en el diseño de sedimentadores para lodos activados se deben considerar grandes volúmenes de sólidos en licor mezclado. Aún más, el licor mezclado tiene la tendencia de fluir a la entrada del tanque como una corriente densa e interferir la separación de sólidos y el espaciamiento de los lodos. Para manejar exitosamente estas características se deben de considerar los siguientes factores (Comisión Nacional del Agua .2020):

- Tipo de tanque deseado
- Carga hidráulica superficial
- Carga de salida
- Velocidad de flujo
- Localización de vertedores y sobrecargas
- Recolección de material flotante

El efluente del tanque es distribuido por medio de baffles, y fluye a lo largo del tanque para salir sobre unos vertedores. La longitud máxima es de, aproximadamente, 91 metros y con profundidades de 3.7 a 4.6 metros. El equipo de remoción de sólidos consiste en un par de cadenas sin fin, con piezas de madera de 5 cm de espesor y de 15 a 20 cm de profundidad, localizadas a cada 3 metros. La velocidad lineal de las cadenas es de 0.6 a 1.2 m/minuto. También se utilizan rastrillos para la limpieza de los tanques, fijados a un puente móvil que viaja a lo largo de la unidad. La colección del material flotante se realiza al final del tanque en el efluente, y su remoción puede ser manual, hidráulica o mecánica (Comisión Nacional del Agua. 2020)

El sedimentador secundario tiene la finalidad de remover los sólidos sedimentables producidos por los discos biológicos y la DBO restante. Con este

método se tendrá un agua que cumple con los límites de las normas para descargar en ríos (Ramalho, R.S. 1996).

Diseño de sedimentador secundario.

Una vez teniendo los lodos se puede calcular el sedimentador secundario.

$$Q_{ml} = \frac{Q_{max}}{\#líneas} \text{ Gasto máximo por línea}$$

$$Ad = \frac{Q_{dcl}}{V_{caudal}} \text{ Sup. del decantador}$$

$$D = \frac{Ad * 4}{0.5 * \pi} \text{ Diámetro interno del decantador}$$

$$V_{cl} = \frac{Q_{dcl}}{\text{Tiempo medio de residencia del caudal}} \text{ Volumen del cilindro}$$

$$V_{cu} = \frac{V_{cl}}{Ad} \text{ Profundidad cilíndrica útil del decantador}$$

$$V_{Q_{max}} = \frac{Q_{ml}}{Ad} \text{ Velocidad a gasto máximo}$$

$$\theta = \frac{V_{cu}}{Q_{max}} \text{ Tiempo medio de residencia}$$

Tratamiento terciario

Humedales

Las plantas acuáticas flotantes, en especial el lirio acuático, tienen la capacidad de absorber gran cantidad de sustancias tóxicas que contenga el agua, pero a su vez tiene un gran problema, ya que podría ser una plaga si no se toman las debidas acciones para tener su crecimiento bajo control. En la actualidad se ha tomado la decisión de utilizarlo como filtro en vez de erradicarlo. Así, surge su utilización como filtro biológico (Lord, R. 1982).

Los procesos que intervienen en la remoción de contaminantes mediante los humedales artificiales se clasifican en (Comisión Nacional del Agua. 2020):

- Físicos (filtración, sedimentación y fisisorción).
- Químicos (precipitación, quimisorción, hidrólisis, oxidación y reducción).

- Biológicos (interacción de especies vegetales, microorganismos adheridos en las raíces de las plantas).

Los humedales eliminan contaminantes mediante varios procesos que incluyen sedimentación, degradación microbiana, acción de las plantas, absorción, reacciones químicas y volatilización. El funcionamiento de los humedales artificiales se fundamenta en tres principios básicos: la actividad bioquímica de microorganismos, el aporte de oxígeno a través de los vegetales durante el día y el apoyo físico de un lecho inerte que sirve como soporte para el enraizamiento de los vegetales, además de material filtrante. En conjunto, estos elementos eliminan material disuelto y suspendido en el agua residual y biodegradan materia orgánica hasta mineralizarla, permitiendo la formación de nuevos organismos. Los humedales tienen tres funciones básicas que les confieren atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales: fijan físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y materia orgánica, utilizan y transforman los elementos por medio de los microorganismos y logran niveles de tratamiento consistente con un bajo consumo de energía (Comisión Nacional del Agua. 2020).

El fitotratamiento, en este caso, se refiere al tratamiento de aguas contaminadas por medio de plantas superiores (macrófitas) en los humedales o sistemas acuáticos, ya sean estos naturales o artificiales. El término macrófitas, abarca a las plantas acuáticas visibles a simple vista, incluye plantas acuáticas vasculares, musgos, algas y helechos. Constituyen fotosistemas, porque emplean la energía solar a través de la fotosíntesis, básicamente, se trata de la captación de la luz solar y su transformación en energía química, que es usada en su metabolismo para la realización de funciones vitales, lo que asiste al tratamiento de las aguas.

Para este proyecto se opta por unos depósitos en paralelo o canales de un metro de profundidad, con un suelo impermeable y vegetación con profundidad de 0.1 m a 0.6 m, todo esto para la eliminación de los metales pesados (Lord, R. 1982).

El sistema utilizado será de tipo sub-superficial con flujo horizontal, empacados con 5 cm de tezontle de 2.54 cm de diámetro y 25 cm de grava de 0.635 cm de diámetro. Los Humedales se construirán en cajas de 72 cm de largo, 1 metro de profundidad y 38 cm de ancho.

Los porcentajes de remoción a las 24 horas es de Cr es del 64% y de Cd es de 84% (Paris, C. et al 2005).

En la tabla 3.9 se observa el porcentaje de remoción de varias especies de macrófitas flotantes, se tiene un porcentaje de remoción de metales pesados haciendo una combinación de las diferentes de las macrófitas flotantes.

Tabla 3.9 Eficiencia de remoción de contaminantes con macrófitas flotantes

Especie (nombre científico)	Nombre común	DBO	DQO	SS	P total	N total	As Arsénico	Fe Hierro	Mn Magnesio	Pb Plomo	Cu Cobre	Cr Cromo	Cd Cadmio	Zn Zinc
<i>Eichhornia crassipes</i>	Jacinto de agua común	37- 95	72.6-90.25	21-92	42.3 - 98.5	72.4 - 91.7	80	78.6-90.1	-	-	86-95	60-89	40-85	48-95
<i>Pistia stratiotes</i>	Repollito del agua o lechuga de agua	57-91.9	70.7-93.47	80.6	25-64.2	51.7 - 87.6	-	78.3-95	86.8-98.4	90-99.7	68-97.3	64-99.6	63-87	82-92
<i>Lemna minor</i>	La lenteja de agua común o lenteja de agua menor	94.4	-	-	67	89	5	78.47	95.2	98.55	77-90.41	96.94	-	97.56
<i>Lemna gibba</i>	Lenteja de agua	50-95.7	65.7	30-92	-	-	-	54.4	-	-	-	-	-	-
<i>Hydrocotyle umbellata</i>	Ombbligo de Venus	88.7	72.2	74.3	69-71.3	42.9 - 87.5	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Spirodela polyrrhiza</i>	Lenteja de agua	-	-	-	-	-	-	77.5-83.5	-	-	76-91	62-71	63-71	82-92
<i>Spirodela intermedia</i>	-	-	-	-	-	-	-	80.23	96.91	98.22	91.7	33.88	-	95.73
<i>Salvinia natans</i>	Helecho acuático	73.6-83.8	76.6-87.1	-	10.3 - 31.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Salvinia herzogii</i>	helechos acuáticos	-	-	-	-	-	-	-	-	90	-	64	84	-
<i>Salvinia rotundifolia</i>	Helechos acuáticos	-	-	-	-	-	-	-	-	85-95	-	-	-	-
<i>Azolla</i>	Helecho de agua, helecho flotante, doradilla o yerba del agua	69.6	-	-	60	52.4	60	-	-	-	-	-	-	-
<i>Egeria densa</i>	-	-	79.8-92.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Phragmites communis</i>	Carrizo	-	58.82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Dryan</i>	-	-	83.4	-	90.4	84	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Waseyutaka</i>	-	-	80.7	-	89.9	79.6	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Tachimasari</i>	-	-	85.4	-	88.3	80.3	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Hydromistia stolonifera</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	76	-

Martelo, J. Lara, J. (2012)

Con la mejor combinación de plantas se obtiene un porcentaje de remoción, pero, como no se pudo hacer un estudio en laboratorio para determinar el valor de remoción con diferentes combinaciones, se toma el valor más alto. Para los

porcentajes que vienen en rango, se obtendrá un promedio a esos valores, porque desconoce los factores que pueden afectar a la eficiencia. Con lo descrito anteriormente se obtiene un porcentaje de remoción como se muestra en la tabla 3.10, mientras que en la tabla en la tabla 3.11 el resultado de remoción.

Tabla 3.10 Porcentaje calculado de remoción de metales pesados

As (Arsénico)	Fe (Hierro)	Mn (Magnesio)	Pb (Plomo)	Cu (Cobre)	Cr (Cromo)	Cd (Cadmio)	Zn (Zinc)
80	86.65	96.91	98.22	91.7	96.94	84	97.56

Tabla 3.11 Remoción de metales pesados en el efluente.

Determinación	Unidades	Resultado	Eliminación en % (método)	Resultado
Mercurio	mg/l	0.0009	-	0.0009
Plomo	mg/l	0.56	Humedales 90%	0.056
Arsénico	mg/l	0.0076	Humedales 80%	0.00152
Cadmio	mg/l	0.05	Humedales 84%	0.008
Cobre	mg/l	0.05	Humedales 91.7%	0.00415
Cromo	mg/l	0.05	Humedales 96.94%	0.00153
Níquel	mg/l	0.05	-	0.05
Plomo	mg/l	0.1	Humedales 64%	0.005
Zinc	mg/l	0.0937	Humedales 97.56%	0.00228628

Desinfección

Se propone una desinfección de lámparas de luz ultravioleta, por su eficacia al eliminar el 99.99% de agentes patógenos y su mejor costo-beneficio (López, R, 1996).

Con la dosis adecuada, la radiación ultravioleta (UV) es un bactericida y eliminador de virus efectivo que no forma subproductos tóxicos. El espectro electromagnético de la radiación UV es de 100 a 400 nm y la máxima acción germicida se ubica en el rango de 220-320 nanómetros. La radiación UV se produce cuando lámparas con mercurio son sometidas a un arco eléctrico y la energía generada por la excitación del vapor de mercurio resulta en la emisión de radiación. Uno de los aspectos relevantes es que la hidráulica del sistema permita velocidades uniformes para el logro de un tiempo de exposición apropiado. Si bien las coliformes dispersas son inactivadas fácilmente al estar expuestas directamente a la radiación UV, cuando estas se encuentran asociadas a partículas se forma un escudo que impide su destrucción, lo que en algunos casos resulta en un residual de bacterias a la salida del proceso. Como ventajas presenta mayor efectividad a comparación del cloro en la inactivación de virus, esporas y quistes; así mismo, no incrementa la concentración de sólidos disueltos y es más segura, pues elimina la necesidad de almacenamiento de químicos peligrosos. En contraste, como desventaja se enlista que no presenta un efecto residual, genera un mayor consumo de energía y reduce su efectividad debido a los contaminantes disueltos presentes en el agua, los cuales afectan la absorción y atenúan el efecto de la radiación (Comisión Nacional del Agua. 2020).

Se propone un Sistema Uv de canal abierto con lámparas de 15W, con una distancia de 2 metros y un tiempo de 1 hora.

Con este método de 740.33 NMP/100 ml terminamos con 7.4 NMP/100 ml.

Filtros de carbono

El carbón activo es el más popular adsorbente, aunque puede ser bastante caro el carbón activo comercial, hay investigaciones donde producen carbón activo con productos naturales. Con este método se eliminan los colorantes que tiene el agua (López, R, 1996).

El carbón activado granular es generalmente usado en el tratamiento de aguas residuales para absorber los materiales orgánicos solubles. El carbón es empacado en un tanque de tal manera que forme una cama filtrante. Los tanques son regularmente circulares para sistemas a presión, o rectangulares para sistemas con flujo por gravedad. Una vez que la capacidad de adsorción del carbón haya sido totalmente utilizada, este debe ser desechado o regenerado. Generalmente, se utilizan varios tanques para asegurar una operación continua. Las columnas o tanques pueden ser operados en serie o paralelo. Todos los tanques deben de contar con mecanismos de remoción y alimentación de carbón para permitir la remoción del carbón usado y la adición de material nuevo. El flujo de agua a través del carbón puede ser ascendente o descendente. Las unidades deben ser retro lavadas periódicamente (Comisión Nacional del Agua. 2020).

La absorción con carbonos activos ofrece buenos rendimientos de eliminación de colorantes, cercanos al 95% de decoloración, pero el carbón activo tiene un costo elevado y solo es reutilizable un cierto número de veces (Vilaseca, M. et. al. 2020).

Con este método de tener 600 U Pt-Co se tendrá 30 U Pt-Co.

En la tabla 3.12 se muestra el resultado del tren de tratamiento, donde se puede observar el resultado de su implementación, y se comparan los resultados con los que dice la NOM 001-Semarnat-1996. Con esto se observa que todos los parámetros quedan en norma.

Tabla 3.12 Comparación de resultados

Determinación	Unidades	Resultado	Resultado después del tren de tratamiento	Parámetro que marca la norma NOM 001
pH	-	9.5	9.5	5.5-10
Sólidos disueltos totales	mg/l	314.83	47.2245	-
Grasas y aceites	mg/l	115.644	23.1288	25 mg/l
Coliformes fecales	NMP/100 ml	740.33	7.4033	2000 NMP/100 ml
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/l	2973	52.0275	150 mg/l
Mercurio	mg/l	0.0009	0.0009	0.01 mg/l
Plomo	mg/l	0.56	0.056	0.4 mg/l
Arsénico	mg/l	0.0076	0.00152	0.1
Cadmio	mg/l	0.05	0.008	0.1
Cobre	mg/l	0.05	0.00415	4
Cromo	mg/l	0.05	0.00153	0.5
Níquel	mg/l	0.05	0.05	2
Plomo	mg/l	0.1	0.005	0.2
Zinc	mg/l	0.0937	0.00228628	10
Color	U Pt-Co	600	30	-
DBO 5 total	mg/l	454	22.7	30

Capítulo 4 Conclusiones

El objetivo general de esta investigación fue proponer un tren de tratamiento para la remoción de metales pesados presentes en el agua residual en la industria textil, esta propuesta tuvo una eficiencia del 80 al 99% de remoción teórica de los contaminantes con forme a la normativa nacional dada por la NOM-001-SEMARNAT-1996, se tomó un caso hipotético de los datos de la literatura.

Se investigo la historia de la industria textil a nivel internacional y nacional, su impacto en la economía y su crecimiento a lo largo del tiempo. Se identificaron los procesos unitarios involucrados en la Industria Textil, desde la generación de fibras hasta la confección de prendas de vestir, algunos de estos procesos son el de cribado, hilado, encolado, tejido, desencolado, descrude, blanqueado, teñido y enjuagado, por otro lado, se establecieron las fuentes de generación de aguas residuales en la Industria Textil, en la composición de los efluentes, generados los contaminantes que adquiere el agua, son cambio en el pH, adición de grasas y aceites, incremento en la DBO, adición de color, etc.

Se analizó y sintetizó la información referente a el tratamiento de aguas residuales en diferentes fuentes bibliográficas, los contaminantes que pueden llegar a tener las aguas residuales, la generación de estas aguas a nivel mundial y nacional, las plantas de tratamiento que existen en México y los tratamientos que se tienen en la actualidad (tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario). Con esto se pudo definir el tren de tratamiento más eficiente para los parámetros que se establecieron en esta investigación.

Por otra parte, se investigó la normatividad nacional e internacional para el tratamiento de aguas residuales en la industria textil. En la legislación mexicana, como en las de la mayoría de los países del mundo, hay leyes y normas que regulan las descargas y el tratamiento previo que debe tener el efluente antes de su descarga, ya sea en un río, embalses naturales o artificiales, aguas costeras y en el suelo, con esto se pude determinar la calidad física, química y biológica del agua,

para poder ser reutilizadas en uso agrícola, público, explotación pesquera, recreación, etc.

En el análisis realizado se obtuvieron datos teóricos y con ellos se definió el destino final del agua tratada a un río o para reincorporarse al proceso, ya que, con la propuesta del tren de tratamiento y la eficiencia se alcanzaron los valores de la normatividad vigente en el país.

Referencias bibliográficas

- Agencia de Información y Noticias Científica. (2019). Las sustancias químicas de la ropa pueden perjudicar tu salud. El universal. Recuperado el 22 de agosto de 2019, de <https://www.eluniversal.com.mx/ciencia-y-salud/salud/las-sustancias-quimicas-de-la-ropa-pueden-perjudicar-tu-salud>
- Arredondo, C. (2013). Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales para la zona de Amanalco de Becerra, Estado de México. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Arrollo López, M., y Cárcamo Solís, M., (2010). La evaluación histórica e importancia del sector textil y del vestido en México. En *Economía y sociedad*, vol. XIV, núm. 25. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=51015546004>
- Bellini, C., (2009). Dossier La industria textil en América Latina. *Revista de historia de la industria Argentina y latinoamericana*. Año 3- (5), segundo semestre de 2009. Recuperado el 21 de octubre de 2019 de http://bibliotecadigital.econ.uba.ar/download/hindustria/hindustria_v3_n5_01.pdf.
- Buitrón, G., (2015). Tratamiento de aguas residuales de la industria textil. El universal. Recuperado el 22 de agosto de 2019, de <http://www.eluniversalqueretaro.mx/content/tratamiento-de-aguas-residuales-de-la-industria-textil>
- Carrión, S. (2014). Diseño de un reactor electroquímico para el tratamiento de aguas residuales con electrodos basados en materiales textiles. Tesis de licenciatura. Universidad Politécnica de Valencia.
- Carvalho, J.C., Bessegato G.G. y Zanoni, M.V. (2016). Efficiency comparison of ozonation, photolysis, photocatalysis and photoelectrocatalysis methods in real textile wastewater decolorization. *Water Res.* 98
- Cavides, R. [et al.] (2005). Tratamiento para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales Industriales: Una revisión. En *revista Ingeniería y Región*, vol. 13 (1): 73-90. Consultado el 4 de marzo de 2020 de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5432290>
- Cegarra, J., (1997). BOL. INV. Textil TARRASA N°69: La investigación textil en Europa. Recuperado el 10 de septiembre de 2019 de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/6102/Article04.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cerecedo, L. (2013). Selección y determinación de dosis de reactivos químicos para la optimización económica de un proceso de tratamiento de aguas residuales

provenientes de la industria textil. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México

César, V. y Vázquez, 2001. Cap. 1 Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales (p. unidad 1.2- unidad 1.6). México: UNAM, Facultad de ingeniería.

Comisión Económica para América Latina de las Naciones Unidas (1968). La industria textil en América latina. Washington: CEPAL, ILPES, BID. Recuperado el 22 de octubre de 2019 de repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/29220/S6800200_es.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Comisión Nacional del Agua (2018). Estadísticas del agua en México. México: CONAGUA: SEMARNAT. Consultado el 25 de octubre de 2019 de <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM2018.pdf>

Comisión Nacional del Agua [2020]. Manual de agua potable, alcantarillada y saneamiento: Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: pretratamiento y tratamiento primario. México: SEMARNAT. Consultado el 26 de junio de 2020 de <http://cmx.org.mx/wp-content/uploads/MAPAS%202015/libros/SGAPDS-1-15-Libro26.pdf>

Comisión Nacional del Agua [2020]. Manual de agua potable, alcantarillada y saneamiento: Introducción al tratamiento de aguas residuales municipales. México: SEMARNAT. Consultado el 26 de junio de 2020 de <http://cmx.org.mx/wp-content/uploads/MAPAS%202015/libros/SGAPDS-1-15-Libro25.pdf>

Comisión Nacional del Agua [2020]. Manual de agua potable, alcantarillada y saneamiento: Diseño de planta de tratamiento de aguas residuales municipales: Humedales artificiales. México: SEMARNAT. Consultado el 26 de junio de 2020 de <http://cmx.org.mx/wp-content/uploads/MAPAS%202015/libros/SGAPDS-1-15-Libro30.pdf>

Comisión Nacional del Agua [2007]. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Sistemas alternativos de tratamientos de aguas residuales y lodos producidos. México: CONAGUA. Consultado el 24 de julio de 2020 de <file:///D:/Descargas/Sistemas%20Alternativos%20de%20Tratamiento%20de%20Aguas%20Residuales%20y%20Lodos%20Producidos.pdf>

Cortina, C. Marques, R. (2008). Alternativas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil. Tesis de Licenciatura. IPN.

Crespi, M. (1996). Depuración de aguas residuales en la industria de los tensoactivos. En Boletín Intexter (U.P.C). No. 10: 49-58. Consultado el 4 de marzo de 2020 de https://www.researchgate.net/publication/39433838_Depuracion_de_las_aguas_residuales_en_la_industria_de_los_tensioactivos

- Flores, G. E. (2004). Evaluación de la contaminación generada por el vertido de aguas residuales provenientes de la industria textil en Zinapécuaro, Michoacán. Tesis de Maestría en ciencias en textil. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Textil.
- Gil, M. (2006). Depuración de aguas residuales: Modelación de proceso de lodos activados. 2ª ed. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas
- Hollen, N. (1987) Introducción a los textiles. México: Limusa.
- Kapnur, S. y Passarielo, C. (2015). África es el nuevo imán de la industria textil. En el diario de la Nación. Sección The wall Street Journal: Economía. Argentina. Consultado el 21 de octubre de 2019 de <https://www.lanacion.com.ar/economia/africa-es-el-nuevo-iman-de-la-industria-textil-nid1810536>
- Langford, M. y Khalfan, A. (2016). Introducción al agua como derecho humano. En la gota de la vida: hacia una gestión sustentable y democrática del agua. México: Fundación Henry Böhl.
- López, R. (1996). Apuntes de tratamiento de aguas residuales. México: UNAM, Facultad de ingeniería.
- Lord, R. (1982). Uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales. México, Organización Panamericana de la salud.
- Martelo, J. Lara, J. (2012). Macrófitas flotantes en el sistema de aguas residuales: una revisión del estado del arte. Ingeniería y ciencia, ing. cienc. Volumen 8, número 15. Recuperado el 15 de agosto del 2020 de <http://www.scielo.org.co/pdf/ince/v8n15/v8n15a11.pdf>
- Miranda, E., (2019). Aguas residuales de la industria textil. Recuperado el 20 de agosto de 2019 de http://www.aguasimple.org.mx/revistav4/index.php?option=com_content&view=article&id=272:i-que-podemos-hacer-contr-a-las-sequi-as&catid=45:notas-de-agua-v4&Itemid=6
- Oliveras, J., (2020). Canal Parshall, el aforador con casi un siglo de Historia. Recuperado de <https://www.iagua.es/blogs/jordi-oliveras/canal-parshall-aforador-casi-siglo-historia> el 27 de abril de 2020.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (2017). Aguas residuales: el recurso no explotado: Informe Mundial de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. UNESCO.
- Paris, C. et al (2005). Eficiencia de dos macrófitas flotantes en la absorción de metales pesados. Limnetica, 24 (3-4): 237-244. Recuperado el 15 de agosto de 2020 de https://www.limnetica.org/Limnetica/Limne24/L24b237_absorcion_metales_macrofitos.pdf

- Peña; M. (2019). Los procesos textiles en Asia. En el Diario Exterior, El análisis y la opinión. 15 de oct. 2019. Recuperado de <https://www.eldiarioexterior.com/las-empresas-textiles-en-asia-42185.htm> el 15 de octubre de 2019.
- Pérez, J. (2010). Aplicación y evaluación de un reactor de contactores biológicos rotativos (RCB o BIODISCOS) a escala laboratorio como tratamiento de los lixiviados generados en el relleno sanitario de la pradera. Tesis de Maestría. Universidad de Medellín.
- Pérez, J. (2015). Tratamiento de aguas residuales industriales con procesos de oxidación avanzada: ozonación y oxidación anódica. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pérez. L, Rodríguez, A., (2015). La importancia del sector Textil-Vestido en México. <https://www.milenio.com>. Recuperado de <https://www.milenio.com/opinion/varios-autores/ciencia-tecnologia/la-importancia-del-sector-textil-vestido-en-mexico> el 14 de septiembre de 2019
- Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas (2017). Informe Mundial de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas Residuales: El recurso no explotado. Paris: WWAP, UNEESCO.
- Ramalho, R.S. (1996). Tratamiento de aguas residuales. Barcelona; México: Editorial Reverte S.A.
- Sacar-Larrota, I. [et al]. (2018). Análisis de la eficiencia de reactores UASB en una planta de tratamiento de aguas residuales Municipales. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Minas.
- Salazar, I., Crespi, M., Salazar, R. (2009). Tratamiento de aguas residuales mediante un biorreactor de membrana. Ingeniería y desarrollo, Núm. 26 (84-85)
- Salinas, M. (2011). Evaluación de un sistema de biofiltración y humedales para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Teqma. (2020). Desengrasada AEROFLO, flotación de partículas, aceites y grasas y cualquier tipo de flotante mediante aireación que induce también el desarenador. Barcelona, España. Teqma tecnología y equipos para el medio ambiente. Recuperado el 14 de agosto de 2020 de <https://www.teqma.com/desengrasado-aeroflo/>
- Vera, M. (2019). Evaluación de metales pesados en *Chirostama jordani* (Woolman 1894) en el canal de Cuemanco: Xochimilco, Ciudad de México. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Vilaseca, M. et al. (2020). Métodos de eliminación del color en efluentes de tintura textil. Universidad de Cataluña. Recuperado el 14 de agosto de 2020 de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/28332/Vilaseca,+Merc%E8.+M%E9todos+de+eliminaci%F3n+del+color+en+efluentes+de+tintura+textil.pdf;jsessionid=857DC8F37EACECC18B3E72D868F445A8?sequence=3>
- Villalobos-Guateros y Ruíz-Martínez, L. (2019). Estrategias para la gestión integrada y sustentable del recurso hídrico en el municipio de Pauna (Boyacá). En Revista de Ingeniería Solidaria, vol. 25 (1): 1-30. Consultado el 4 de marzo de 2020 de https://www.researchgate.net/publication/335447663_Estrategias_para_la_gestion_integrada_y_sostenible_del_recurso_hidrico_en_el_municipio_de_Pauna_Boyaca
- Warshaw, L., (2000). La industria textil: historia y salud y seguridad. Industria de productos textiles. España recuperado de <https://www.insst.es/documents/94886/161971/Cap%C3%ADtulo+89.+Industria+de+productos+textiles>
- Zaikov. E., et al. (2017). Heavy metal pollutants and other pollutants in the environment: biological aspects. Ontario, Canada. Apple Academic Press. Recuperado de <https://www-taylorfrancis-com.pbidi.unam.mx:2443/books/e/97813105366029>