

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA



Tratamiento de aguas residuales para su reutilización en riego de áreas verdes

Por:

CYNTHIA GUADALUPE MUÑOZ MÁRQUEZ

MONOGRAFÍA

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

Torreón, Coahuila, México

Febrero 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA

Tratamiento de aguas residuales para su reutilización en riego de áreas verdes

Por:

CYNTHIA GUADALUPE MUÑOZ MÁRQUEZ

MONOGRAFÍA

Que se somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES


DR. ISAÍAS LÓPEZ HERNÁNDEZ
Presidente

Aprobada por:


DR. MIGUEL ÁNGEL URBINA MARTÍNEZ
Vocal


M.C. MELISA CONCEPCIÓN HERMOSILLO ALBA
Vocal


M.C. GERARDO ZAPATA SIFUENTES
Vocal Suplente


DR. ISAÍAS DE LA CRUZ ÁLVAREZ
Coordinador Interino de la División de Carreras Agronómicas

Torreón, Coahuila, México
FEBRERO 2020

Universidad Autónoma Agraria
ANTONIO NARRO



COORDINACIÓN DE LA DIVISIÓN
DE CARRERAS AGRONÓMICAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA

Tratamiento de aguas residuales para su reutilización en riego de áreas verdes

Por:


CYNTHIA GUADALUPE MUÑOZ MÁRQUEZ

MONOGRAFÍA

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

Aprobada por el Comité de Asesoría:


DR. ISAÍAS LÓPEZ HERNÁNDEZ
Asesor Principal


DR. MIGUEL ÁNGEL URBINA MARTÍNEZ
Coasesor


M.C. MELISA CONCEPCIÓN HERMOSILLO ALBA
Coasesor


M.C. GERARDO ZAPATA SIFUENTES
Coasesor


DR. ISAÍAS DE LA CRUZ ÁLVAREZ
Coordinador Interino de la División de Carreras Agronómicas

Torreón, Coahuila, México
FEBRERO 2020

Universidad Autónoma Agraria
ANTONIO NARRO



COORDINACIÓN DE LA DIVISIÓN
DE CARRERAS AGRONÓMICAS

AGRADECIMIENTOS

A mi **Dios**, por haberme dado la oportunidad de culminar con éxito mi carrera, por darme fuerzas para superar los obstáculos y dificultades a lo largo de toda mi vida y por darme una vida llena de amor, aprendizajes y maravillosas experiencias.

A la **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**, por abrirme las puertas y otorgarme las herramientas necesarias para mi formación profesional, por darme grandes amistades y bonitas experiencias que en ella viví.

Gracias al **Dr. Isaías López Hernández**, por su apoyo, paciencia y por compartir su conocimiento en la realización de este proyecto, por todo muchas Gracias.

A la **M.C. Melissa Concepción Hermosillo Alba** por ser sin duda la mejor tutora, por apoyarme durante toda mi carrera, por sus grandes consejos y por su apoyo en este trabajo.

A mis asesores por compartir conmigo todos sus conocimientos, por el apoyo que me brindaron en esta etapa.

A todos mis **maestros**, por ese gran esfuerzo de brindarme todos sus conocimientos y por aclarar todas las dudas que en su momento surgieron durante el trayecto de mi carrera.

A **Cecy** por ser una gran persona y ayudarme durante toda la carrera.

DEDICATORIAS

A mi **Dios**, por tantas cosas hermosas que me ha dado en mi vida.

A mis padres, **María Luisa Márquez Ramos** y **Gilberto Muñoz Guzmán** por brindarme su apoyo incondicional, por su paciencia y su amor. Con todo mi cariño, respeto y amor por haberme enseñado e inculcado desde los inicios de la vida los buenos principios morales, por todo su amor, cariño y comprensión en todo los momentos de la vida, por confiar en mí y sobre todo por ese gran esfuerzo y sacrificio de encaminarme hacia los caminos del saber, la excelencia y la superación personal.

A mi amado esposo **Alex**, quien ha sido el gran amor de mi vida, quien me ha apoyado en todo momento, por su amor, paciencia, comprensión, cariño y por la motivación que me brinda.

A mí amado hijo **Alex**, que es el motor de mi vida, el detonante de mi felicidad, de mi esfuerzo, de mis ganas de seguir.

A mis hermanos **Gilberto** y **Luis Eduardo** que siempre me han apoyado en todos los momentos buenos y malos, que han creído en mí.

A mis amigas, **Mariana** y **Vanessa** por todos los buenos y bellos momentos que hemos compartido, por hacer de la universidad la mejor experiencia de la vida y por estar conmigo en todo momento.

RESUMEN

El suministro del agua cada vez se está sobreexplotando, debido a las necesidades domésticas, industriales y de agricultura.

Un tratamiento al agua residual sería una solución o minimizaría los problemas en cuanto a la contaminación del agua y el recurso hídrico ya que el suministro no sería directamente de las aguas subterráneas.

En México las aguas residuales que son tratadas corresponden a un bajo porcentaje, el agua que se utiliza para el riego de áreas verdes no es sometida a un tratamiento previo, esto es causante de enfermedades a los seres humanos y repercusiones al medio ambiente.

Por ello, es importante implementar un sistema de tratamiento de aguas residuales para su reuso en riego de espacios verdes, ya que es muy factible y amigable con el medio ambiente.

Un sistema de tratamiento de aguas residuales se considera como una alternativa viable para aumentar la disponibilidad local de recursos hídricos, además permite la reutilización del agua con los parámetros que la normatividad nacional requiere para el uso de agua tratada en el riego de áreas verdes.

El sistema de tratamiento de aguas residuales más utilizado para el reuso en riego de áreas verdes es el de lodos activados, ya que el agua que se obtiene de este proceso se puede usar en esta actividad. La calidad de agua obtenida es apta para el riego de áreas verdes de acuerdo a lo establecido en las NOM-001-SEMARNAT-1996 Y NOM-003-SEMARNAT-1996.

PALABRAS CLAVE: Reuso, Aguas residuales, Áreas verdes, Tratamiento de aguas, Calidad del agua

ABSTRACT

The water supply is becoming over-exploited due to domestic, industrial and agricultural needs.

Wastewater treatment would be a solution or minimize problems with water and water plant contamination as the supply would not be directly from groundwater.

In Mexico the wastewater that is treated corresponds to a low percentage, the water used for irrigation of green areas is not subjected to prior treatment, this causes diseases to humans and environmental impacts.

Therefore, it is important to implement a wastewater treatment system for reuse in irrigation of green spaces, as it is very feasible and environmentally friendly.

A wastewater treatment system is considered as a viable alternative to increase local availability of water resources, and also allows water reuse with the parameters that national regulations require for the use of water treated in the irrigation of green areas.

The most commonly used wastewater treatment system for reuse in irrigation of green areas is that of activated sludge, since the water obtained from this process can be used in this activity. The water quality obtained is suitable for irrigation of green areas in accordance with NOM-001-SEMARNAT-1996 and NOM-003-SEMARNAT-1996.

KEY WORDS: Reuse, Wastewater, Green Areas, Water Treatment, Water Quality

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIAS	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
INTRODUCCIÓN	1
REVISIÓN DE LITERATURA	3
El agua	3
Importancia del agua en la vida cotidiana	4
Problemática del agua en México	4
Problemática de agua en Torreón	4
Usos del agua	5
Uso del agua en la agricultura	6
Uso del agua en la industria	7
Uso de agua en producción de energía	7
Uso del agua para abastecimiento público	7
Calidad del agua	8
Evaluación de la calidad del agua	8
Contaminación del agua	9
Principales causas de contaminación del agua	9
Contaminación de aguas subterráneas	10
Orígenes de la contaminación de aguas subterráneas	10
Aguas residuales	10
Origen de las aguas residuales	11
Características del agua residual	12
Composición del Agua Residual	12
Propiedades físicas	15

Temperatura	15
Color.....	15
Olor.....	16
Turbidez.....	16
Solidos totales	16
Solidos sedimentables	16
Solidos disueltos totales	17
Propiedades químicas	17
pH.....	17
Dureza	17
DBO ₅	18
DQO.....	18
Nitrógeno.....	18
Fosforo.....	20
Cloruro	20
Grasas y aceites	20
Materia orgánica	21
Carbono orgánico total.....	21
Detergentes	21
Metales pesados y cianuros.....	22
Arsénico	22
Cadmio.....	22
Cobre.....	23
Cromo.....	23
Cianuros.....	23
Mercurio	24
Níquel	24
Plomo	25
Propiedades biológicas	25
Coliformes fecales	26
Huevos de helminto.....	26

Tratamiento de las aguas residuales	26
Pre-tratamiento	29
Tamices	30
Desarenadores	30
Desengrasadores.....	30
Pre-aireación.....	31
Tratamiento primario	31
Cribado	32
Sedimentación.....	32
Flotación	32
Homogeneización	33
Neutralización.....	33
Tratamiento Secundario	33
Tratamientos aerobios	34
Lagunas aireadas.....	34
Discos biológicos.....	34
Lagunas de estabilización.....	35
Percoladores	35
Tratamiento por Lodos activados	36
Lodos activados convencional	36
Aireación prolongada.....	37
Estabilización por contacto	37
Aireación decreciente	37
Mezcla completa convencional	38
Aireación extendida	38
Zanjas de oxidación.....	38
Tratamientos anaerobios.....	38
Lagunas anaerobias	39
Filtro anaerobio.....	39
Lecho Expandido	39
Tratamiento terciario	39

Micro-tamizados.....	40
Filtración.....	40
Precipitación, coagulación y floculación	40
Adsorción	40
Intercambio iónico.....	41
Osmosis Inversa	41
Cloración	41
Ozonización	42
Aguas residuales para reúso en el medio urbano	43
Plantas de tratamiento de aguas residuales.....	44
Plantas de tratamiento en la región norte del país	46
Tratamientos utilizados para aplicarlo en el riego de áreas verdes en la región norte de México	50
Sistemas de tratamiento de aguas residuales para riego de áreas verdes .	50
Ventajas de la utilización de aguas tratadas	53
Legislación del agua.....	53
Legislación para la contaminación del agua	54
Normatividad para la contaminación del agua en México	54
NOM-001-SEMARNAT-1996	54
NOM-002-SEMARNAT-1996	56
NOM-003-SEMARNAT-1997	57
CONCLUSIÓN.....	58
REFERENCIAS	59

Índice de tablas

Tabla 1. Usos del agua (INEGI, 2011).	5
Tabla 2. Componentes de interés en tratamiento de agua residual y en el riego con agua residual regenerada (Stuart, 1990)	14
Tabla 4. Pre-tratamientos y sus objetivos (Rojas, 2002).	28
Tabla 5. Tipos de tratamientos (Ramalho, 2003b).	29
Tabla 6. Plantas de tratamiento de Baja California que usan sus efluentes en riego de áreas verdes (CONAGUA, 2015)	47
Tabla 7. Plantas de tratamiento de aguas residuales de Baja California Sur que usan su agua tratada en riego de áreas verdes (CONAGUA, 2015)	47
Tabla 8. Plantas de tratamiento de aguas residuales del estado de Chihuahua que reúsan el agua en el riego de áreas verdes (CONAGUA, 2015)	48
Tabla 9. Plantas de tratamiento de Estado de Coahuila que reúsan el agua tratada en riego de áreas verdes (CONAGUA, 2015)	48
Tabla 10. Plantas de tratamiento de aguas residuales del municipio de Torreón, Coahuila (CONAGUA, 2014).	49
Tabla 11. Plantas de tratamiento de aguas residuales del estado de Durango que reutilizan el agua en riego de áreas verdes (CONAGUA, 2015)	49
Tabla 12. Plantas de tratamiento de aguas residuales de Sonora que reúsan sus efluentes en riego de áreas verdes (CONAGUA, 2015)	50
Tabla 13. Procesos utilizados en la región norte de México para reúso de efluentes en riego de áreas verdes	50
Tabla 14. Límites máximos permisibles para riego de áreas verdes de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996.	55
Tabla 15. Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996	56
Tabla 16. Límites Máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado de acuerdo a la NOM-002-SEMARNAT-1996	57

Tabla 17. Límites MÁXIMOS permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público de acuerdo a lo establecido en la NOM-003-SEMARNAT-1997..... 57

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Distribución de volumen por agrupaciones de actividades (CONAGUA, 2016b).....	6
Ilustración 2. Tratamiento de aguas residuales respecto al caudal generado 1998-2014 (SEMARNAT, 2015).....	27
Ilustración 3. Diagrama general del proceso de tratamiento de aguas residuales (Mujeriego, 1990b)	43
Ilustración 4. Plantas de tratamiento en operación y caudal de aguas residuales 2008-2018 (CONAGUA, 2015).....	45
Ilustración 5. Plantas de tratamiento de aguas residuales por región norte (CONAGUA, 2015).....	46

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso preciado y que cada vez es más escaso, este recurso es esencial para los ecosistemas y también para el ser humano. Sin el agua simplemente no habría vida. A pesar de que el agua es un recurso renovable, en la actualidad nos enfrentamos a una crisis a nivel mundial debido a ciertos factores como son: el rápido aumento de la población que conlleva a un gran aumento en el consumo de agua; la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas; y cambios a largo plazo en el ciclo del agua debido al cambio climático (Pasqualino *et al.*, 2010). El inadecuado uso y manejo del agua también es causante del problema de escasez de este recurso.

Las fuentes de abastecimiento de agua se encuentran principalmente en forma de ríos, glaciares, canales, agua de lluvia, aguas subterráneas, etc. Este recurso hídrico representa un papel vital, ya que no solo se necesita como agua potable, también influye en actividades económicas como la ganadería, la agricultura, actividades industriales, pesca, energía hidroeléctrica y otras actividades (Tyagi *et al.*, 2013a; Valdes-Ramos *et al.*, 2019) como lo son el riego de áreas verdes pertenecientes a uso recreativo del abastecimiento público.

Ante tal problemática, se han planteado diversas estrategias, una de ellas es el tratamiento de aguas residuales, como uno de los medios para remediar la contaminación del agua, y de esta manera contribuir al desbalance hídrico, dado que se puede reutilizar el agua del efluente tratado (Diaz-Cuenca *et al.*, 2012).

Por ello, es indispensable realizar análisis de calidad de aguas residuales para una gestión sostenible del agua. Como parte importante se debe de proporcionar estrategias para un buen manejo del recurso renovable (Sun *et al.*, 2016).

Gran parte del agua que se utiliza en el ámbito doméstico e industrial debe ser previamente sometida a tratamiento para disminuir el nivel de contaminación. Por lo tanto, un diseño de sistemas de tratamiento y reúso de agua es necesario para asegurar el uso sostenible y rentable del agua (Quaglia *et al.*, 2013).

Sin embargo, en México las aguas residuales que son tratadas corresponden a un bajo porcentaje, el agua residual que se utiliza para el riego de áreas verdes no es sometida a un tratamiento previo, esto es causante de enfermedades a los seres humanos y repercusiones al medio ambiente (Reynolds, 2002).

En Torreón, Coahuila la creciente población y la baja precipitación en la zona incrementa la demanda de este recurso, es por ello la importancia de la reutilización de agua en esta región (Guzmán-Soria *et al.*, 2006).

Por ello es importante el tratamiento de aguas residuales, destinadas al reúso en riego de áreas verdes, ya que se puede evitar el consumo excesivo del agua subterránea, así mismo las descargas al alcantarillado de la ciudad.

Finalmente, la reutilización de efluentes tratados proporciona un suministro regular a los usuarios y ayuda para asegurar la calidad desde un punto de vista sanitario y ambiental (Iglesias *et al.*, 2010).

REVISIÓN DE LITERATURA

El agua

El agua es un compuesto que se forma a partir de la unión, mediante enlaces covalentes, de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno; su fórmula molecular es H_2O y se trata de una molécula muy estable. Puesto que los átomos de hidrógeno y oxígeno en la molécula contienen cargas opuestas, moléculas de agua vecinas se atraen entre sí. Esta estructura permite que muchas moléculas iguales se unan con gran facilidad, formando enormes cadenas que constituyen el líquido que da la vida a nuestro planeta. El agua es una sustancia elemental que permite la vida en nuestro planeta, es un líquido incoloro, inodoro e insípido, que en grandes masas adquiere un color azul (AGUA, 2014).

Es un recurso renovable y abundante en el planeta (Lyu *et al.*, 2016). El recurso más importante para la vida, un recurso natural primordial y un valioso activo nacional (Valdes-Ramos *et al.*, 2019). Sin embargo, la disponibilidad y calidad del agua, ya sea superficial o terrestre, se han deteriorado debido a algunos factores importantes como el aumento de la población y la industrialización, que con llevan a una creciente demanda de agua (Tyagi *et al.*, 2013b).

En un contexto de nueva cultura del agua es necesario fomentar el control, la gestión y el uso racional en todos sus usos. Tradicionalmente el manejo del riego en espacios verdes se ha realizado siguiendo criterios agronómicos, cuyo objetivo es la producción de biomasa. Esto ha provocado la aplicación de dosis de riego superiores a las necesarias para mantener una buena calidad visual de estos espacios. El desconocimiento por parte de los técnicos responsables de las necesidades hídricas de las especies instaladas y de los indicadores de calidad del riego han provocado, en muchos casos, un uso ineficiente del agua (Valín *et al.*, 2011).

Importancia del agua en la vida cotidiana

Aunque a menudo se percibe que es bastante ordinaria, el agua es la sustancia más notable. Con ella lavamos, nadamos, la bebemos y cocinamos con ella, aunque probablemente no todos al mismo tiempo. Somos alrededor de dos tercios de agua y necesitamos agua para vivir. La vida tal como la conocemos no podría haber evolucionado sin agua y moriríamos sin ella. Las sequías causan hambrunas y las inundaciones causan muertes. Debido a su clara importancia, el agua es el material más estudiado sobre la Tierra. Es una sorpresa, por lo tanto, descubrir que se entiende tan poco, no solo por la gente en general, sino también por los científicos que trabajan en su estudio todos los días (Chaplin, 2001).

Problemática del agua en México

Los grandes problemas del agua en México son: sobreexplotación de las cuencas y acuíferos de mayor importancia; nivel de contaminación de los cuerpos de agua; seguridad hídrica comprometida en muchas regiones; impacto del cambio climático a otros sectores a través del agua, ascenso del número de conflictos y competencia por el agua, e ineficiencia en el uso del agua, entre otros (IMTA, 2018). Estos conflictos que existen en México obligan al país a hacer una administración mejor para poder satisfacer las demandas de sus habitantes y proteger el ambiente del incremento de los niveles de contaminación que se han adquirido. La disponibilidad efectiva del agua se ha reducido por los desequilibrios que ocasiona el crecimiento de la demanda, uso ineficiente y el aumento de los niveles de contaminación (Jiménez-Cisneros *et al.*, 2010).

Problemática de agua en Torreón

Torreón se ha basado en la actividad agropecuaria y minera. Este desarrollo ha incrementado el ingreso de la región pero a costa de uno de los recursos naturales más escasos en la actualidad. El uso del agua ha alcanzado niveles que son imposibles de ocultar y que dejan en evidencia que no es sostenible y la

región ya sufre los efectos de esta sobre explotación del recurso hídrico. Un aspecto importante a considerar es la baja eficiencia en la utilización del recurso en toda la región, lo que obliga a la sobre explotación para poder cumplir con la demanda. Sobre todo el aumento en la demanda para satisfacer a las zonas urbanas ha causado una explotación muy localizada para el abastecimiento público, que ha provocado un deterioro de la calidad del agua que se entrega a la población (IMPLAN, 2017).

Usos del agua

Los recursos hídricos se retiran para su uso y consumo en muchas actividades humanas. El término uso implica que parte del agua retirada se devuelve para su reutilización (Pimentel *et al.*, 1997).

Generalmente los usos del agua se clasifican en uso agrícola, industrial, doméstico y termoeléctrico.

En México, 77% del agua se utiliza en la agricultura; 14%, en el abastecimiento público; 5%, en las termoeléctricas y 4%, en la industria (INEGI, 2011).

USOS	
AGRICOLA	El agua se utiliza para el riego de cultivos.
ABASTECIMIENTO PÚBLICO	Se distribuye a través de las redes de agua potable (domicilios, industrias, áreas recreativas y a quienes estén conectados a dichas redes).
INDUSTRIA AUTOABASTECIDA	Son aquellas empresas que toman el agua directamente de los ríos, arroyos, lagos y acuíferos del país.
TERMOELÉCTRICAS	El agua se utiliza para producir electricidad.

Tabla 1. Usos del agua (INEGI, 2011).

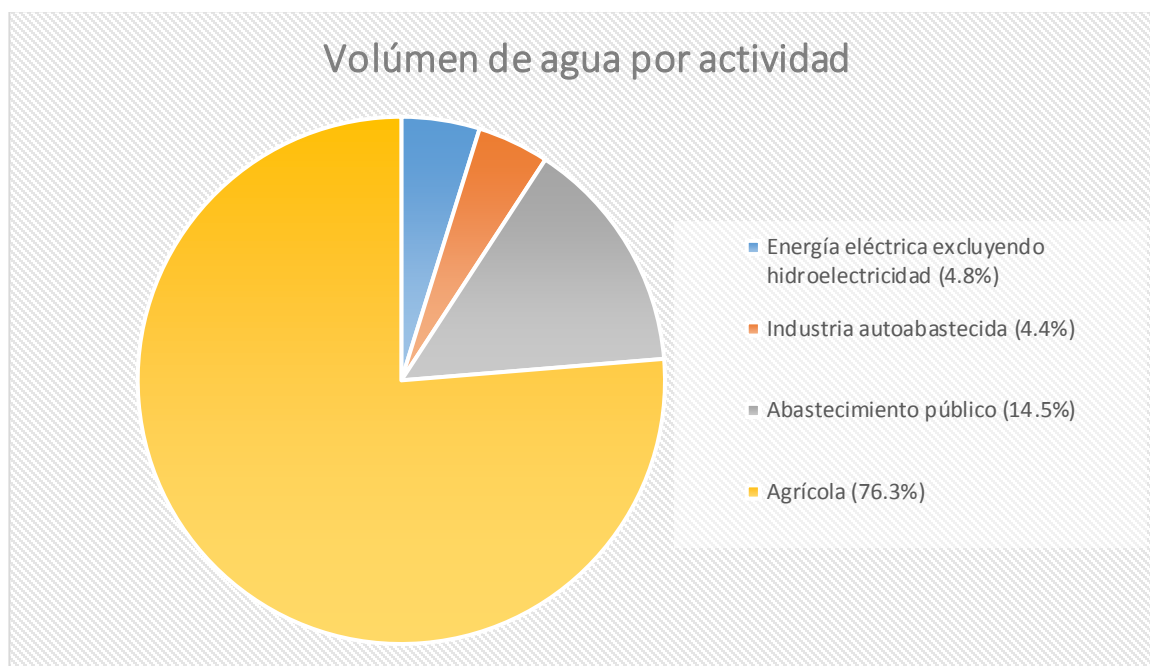


Ilustración 1. Distribución de volumen por agrupaciones de actividades (CONAGUA, 2016b)

Uso del agua en la agricultura

La agricultura utiliza el 76.04% del volumen de agua. La fuente de agua para uso agrícola es la superficial, con el 63.6% del volumen. (CONAGUA, 2018a). El 35 % de agua para uso agrícola es de origen subterráneo (CONAGUA, 2013).

Sin duda alguna, la agricultura es la actividad que mayor agua consume. Se podría ahorrar hasta más de la mitad del agua que se consume para esta actividad si se implementaran sistemas de tratamiento de aguas, ya que no se extraería de las fuentes subterráneas.

Para el reúso de aguas residuales se aconseja realizar siempre un tratamiento preliminar y primario; el tratamiento secundario, además de remover de manera eficiente materia orgánica y sólidos suspendidos, influye directamente sobre la estructura de algunos compuestos, como los de nitrógeno, siendo importante tener en cuenta los requerimientos del cultivo a irrigar y el tipo de suelo (Silva *et al.*, 2008).

Uso del agua en la industria

Representado por la industria que se abastece directamente de ríos, arroyos, lagos o acuíferos del país. Los principales rubros son industria química, azucarera, petróleo, celulosa y papel. El uso agrupado industrial autoabastecido representa el 4.4% del uso de agua (CNA, 2013).

Pero, ¿Qué es el agua industrial? Es el agua de desecho proveniente de los diferentes procesos de transformación industrial de materia prima para la obtención de satisfactores tanto para la sociedad, como para el desarrollo de otras actividades económicas. Los contaminantes presentes en estas aguas son muy variados y dependiendo del giro industrial de que se trate, se pueden encontrar grasas y aceites, metales pesados y sustancias tóxicas (Cisneros-Estrada y Saucedo-Rojas, 2016b).

Uso de agua en producción de energía

El agua incluida en este rubro se refiere a la utilizada en centrales de vapor duales, carboeléctrica, de ciclo combinado, de turbogas y de combustión interna. el 77.2% del agua concesionada a este uso corresponde a la planta carboeléctrica de Petacalco, ubicada en las costas de Guerrero, cerca de la desembocadura del río Balsas (CNA, 2018).

Uso del agua para abastecimiento público

El uso agrupado para abastecimiento público consiste en el agua entregada por las redes de agua potable, las cuales abastecen a los usuarios domésticos (domicilios), así como a diversas industrias y servicios. Disponer de agua en cantidad y calidad suficiente para el consumo humano es una de las demandas básicas de la población. La principal fuente para el abastecimiento público son los acuíferos (60% del volumen, 7 290 hm³ en 2015), aunque durante el periodo 2001-2015 la demanda de agua superficial asignada a este sector creció 44% (pasó de 3 306 a 4 760 hm³). ahora para este uso la fuente predominante es la subterránea con el 60.7% del volumen (CONAGUA, 2018b).

Parte del volumen que es ocupado es destinado a los fraccionamientos que contemplan dentro de sus instalaciones grandes áreas verdes y canchas de golf, lagos recreativos y en menor

proporción en el lavado de carros, instituciones educativas, riego de camellones, parques y lagos en el municipio (Escalante et al., 2003).

Calidad del agua

La calidad del agua se establece como aquellas condiciones físicas, químicas y microbiológicas que deben darse en el agua para que ésta mantenga un ecosistema equilibrado. Por ello el diagnóstico de calidad del agua debe evaluar parámetros físicos, químicos y microbiológicos (Cruz *et al.*, 2016)

Así que, la calidad del agua es el factor más importante que afecta la vida en el ecosistema. Los ríos y los lagos, que son importantes fuentes de agua dulce, a menudo están contaminados por fuentes naturales y antropogénicas, lo que hace que no sean aptos para su uso (Kalagbor *et al.*, 2019).

Durante los últimos veinte años, la preocupación pública por la calidad de los recursos de agua dulce disponibles ha ido en constante aumento, debido al hecho de que se conocieron cada vez más casos de graves problemas de contaminación (Engelmann, 1991).

El deterioro de la calidad del agua se ha convertido en motivo de preocupación a nivel mundial con el crecimiento de la población humana, la expansión de la actividad industrial y agrícola y la amenaza del cambio climático como causa de importantes alteraciones en el ciclo hidrológico.

Por lo general, la calidad del agua se determina comparando las características físicas y químicas de una muestra de agua con unas directrices de calidad del agua o estándares. De esta forma se puede identificar si el agua es idónea para los requerimientos de calidad asociados a un uso determinado (ONU, 2014b).

Evaluación de la calidad del agua

La evaluación de la calidad del agua se lleva a cabo utilizando tres indicadores: la Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO5), la Demanda Química

de Oxígeno (DQO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST). La DBO5 y la DQO son indicativas de la cantidad de materia orgánica presente en los cuerpos de agua provenientes principalmente de las descargas de aguas residuales tanto de origen municipal como no municipal (CONAGUA, 2017).

Contaminación del agua

Por contaminación se entiende generalmente una presencia de sustancias químicas o de otra naturaleza en concentraciones superiores a las condiciones naturales. Entre los contaminantes más importantes se encuentran los microorganismos, los nutrientes, los metales pesados, los químicos orgánicos, aceites y sedimentos; el calor también puede ser un agente contaminante, al elevar la temperatura del agua. Los contaminantes constituyen la principal causa de la degradación de la calidad de agua en el mundo. El agua se considera contaminada si algunas sustancias o condiciones están presentes en tal grado que el agua no se puede utilizar para un propósito específico (UNESCO, 2009).

Siendo el resultado de las descargas de aguas residuales sin un tratamiento previo sobre las corrientes o masas de agua. Las actividades agrícolas e industriales y la creciente población han provocado un aumento de la demanda de este recurso y una contaminación de los recursos hídricos (Jeevananda *et al.*, 2007).

La población mundial está creciendo rápidamente, mientras que la disponibilidad de agua dulce está disminuyendo debido a la falta de una gestión adecuada, falta de conciencia y falta de profesionalismo. La disponibilidad de una pequeña porción de agua dulce y una mayor demanda debido al crecimiento de la población, la urbanización y la industrialización crean problemas de contaminación del agua en todo el mundo (Rashid *et al.*, 2019).

Principales causas de contaminación del agua

Las actividades humanas, incluidas la industrialización y las prácticas agrícolas, contribuyeron en gran medida a la degradación y contaminación del medio ambiente, lo que tiene un efecto adverso en los cuerpos de agua (OWA, 2013).

A nivel global, el principal problema relacionado con la calidad del agua lo constituye la eutrofización, que es el resultado de un aumento de los niveles de nutrientes generalmente fósforo y nitrógeno y afecta sustancialmente a los usos del agua. Las mayores fuentes de nutrientes provienen de la escorrentía agrícola y de las aguas residuales domésticas (también fuente de contaminación microbiana), de efluentes industriales y emisiones a la atmósfera procedentes de la combustión de combustibles fósiles y de los incendios forestales (ONU, 2014a).

Contaminación de aguas subterráneas

La contaminación es una modificación de las características físicas, químicas y biológicas del agua, restringiendo o impidiendo su uso en las diversas aplicaciones en las que normalmente desempeña un papel (Fried, 1975a).

La rápida urbanización y la eliminación frecuente de las aguas residuales a las aguas subterráneas causan una contaminación generalizada de los suministros de agua dulce con ciertos contaminantes (Pal *et al.*, 2010).

El problema de contaminación de aguas subterráneas va en creciente debido a la degradación de la misma, por factores de la actividad humana.

Orígenes de la contaminación de aguas subterráneas

La contaminación industrial, agrícola, urbana y ambiental son las principales fuentes que originan la contaminación y degradación de la calidad de las aguas subterráneas (Fried, 1975b). Uno de los principales contribuyentes en ésta contaminación es la disposición inadecuada de los desechos en las zonas urbanas (Morán-Ramírez *et al.*, 2016).

Aguas residuales

Agua residual es el término genérico utilizado para designar el residual líquido recogido mediante la red de alcantarillado para su envío a una planta de tratamiento de agua residual municipal. Un agua residual municipal, o urbana, se compone de agua residual doméstica, de agua residual industrial, de agua de escorrentía y de agua de infiltración. El agua residual doméstica proviene de la

utilización, por parte de la población, del agua de abastecimiento para atender los usos más diversos, tanto en viviendas como en edificios comerciales y centros públicos (Mujeriego, 1990d).

Las aguas residuales tienen composición variada dependiendo de su origen descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (SEMARNAT, 1997b).

Está compuesta por componentes físicos, químicos y biológicos, es una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos (Mara, 1976).

La reutilización de las aguas residuales tratadas ha demostrado ser un elemento importante en las estrategias para el uso sostenible de los recursos limitados de agua dulce debido a sus potenciales beneficios económicos y ambientales (Mazari-Hiriart *et al.*, 2014).

Origen de las aguas residuales

Las aguas residuales provienen de actividades domésticas, industriales, pecuarias, agrícolas y usos recreativos que determinan sus disímiles características. Las aguas residuales pueden clasificarse de la siguiente manera:

- ✚ Aguas residuales domésticas: residuos líquidos de viviendas, zonas residenciales, establecimientos comerciales o institucionales. Estas, además, se pueden subdividir en:
 - Aguas negras: aguas que transportan heces y orina, provenientes del inodoro.
 - Aguas grises: aguas jabonosas que pueden contener grasas también, provenientes de la ducha, tina, lavamanos, lavaplatos, lavadero y lavadora.

- ✚ Agua residual municipal o urbana: residuos líquidos de conglomerado urbano; incluye actividades domésticas e industriales y son transportadas por una red de alcantarillado.
- ✚ Agua residual industrial: residuos líquidos provenientes de procesos productivos industriales, que incluso pueden tener origen agrícola y pecuario (Lozano-Rivas, 2012).

Características del agua residual

Las aguas residuales poseen una composición variada dependiendo de la actividad y uso que les dio origen y por lo tanto las concentraciones de contaminantes presentes también varían. Sin embargo, de manera general se puede decir que las aguas residuales contienen materia orgánica, organismos patógenos, grasas y aceites, nutrientes, contaminantes tóxicos orgánicos e inorgánicos y minerales disueltos (Cisneros-Estrada y Saucedo-Rojas, 2016a).

Las aguas residuales municipales se componen principalmente de agua (99.9%) junto con concentraciones relativamente pequeñas de sólidos orgánicos e inorgánicos suspendidos y disueltos. Entre las sustancias orgánicas presentes en las aguas residuales se encuentran los carbohidratos, la lignina, las grasas, los jabones, los detergentes sintéticos, las proteínas y sus productos de descomposición, así como diversos productos químicos orgánicos naturales y sintéticos de las industrias de procesos. Las aguas residuales municipales también contienen una variedad de sustancias inorgánicas de origen doméstico e industrial, que incluyen varios elementos potencialmente tóxicos como arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, zinc, etcétera (FAO, 1992; Tchobanoglous *et al.*, 1995).

Composición del Agua Residual

Las propiedades físicas y las componentes químicos y biológicos del agua residual son parámetros importantes para el proyecto y la explotación de las instalaciones de recogida, tratamiento y vertido, así como para la gestión técnica

de la calidad ambiental. La composición de un agua residual viene definida para las cantidades reales de los componentes físicos, químicos y biológicos presentes en ella. La composición tanto del agua residual sin tratar como del efluente obtenido de la planta de tratamiento depende de la composición del agua de abastecimiento público, del número y tipo de establecimientos comerciales e industriales y de la naturaleza de la población residente. La vigilancia de la calidad del agua residual se lleva a cabo generalmente mediante diversos parámetros globales de contaminación, tales como la demanda bioquímica de oxígeno (Ramdani *et al.*), la materia en suspensión (Pimentel *et al.*) y la demanda química de oxígeno (DQO), parámetros todos ellos de interés en la lucha contra la contaminación del agua (Mujeriego, 1990d).

Determinar los contaminantes presentes en el agua residual y su concentración resulta importante debido a los riesgos de salud y ambientales que pueden generarse durante su reuso en las actividades productivas o de servicios. Por ello, en muchas normas oficiales vigentes en distintos países se especifican los límites máximos de contaminantes para aguas residuales, ya sea que se descarguen a receptores como cuerpos de agua o suelos, se reúsen con fines productivos en la agricultura, acuicultura, ganadería, etc., o se reúsen en servicios al público (Cisneros-Estrada y Saucedo-Rojas, 2016a).

Componente	Parámetro de calidad	Razones de interés
Materia en suspensión	Materia en suspensión, incluyendo la porción volátil y la inorgánica	La materia en suspensión puede dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar en un medio acuático. Una cantidad excesiva de materia en suspensión puede obstruir el sistema de riego.
Materia orgánica biodegradable	Demanda Bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno	Estas sustancias están compuestas principalmente por proteínas, carbohidratos y grasas. Una vez vertidas en el medio ambiente, su descomposición biológica puede dar lugar al agotamiento del oxígeno disuelto de las aguas receptoras y a la aparición de las condiciones anaerobias.

Patógenos	Organismos indicadores, coliformes totales y coliformes fecales	Los organismos patógenos presentes en un agua residual, tales como las bacterias, los virus y los parásitos, pueden producir numerosas enfermedades transmisibles.
Elementos Nutritivos	Nitrógeno, fósforo, potasio	El nitrógeno, el fósforo y el potasio son elementos nutritivos esenciales para el crecimiento de las plantas y su presencia en el agua aumenta su valor para riego. Cuando se vierte el nitrógeno o fósforo en el medio acuático puede producirse el desarrollo de formas de vida acuática indeseables. Cuando se vierten cantidades excesivas de estos elementos en el terreno, el nitrógeno puede llegar a contaminar las aguas subterráneas.
Substancias orgánicas estables o refractarias al proceso de tratamiento	Compuestos específicos tales como fenoles, pesticidas e hidrocarburos clorados	Estas sustancias orgánicas ofrecen una gran resistencia a los métodos convencionales de tratamiento de agua residual. Algunos de ellas son tóxicos en el medio ambiente y su presencia puede limitar la idoneidad de las aguas residuales para riego.

Tabla 2. Componentes de interés en tratamiento de agua residual y en el riego con agua residual regenerada (Stuart, 1990)

Sustancias orgánicas estables o refractarias al proceso de tratamiento	Compuestos específicos tales como fenoles, pesticidas e hidrocarburos clorados	Estas sustancias ofrecen gran resistencia a los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales. Algunos de ellos son tóxicos en el medio ambiente y su presencia puede limitar la idoneidad de las aguas residuales para el riego.
Actividad del ion hidronio	pH	El pH del agua residual afecta la solubilidad de los metales así como la alcalinidad del suelo. El intervalo normal para pH de un agua residual municipal se sitúa entre 6.5 y 8.5, aunque la presencia de agua residual industrial puede modificar el p H de forma significativa.

Metales pesados	Elementos conocidos tales como Cd, Zn, Ni y Hg	Algunos metales pesados se acumulan en el medio ambiente y son tóxicos para los animales y las plantas. Su presencia en el agua residual puede limitar su idoneidad para el riego.
Sustancias inorgánicas disueltas	Materia disuelta total, conductividad eléctrica, elementos concretos como Na, Ca, Mg, Cl y B.	Determinados iones como los cloruros, el sodio y el boro son tóxicos para ciertas plantas. El sodio puede causar problemas de permeabilidad en los suelos.
Cloro residual	Cloro libre y cloro combinado	Existe cierta preocupación por los efectos tóxicos derivados de los compuestos organoclorados que puedan llegar a contaminar las aguas subterráneas.

Tabla 3. Continuación de los componentes de interés en el tratamiento de agua residual y en el riego con agua residual regenerada (Stuart, 1990)

Propiedades físicas

Temperatura

El valor de temperatura es un criterio de calidad del agua para la protección de la vida acuática y para las fuentes de abastecimiento de agua potable, es también un parámetro establecido como límite máximo permitido en las descargas de aguas residuales (NMX-AA-007-SCFI, 2013). La temperatura de las aguas residuales es ligeramente más altas que en el agua potable, estas varían de acuerdo a las estaciones del año y es más estable que la temperatura del aire. Influye en la actividad microbiana del agua residual, en la solubilidad de los gases y en la viscosidad del líquido (Sperling, 2007b).

Color

El color de las aguas residuales frescas torna a ser gris ligero, mientras que el color de las aguas residuales sépticas es un gris oscuro o negro (Sperling, 2007b).

Olor

El olor de las aguas residuales frescas es un olor aceitoso, relativamente desagradable, el olor de las aguas residuales sépticas tienen un mal olor, muy desagradable, esto debido al gas sulfuroso de hidrogeno y otros subproductos de descomposición y para las aguas residuales industriales las destacan los olores característicos (Sperling, 2007b).

Turbidez

La turbidez del agua residual es causada por una gran variedad de sólidos suspendidos. Si las aguas residuales más frescas o más concentradas generalmente tienen una mayor turbidez (Sperling, 2007b).

Sólidos totales

Son parte de sólidos orgánicos e inorgánicos que se encuentran suspendidos o disueltos que no son filtrables. La parte fija son compuestos minerales, no se oxidan con el calor, son inertes y son una parte de los sólidos suspendidos. Los volátiles son compuestos orgánicos oxidados por el calor, que forman parte de los sólidos suspendidos.

Los sólidos disueltos son orgánicos e inorgánicos filtrables, compuestos minerales de los sólidos disueltos, los volátiles son compuestos orgánicos de los sólidos disueltos (Sperling, 2007b).

Sólidos sedimentables

Se consideran sólidos sedimentables a las partículas que por su tamaño y peso sedimentan en una hora. Estos sólidos pueden ser los originalmente presentes en el agua, o bien, los flóculos o precipitados formados durante algún tipo de proceso químico. La cantidad de sólidos sedimentables se expresa en mililitros de sólido por litro de agua pero también se da en partes por millón, en peso (CONAGUA, 2007a). Los sólidos sedimentables tienen la capacidad de flotar o decantar con el agua en reposo.

Sólidos disueltos totales

Se entiende por sólido disuelto todo residuo que queda después de filtrar en membranas de 1.2 μm de poro y evaporar el agua a 103°C. Contiene compuestos muy variados por lo que se dice que es una prueba global. Los sólidos incluyen tanto las sales inorgánicas (carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, fosfatos y nitratos de sodio, potasio, calcio, magnesio y hierro) como materia orgánica (CONAGUA, 2007d).

Propiedades químicas

pH

El pH es una medida de la concentración de iones de hidrogeno. Es una medida de la naturaleza acida o alcalina de la solución acuosa que puede afectar los usos específicos del agua. La mayoría de las aguas naturales tienen un pH entre 6 y 8. Su medición se realiza fácilmente con un pHmetro bien calibrado, aunque también se puede disponer de papeles especiales que, por coloración, indica el pH. Los valores de pH han de ser referidos a la temperatura de medición, pues varían con ella. Este parámetro se corrige por neutralización (Rigola Lapeña, 1990).

Una solución es neutra a pH 7. Los procesos biológicos de oxidación normalmente tienden a reducir el pH (Sperling, 2007a).

El parámetro de pH en aguas residuales municipales se considera alto en un rango de 8, medio en un rango de 7.5 y bajo en rango de 7 (Henze, 1992).

Dureza

La dureza se entiende como la capacidad de un agua para precipitar al jabón y esto está basado en la presencia de sales de los iones calcio y magnesio. La dureza es la responsable de la formación de incrustaciones en recipientes y tuberías lo que genera fallas y pérdidas de eficiencia en diferentes procesos industriales como las unidades de transferencia de calor. El término dureza se aplicó en principio por representar al agua en la que era difícil (duro) de lavar y se refiere al consumo de jabón para

lavado, en la mayoría de las aguas alcalinas esta necesidad de consumo de jabón está directamente relacionada con el contenido de calcio y magnesio (NMX-AA-072-SCFI, 2001).

DBO₅

Es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua en un periodo de 5 días (NMX-AA-028-SCFI, 2001). Medido a los cinco días y 20°C, asociado con la fracción biodegradable de compuestos orgánicos carbonáceos. Es la medida del oxígeno consumido después de cinco días por los microorganismos después en la estabilización bioquímica de la materia orgánica (Sperling, 2007b).

DBO definitiva

Representa la cantidad de oxígeno consumido al final de varios días, por los microorganismos en la estabilización bioquímica de la materia orgánica (Sperling, 2007b).

DQO

Representa la cantidad de oxígeno necesario para estabilizar químicamente el carbonáceo de materia orgánica. Utiliza agentes oxidantes fuertes bajo ácido (Sperling, 2007b). Es también una medida indirecta de la cantidad de materia orgánica contenida en una muestra. A diferencia de la DBO, esta prueba emplea un oxidante fuerte (dicromato de potasio) en un medio ácido (ácido sulfúrico) en lugar de microorganismos (Lozano-Rivas, 2012).

Nitrógeno

El nitrógeno es un indicador relevante en los estudios medioambientales, debido a la importancia que este tiene en los procesos de tratamiento, en el control de la calidad de las aguas y de las descargas de las aguas residuales. En las aguas residuales se encuentran diferentes especies

nitrogenadas, como son: nitrógeno orgánico y amoniacal, nitritos, nitratos, entre otras (Espinosa-Lloréns *et al.*, 2013).

Nitrógeno total: El nitrógeno total incluye nitrógeno orgánico, amoníaco, nitrito y Nitrato. Es un nutriente esencial para el crecimiento de microorganismos en el tratamiento biológico de aguas residuales. El nitrógeno orgánico y amoníaco juntos se llaman Nitrógeno Kjeldahl Total (TKN).

Nitrógeno orgánico: El nitrógeno orgánico es nitrógeno en forma de proteínas, aminoácidos y urea.

Nitrógeno amoniacal: El Amoníaco es producido en la primera etapa de la descomposición de Nitrógeno, el nitrito es la etapa intermedia en la oxidación del amoníaco. Prácticamente ausente en aguas residuales crudas y el nitrato es el producto final en la oxidación de amoníaco. Prácticamente ausente en aguas residuales crudas (Sperling, 2007b).

Nitratos: El nitrato es una de las formas de nitrógeno de mayor interés en las aguas naturales, residuales y residuales tratadas, se presenta generalmente a nivel de trazas en el agua de superficie, pero puede alcanzar niveles elevados en las subterráneas. El nitrato es un nutriente esencial para muchos autótrofos fotosintéticos, y en algunos casos ha sido identificado como el determinante del crecimiento de estos. Una concentración alta de nitratos es indicio de una etapa mayor de mineralización de los compuestos nitrogenados. En las aguas de algunos pozos suele encontrarse cantidades apreciables de nitratos, lo que es objetable desde el punto de vista sanitario (NMX-AA-079-SCFI, 2001).

Nitritos: El nitrito considerado como una etapa intermedia en el ciclo del nitrógeno puede estar presente en el agua como resultado de la descomposición biológica de materiales proteicos. En aguas

superficiales crudas, las huellas de nitritos indican contaminación. Debido a que el nitrógeno es un nutriente esencial para organismos fotosintéticos, es importante el monitoreo y control de descargas del mismo al ambiente (NMX-AA-099-SCFI, 2006)

Fosforo

El fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de organismos, por lo que la descarga de fosfatos en cuerpos de aguas puede estimular el crecimiento de macro y microorganismos fotosintéticos en cantidades nocivas. Generalmente se encuentra en aguas naturales, residuales y residuales tratadas como fosfatos. Éstos se clasifican como ortofosfatos, fosfatos condensados y compuestos órganofosfatados. Estas formas de fosfatos provienen de una gran cantidad de fuentes, tales como productos de limpieza, fertilizantes, procesos biológicos, etc. (NMX-AA-029-SCFI, 2001).

Fosforo total

El fósforo total existe en formas orgánicas e inorgánicas. Lo es un nutriente esencial en el tratamiento biológico de aguas residuales el fósforo orgánico combinado con materia orgánica y el fósforo inorgánico son ortofosfatos y polifosfatos (Sperling, 2007b).

Cloruro

El ion cloruro es uno de los iones inorgánicos que se encuentran en mayor cantidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Un alto contenido de cloruros puede dañar estructuras metálicas y evitar el crecimiento de plantas. Las altas concentraciones de cloruro en aguas residuales, cuando éstas son utilizadas para el riego en campos deteriora, en forma importante la calidad del suelo (NMX-AA-073-SCFI, 2001).

Grasas y aceites

La medición de grasas y aceites es indicativa del grado de contaminación del agua por usos industriales y humanos. En la medición de grasas y

aceites no se mide una sustancia específica, sino un grupo de sustancias con unas mismas características fisicoquímicas (solubilidad). Entonces la medición de grasas y aceites incluye ácidos grasos, jabones, grasas, ceras, hidrocarburos, aceites y cualquier otra sustancia susceptible de ser extraída con hexano (NMX-AA-005-SCFI, 2013).

Materia orgánica

Es una mezcla heterogénea de diversos compuestos orgánicos, los principales componentes son proteínas, carbohidratos y lípidos (Sperling, 2007b).

Carbono orgánico total

Medida directa del carbonáceo materia orgánica, determinado a través de la conversión de carbono orgánico en dióxido de carbono (Sperling, 2007b).

Detergentes

Los detergentes sintéticos generalmente tensoactivos típicos como es el alquilbencen sulfonato (ABS), ocasionan problemas por su alta resistencia a la degradación biológica. Resulta un problema la formación de espuma en las corrientes de agua ya que dificulta la transferencia de oxígeno atmosférico al agua, lo que afecta a las unidades de aireación en las plantas de tratamiento (Ramos-Olmos *et al.*, 2003). Los compuestos básicos de los detergentes, son compuestos orgánicos con propiedades tensoactivas en solución acuosa. Para la determinación de detergentes la DGN- AA- 39- 1976 establece el método colorimétrico, para la determinación de sustancias activas al azul de metileno, en aguas naturales y residuales, este método se basa en la reacción de los elementos surfactantes con el azul de metileno, que da lugar a la formación de una sal azul, soluble en cloroformo, cuya intensidad de color es proporcional a su concentración. La intensidad de color se mide en un espectrofotómetro, a una longitud de onda de 650 - 655 nm.

Metales pesados y cianuros

La presencia en las aguas residuales de metales pesados tales como plomo, cadmio, selenio, cromo, cobre, etc., pueden ser contraproducentes para su adecuado tratamiento, al afectar a la biomasa encargada de la estabilización de la materia orgánica. Por este motivo su contenido debe ser controlado en la fuente (Rojas, 2012).

En concentraciones por encima de determinados límites, pueden producir efectos negativos en la salud humana, flora o fauna. Solo se consideran los siguientes elementos: arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo, zinc y cianuros.

Arsénico

El arsénico está reconocido como carcinogénico en humanos, estando relacionado con enfermedades cardiovasculares, entre otras afectaciones, aun a baja concentración de exposición (Ojeda-Guzzini, 2015). Para la determinación de arsénico la NMX-AA-46-1981 establece que el método espectrofotométrico con dietil ditio carbamato de plata, para la determinación de arsénico en agua, en donde el arsénico se reduce a arsina por el zinc en solución ácida, la arsina pasada a través de un depurador y después a un tubo absorbente que contenga dietil ditio carbamato de plata, para la formación de un complejo rojo soluble cuyo color es proporcional al contenido de arsénico en la muestra.

Cadmio

Se origina por contaminación industrial de fabricación de baterías, acero y plástico; pero también puede ser por impurezas en las tuberías de zinc o de soldaduras (Ojeda-Guzzini, 2015). Para la determinación de cadmio la NMX-AA-60-1978 establece el método colorimétrico para determinar cadmio en agua, el cual consiste en la reacción del cadmio presente en el agua con la ditizona para dar un complejo de ditizonato de cadmio de color rojo, el cual se extrae

con cloroformo y se cuantifica colorimétricamente a una longitud de onda de 515 nm.

Cobre

Originado si el agua circulante es alta agresividad (Ojeda-Guzzini, 2015). La NMX-AA-66-1981 establece el método colorimétrico para la determinación de cobre en agua, que consiste en soluciones neutras o ligeramente ácidas los iones cuprosos reaccionan con la neocuproína (2,9-dimetil1,10-fenantrolina) para dar un complejo de cobre neocuproína, de color amarillo, el cual se extrae con cloroformo y se cuantifica espectrofotométricamente a una longitud de onda de 457 nm.

Cromo

El cromo hexavalente tiene efectos mutagénicos y genotóxicos por vía oral (Ojeda-Guzzini, 2015). NMX-AA-044-SCFI-2014 establece el método de análisis para la medición de cromo hexavalente en aguas naturales, salinas, potables, residuales y residuales tratadas y consiste en una reacción donde el cromo hexavalente Cr^{+6} reacciona con la 1,5-difenilcarbazida en medio ácido para dar un complejo color rojo violeta de composición desconocida que es determinado espectrofotométricamente a 540 nm. La intensidad de color es directamente proporcional a la concentración de cromo hexavalente.

Cianuros

Los efectos de la exposición aguda son principalmente sobre el sistema cardiovascular. También puede alterar la función tiroidea (Ojeda-Guzzini, 2015). La NMX-AA-058-SCFI-2001 establece dos métodos de análisis para la determinación de cianuros en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas:

El método espectrofotométrico: Es utilizado para determinar la concentración de cianuros inorgánicos en aguas residuales,

potables y aguas naturales. Este método detecta cianuros inorgánicos que están presentes tanto en forma de sales simples solubles como de radicales complejos.

Método potenciométrico: Los cianuros son determinados potenciométricamente en el destilado alcalino del tratamiento preliminar usando un electrodo selectivo de ion específico para cianuros, en combinación con un electrodo de referencia de doble junta y un potenciómetro que cuenta con una escala expandida en milivoltios o un medidor específico de iones.

Mercurio

Es de Origen industrial (producción electrolítica del cloro o aplicaciones eléctricas) (Ojeda-Guzzini, 2015). La NMX-AA-64-1981 establece el método colorimétrico para determinar mercurio en agua, es aplicable en aguas naturales y residuales, este método se basa en la reacción del mercurio presente en el agua con la ditizona para dar un complejo de ditizonato mercúrico de color naranja, el cual se extrae con cloroformo, en un medio ácido, cuya intensidad se cuantifica colorimétricamente a una longitud de onda de 490 nm.

Níquel

Proviene básicamente de la fabricación de acero inoxidable (Ojeda-Guzzini, 2015). La NOM-AA-76-1981 establece el método colorimétrico de la dimetilglioxima para la determinación de níquel en agua, la muestra es sometida a una digestión preliminar con una mezcla ácida para eliminación de interferencias, el níquel se separa entonces de otros iones por extracción de un complejo de dimetilglioxima con cloroformo, se extrae nuevamente a una fase acuosa ácida y se hace reaccionar nuevamente con la solución de dimetilglioxima, para el desarrollo del color y se mide su absorción espectral fotométricamente.

Plomo

Procede en su mayor parte de las redes de distribución y tuberías o accesorios en instalaciones inferiores, que tiene plomo en su composición. Se aporta plomo dependiendo de la temperatura, pH, cloro, dureza del agua, oxígeno disuelto y el tiempo de contacto (Ojeda-Guzzini, 2015). Para la determinación de plomo la NOM-AA-57-1981 establece el método colorimétrico de la ditizona para determinar plomo en agua, se basa en la reacción del plomo presente en el agua con la ditizona disuelta en tetracloruro de carbono formando un complejo de ditizonato de plomo de color rosa, cuya intensidad determinada colorimétricamente es proporcional al contenido de plomo.

Propiedades biológicas

Las aguas residuales pueden contener millones de bacterias por mililitro: bacilos anaerobios, esporulados, coliformes, estreptococos, bacterias del grupo *Proteus* sp, y otros tipos que proceden del tracto intestinal humano. Además, las aguas residuales domésticas son un buen receptáculo de protozoos, bacterias y virus patógenos, tales como agentes etiológicos de la disentería el cólera, y la fiebre tifoidea. Las heces de huéspedes infectados pueden fácilmente depositar en las aguas residuales los virus de: poliomielitis y hepatitis infecciosa. Los rasgos biológicos de las aguas negras lo presentan, indudablemente, las poblaciones bacterianas con una gama de organismos anaeróbicos estrictos y facultativos, así como la presencia de organismos patógenos de todo tipo que van desde virus hasta vermes (Babbit y Baumann, 1980).

Cuando un agua residual que contiene materia orgánica en solución o en suspensión se pone en contacto con una población de microorganismos, éstos la utilizan para efectos de derivar de dicha materia orgánica la energía necesaria para sus procesos vivientes y para asegurar la conservación de la especie con la generación de más microorganismos.

La presencia de contaminantes en el agua modifica la estructura ambiental requerida por los organismos típicos del agua dulce, los cambios pueden afectar la temperatura, la cantidad de oxígeno disuelto, las concentraciones de nutrientes, los depósitos del fondo, etc. sin embargo, son desconocidas aún las necesidades ambientales específicas de muchas especies de algas y protozoos.

Los desechos en las corrientes naturales producen efectos muy variados sobre las comunidades de algas y protozoarios: reduciendo el número de especies, incrementando el número total de individuos de una sola especie, reduciendo la capacidad de colonización de las especies, dominancia de una especie y cambios selectivos en las relaciones parasito y depredador (Ford y Eckenfelder, 1966).

Coliformes fecales

La presencia y el grado de contaminación fecal es un factor importante en la evaluación de la calidad de un cuerpo de agua. Examinar muestras de agua para detectar presencia de organismos del grupo de las bacterias coliformes (los cuales normalmente habitan el intestino humano y de otros animales de sangre caliente), provee un indicador de contaminación. Ya que la habilidad de algunos organismos miembros del grupo de las bacterias coliformes de sobrevivir en el agua es limitada, su cantidad puede también ser utilizada para estimar el grado de contaminación fecal reciente (NMX-AA-042-SCFI, 2015).

Huevos de helminto

Los helmintos representan un elevado riesgo a la salud humana debido a que sus diversos estadíos infecciosos (huevos embrionados o larvas) son altamente persistentes en el agua contaminada (NMX-AA-113-SCFI, 2012).

Tratamiento de las aguas residuales

Recientemente se han hecho esfuerzos, por incrementar la cobertura de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en México; sin embargo, estos esfuerzos se han enfocado principalmente en las comunidades urbanas. Para

tratar las aguas residuales domésticas o municipales, existen diversas tecnologías que varían desde las convencionales altamente mecanizadas, que demandan un gran consumo energético, hasta tecnologías ecológicas de bajo costo. Los sistemas de tratamiento convencionales remueven los contaminantes, mediante procesos que consumen grandes cantidades de energía procedentes de combustibles fósiles, con tiempos de retención hidráulico cortos y requieren cantidades relativamente menores de terreno. Las tecnologías convencionales, son ventajosas para las zonas urbanas o en áreas en donde el costo del terreno representa una parte importante de los gastos de inversión (Zurita-Martinez *et al.*, 2011).

El tratamiento de aguas residuales continúa siendo bajo en el país. Aunque el volumen tratado respecto al generado de aguas residuales municipales en 2014 fue 155% mayor al registrado en 1998, correspondió a sólo el 49% del caudal generado ese año. En el caso de las aguas residuales industriales, en 2014 se trató cerca del 31% del volumen generado (SEMARNAT, 2015).

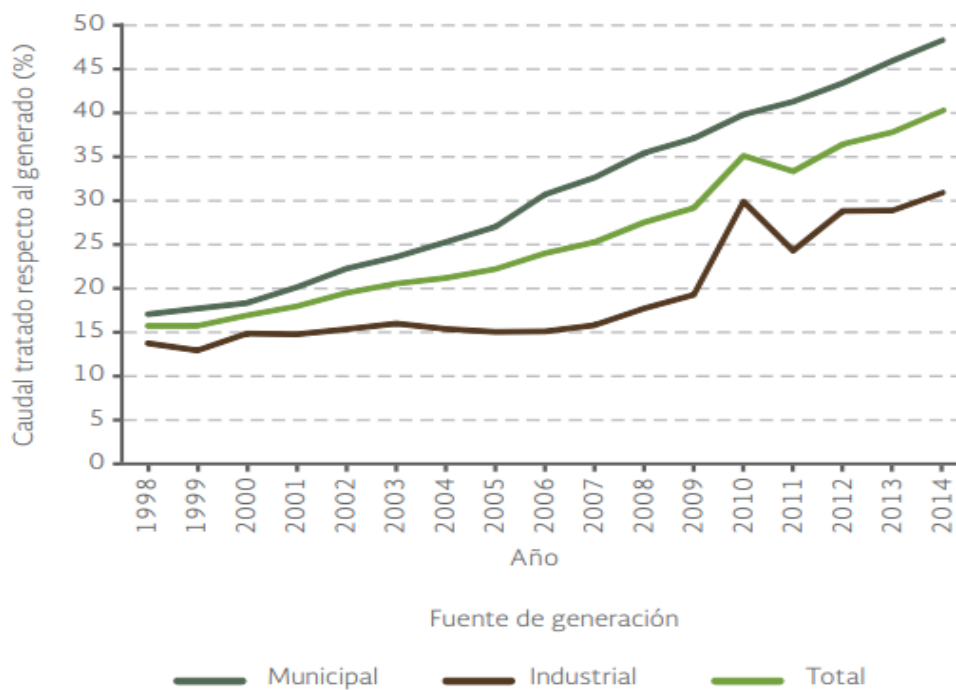


Ilustración 2. Tratamiento de aguas residuales respecto al caudal generado 1998-2014 (SEMARNAT, 2015).

El tratamiento primario se emplea para la eliminación de los sólidos en suspensión y los materiales flotantes, impuesta por los límites, tanto de descarga al medio receptor como para poder llevar los efluentes a un tratamiento secundario, bien directamente, o pasando por una neutralización o una homogenización. El tratamiento secundario comprende tratamientos biológicos convencionales. En cuanto al tratamiento terciario su objetivo fundamental es la eliminación de contaminantes que no se eliminan con los tratamientos biológicos convencionales (Ramalho, 1996b).

El tratamiento de aguas residuales se realiza aplicando una combinación de procesos fisicoquímicos y biológicos, principalmente para remover sólidos sedimentables, disueltos y en suspensión, materia orgánica, metales, nutrientes y microorganismos patógenos. Los métodos físicos-químicos son menos aconsejables desde el punto de vista económico que los métodos biológicos, por el aporte continuo de reactivos y el tiempo de operación que requieren. Los procesos aerobios necesitan oxigenación continua, encareciendo el proceso y generando un alto volumen de lodos no estabilizados que deben ser tratados posteriormente (Ramdani *et al.*, 2010).

Tipos de pre-tratamiento	Objetivo
Rejas o tamices	Eliminación de sólidos gruesos
Trituradores	Desmenuzamiento de sólidos
Desarenadores	Eliminación de arenas y gravilla
Desengrasadores	Eliminación de aceites y grasas
Pre-aireación	Control de olor y mejoramiento del comportamiento hidráulico

Tabla 4. Pre-tratamientos y sus objetivos (Rojas, 2002).

Tipos de tratamiento de aguas residuales

Tratamiento Primario	Cribado Sedimentación Flotación Separación de aceites Homogeneización Neutralización
Tratamiento secundario	Lodos activos Aireación prolongada (procesos de oxidación total) Estabilización por contacto Lagunaje con aireación Estabilización por lagunaje Filtros biológicos (percoladores) Discos biológicos Tratamientos anaerobios: procesos de contactos, filtros
Tratamiento terciario	Microtamizado Filtración (lecho de arena, antracita) Precipitación y coagulación Adsorción (carbón activado) Intercambio iónico Osmosis inversa Electrodialisis Cloración y ozonización Procesos de reducción de nutrientes

Tabla 5. Tipos de tratamientos (Ramalho, 2003b).

Pre-tratamiento

Las operaciones de tratamiento preliminar comprenden:

- 1) las rejas de desbaste y la dilaceración, como medidas para eliminar objetos de gran tamaño
- 2) el desarenado mediante sedimentación. La velocidad del agua a través del desarenador se mantiene lo suficientemente elevada para evitar la decantación de la materia orgánica.

En gran número de pequeñas plantas de tratamiento de agua residual, el desarenado no se considera como una fase del proceso de tratamiento preliminar.

El primer paso en el tratamiento de un agua residual consiste en la separación de los sólidos gruesos. El proceso más común se basa en hacer pasar el agua residual a través de rejas de barras o de tamices.

Tamices

Los tamices se caracterizan por disponer de aberturas libres inferiores a los 15 mm y normalmente se emplean en plantas normalmente de pequeño tamaño, en las que se eliminan del agua residual entrante los sólidos de menor tamaño.

Los primeros tamices de gruesos empleados eran de tipo circular o de disco y se empleaban como medio para proporcionar un tratamiento primario, en lugar del actual tanque de sedimentación.

Los tamices modernos son de tipo estático (fijos) o de tambor giratorio, provistos de una malla fina de acero inoxidable o de un material no férreo. Los tamices van a retener sólidos suspendidos afluentes que contienen o están compuestos por materia putrescible (incluida la materia fecal patógeno) y cantidades sustanciales de grasas y espumas, por lo que el manejo de estos residuos requiere especial atención (Metcalf & Eddy, 1995a)

Desarenadores

Un desarenador es una estructura hidráulica importante en un acueducto, debido a que esta estructura es la encargada de remover las arenas que vienen en el agua cruda. Su función principal es retirar la arena y otros elementos sólidos o flotantes que viene en el agua, proceso en el cual se disminuye la turbiedad del agua la cual es fundamental en el proceso de sedimentación de partículas (Sánchez-Gutiérrez y Jeréz-Rativa, 2018).

Desengrasadores

La trampa grasa se incluye en sistemas de tratamiento de aguas residuales para establecimientos con producción apreciable de grasas,

con el objeto de prevenir el taponamiento de las tuberías y daños en unidades posteriores. Es el sistema más sencillo para remoción de grasas y aceites, no emulsificadas (Hernández y Sánchez, 2014).

Pre-aireación

Es un término que se usa en el tratamiento de aguas servidas y que indica la inyección de aire u oxígeno en este fluido en la etapa preliminar o de pre-tratamiento. Los objetivos de este tratamiento consisten en mejorar la tratabilidad del agua, procurar la separación de las grasas, reducir los malos olores que se generan en esta etapa, separación de arenas y distribución uniforme de sólidos (Metcalf & Eddy, 1995c).

Tratamiento primario

Los objetivos del tratamiento primario son:

- 1) eliminar la materia decantable orgánica e inorgánica, mediante decantación
- 2) eliminar la materia flotante y las espumas, mediante barrido superficial.

La decantación primaria permite eliminar aproximadamente entre un 25 y un 50% de la demanda bioquímica de oxígeno (Ramdani *et al.*) del afluente, entre un 50 y un 70% de su materia en suspensión (Pimentel *et al.*) y un 65% del aceite y grasa que aquel contiene. Aunque la decantación primaria permite eliminar al mismo tiempo una parte del nitrógeno orgánico, del fósforo orgánico y de los metales pesados contenidos en el afluente, este nivel de tratamiento no afecta ni a la materia coloidal ni a la materia disuelta. Al efluente de una instalación de tratamiento primario se le designa como efluente primario. Los tanques de sedimentación o decantadores primarios pueden ser circulares o rectangulares, siendo su profundidad normal de 3,0 y 4,5 m. El tiempo de permanencia hidráulica oscila entre 2 y 3 horas. La materia sólida decantada, denominada tango primario, se extrae del fondo del decantador mediante un sistema de rasquetas de fondo, que empujan el tango hacia una tolva central, desde donde es impulsado hacia las instalaciones de tratamiento de tango. La espuma se elimina mediante un barrido superficial del tanque y se evacua mediante chorros de agua o medios mecánicos

a través de un extractor o tolva de espumas. Las espumas así obtenidas se envían también hacia las instalaciones de tratamiento de tangos. El tiempo de permanencia del fango en el digestor puede variar entre un mínimo de 10 días, para un reactor de alta carga provisto (Mujeriego, 1990b).

Cribado

Es un dispositivo con aberturas, generalmente de tamaño uniforme, que se utiliza para retener grandes sólidos que se encuentran en el agua residual. El principal objetivo del sistema de cribado es retener sólidos gruesos que floten o que se encuentren suspendidos en el agua con el fin de proteger el sistema contra obstrucciones en los tratamientos posteriores (Sepulveda Mancipe *et al.*, 2017).

Las rejillas de finos tienen aberturas de 5 mm o menos. Generalmente están fabricadas de malla metálica de acero, o en base a placas o chapas de acero perforado y se usan muchas veces en lugar de tanques de sedimentación. Las rejillas o cribas de gruesos tienen aberturas que pueden oscilar entre los 4 y 8 o 9 cm (Ramalho, 2003a).

Sedimentación

La sedimentación o clarificación es la remoción de partículas, flóculos químicos y precipitados de una suspensión en un sedimentador que actúa por gravedad. La sedimentación se emplea para eliminar la fracción de sólidos sedimentables de los sólidos en suspensión (60% de los sólidos que son perceptibles a simple vista en el agua). Se consideran sólidos sedimentables a las partículas que por su tamaño y peso sedimentan en una hora (CONAGUA, 2007e).

Flotación

La flotación es una operación utilizada para separar sólidos dispersos y líquidos inmiscibles suspendidos en una fase líquida. La separación se obtiene introduciendo finas burbujas (generalmente aire) en la fase líquida, las burbujas se adhieren a las partículas contaminantes y forman aglomerados con una densidad aparente menor a la de la fase líquida. La

fuerza de empuje generada hace que las partículas suban a la superficie donde pueden ser removidas con facilidad (Forero *et al.*, 1999).

Homogeneización

Es el mezclado de los distintos efluentes generados en el proceso productivo consiguiendo la disminución del caudal del flujo y de las concentraciones de las diferentes características del vertido siendo más uniforme con el tiempo. Este proceso mejora la tratabilidad del agua residual, estabiliza el pH, reduce los requerimientos de área y las cargas para un tratamiento posterior, se hace más fácil la dosificación de los reactivos y mejora la confiabilidad y rendimiento del proceso (Alfonso-Correa y Vargas-Guerrero, 2018a).

Neutralización

La neutralización es la adición de sustancias básicas o ácidas al agua para obtener un pH neutro, se emplea para ajustar el pH. Los reactivos y las cantidades que intervienen así como la economía del proceso dependen de las características del agua, principalmente de su alcalinidad (CONAGUA, 2007c).

Tratamiento Secundario

El tratamiento secundario es el nivel de tratamiento previo exigido cuando existe un riesgo moderado de que el público pueda entrar en contacto con el agua residual. En general, el tratamiento secundario se efectúa a continuación del tratamiento primario y consiste en la eliminación de la materia orgánica biodegradable, tanto disuelta como coloidal, mediante un proceso biológico aerobio. Este tratamiento biológico aerobio lo llevan a cabo diversos microorganismos aerobios, principalmente bacterias que, en presencia de oxígeno, metabolizan la materia orgánica contenida en el agua residual, dando lugar a un mayor número de microorganismos y a una serie de subproductos inorgánicos, principalmente dióxido de carbono, amoníaco y agua. Son varios los procesos biológicos aerobios que se utilizan como tratamiento secundario. Los

procesos difieren en el modo de suministrar el oxígeno que necesitan los microorganismos y en la velocidad a la que los microorganismos metabolizan la materia orgánica.

Tratamientos aerobios

Consiste en la eliminación por microorganismos y en presencia de oxígeno, de los compuestos orgánicos existentes en él. Se formarán compuestos sólidos que se separarán fácilmente de la fracción líquida mediante procesos de decantación (López del Pino y Martín-Calderón, 2014). Este tratamiento puede realizarse mediante:

- ✚ Lagunas aireadas
- ✚ Lodos activos
- ✚ Biodiscos

Lagunas aireadas

Las lagunas aireadas se caracterizan por tener un tiempo de permanencia hidráulica que oscila entre 7 y 20 días, y una profundidad del agua igual o superior a 2,4 m. En general, el oxígeno necesario para efectuar el tratamiento lo suministran aireadores mecánicos superficiales que agitan el agua; no obstante, el aporte de oxígeno se ha realizado en algunos casos mediante dispositivos sumergidos que suministran aire por difusión. Normalmente, la única parte del líquido que se mezcla es la situada en la capa superficial de la laguna, lo que permite el desarrollo de una zona anaerobia en su fondo. La materia orgánica decantada en el fondo de la laguna es mineralizada por las bacterias anaerobias (Mujeriego, 1990a).

Discos biológicos

Los biodiscos son sistemas de tratamiento biológico aerobio de aguas residuales. La biomasa se presenta simultáneamente en la forma de biopelícula fija (adheridas a los discos) y biopelícula en suspensión (como biomasa en el reactor). Aunque en mayor medida y la de mayor importancia es la biopelícula fija. Consiste en un

medio de soporte formado por discos de algún material en específico. Estos discos pueden estar parcial o totalmente sumergidos en el agua residual, y son montados paralelos entre sí y perpendicular al eje de soporte. El eje de soporte está unido a un motor mecánico que le da una velocidad de rotación a los discos. Inmediatamente después del arranque del sistema, los microorganismos presentes en el agua residual comienzan a adherirse al medio en movimiento y a desarrollarse (Delgado-Sandoval, 2019).

Lagunas de estabilización

Las lagunas de estabilización, también denominadas lagunas de oxidación, utilizan las algas coma fuente de oxígeno para el proceso de tratamiento. El contenido de la laguna se mezcla únicamente por efecto de la acción del viento y de las corrientes térmicas. El tiempo de permanencia hidráulica de estas lagunas oscila entre 20 y 30 días, pudiendo llegar a valores muy superiores a estos; la profundidad normal oscila entre 1,8 y 2,4 m. Solamente la capa superior, de 0,9 a 1,2 m, permanece aerobia (Mujeriego, 1990c).

Las lagunas de estabilización constituyen la tecnología de tratamiento de aguas residuales más costo-efectiva para la remoción de microorganismos patógenos, porque funciona por medio de mecanismos de desinfección natural. El agua residual en estos sistemas de tratamiento es generalmente de origen doméstico, con una carga orgánica que puede ser tratada a través de procesos químicos, físicos y, biológicos (Méndez Sayago *et al.*, 2011).

Percoladores

La base fundamental de los filtros percoladores consiste en, disponer de una superficie elevada, de tal forma que la masa de microorganismos que se desarrolle sobre la misma sea muy importante, y en consecuencia disponer de una alta capacidad de

eliminación de materia orgánica biodegradable. Básicamente se compone de un taque en el cual se encuentra el relleno apropiado y sobre el que se riega con el agua residual, formando una fina lamina a caer a través del mismo. Sobre la superficie del relleno, se desarrolla una película de biomasa, que captura la materia orgánica disuelta en el agua a su paso. El oxígeno necesario para el proceso lo obtiene la biomasa del aire que circula a través de los huecos dejados por el relleno (Sainz Sastre, 2005).

Tratamiento por Lodos activados

El proceso más utilizado y conocido en tratamiento biológico de aguas es el proceso de lodos activos o lodos activados. Se fundamenta en la utilización de microorganismos, mayoritariamente bacterias heterótrofas facultativas, que crecen naturalmente en el agua residual y convierten la materia orgánica disuelta y particulada presente en el agua en productos más simples (dióxido de carbono y agua) y nuevas bacterias (Buitrón-Méndez *et al.*, 2018). El proceso de lodos activados es una forma de tratamiento donde el agua residual y el lodo biológico o activado-formado por una población heterogénea de microorganismos son mezclados y aireados en un tanque o reactor; para posteriormente ser separados mediante sedimentación y recircularlos dentro del sistema. En el proceso de lodos activados, los microorganismos son completamente mezclados con la materia orgánica del agua residual, la que sirve de alimento para su propio crecimiento y reproducción. A medida que la población de microorganismos aumenta, se agrupa y forma flóculos para producir una masa activa llamada lodo activado. El lodo activado es de color café, cuando es sano huele a “tierra mojada”, presenta una estructura granular y sedimenta rápidamente (IMTA, 2009a).

Lodos activados convencional

El agua a tratar y el lodo activado recirculado entran en el tanque de aireación y se mezclan con aire disuelto o con agitadores

mecánicos. El suministro del aire suele ser uniforme a lo largo de toda la longitud del canal. Durante el período de aireación, se produce la adsorción, floculación y oxidación de la materia orgánica. Los sólidos del lodo activado se separan en un sedimentador secundario, los tiempos de retención hidráulica varían entre 4 a 8 horas (IMTA, 2009b).

Aireación prolongada

El proceso de aireación prolongada también conocido como oxidación total, es una modificación del proceso de lodos activados. La idea fundamental de la aireación prolongada es disminuir la cantidad de lodo residual en comparación al proceso convencional de lodos activos. Esto se consigue aumentando el tiempo de residencia; de esta forma el volumen del reactor es comparativamente mayor que el requerido en el proceso de lodos activos. Todo el lodo degradable formado se consume mediante respiración endógena. La ventaja principal de este proceso es el tamaño pequeño de las instalaciones en comparación al procesos convencional de lodos activados (Ramalho, 1996a).

Estabilización por contacto

Este proceso se basa en las propiedades de los lodos activados para el tratamiento de residuos con un alto contenido de materiales biodegradables, coloidales y en suspensión. Las aguas residuales se ponen en contacto con los lodos recirculados en un tanque de aireación, llamado "estanque de contacto", durante un período muy corto de una hora o menos, ya que el proceso de adsorción es relativamente rápido (CENAPRED, 1993).

Aireación decreciente

En tanques de aireación largos y angostos (relación largo/ancho mayor de 8) se presenta un flujo tipo pistón con una demanda mayor

de oxígeno a la entrada, disminuyendo hasta la salida. La cantidad total de aire se obtiene como en un proceso de lodos activados convencional, pero su distribución se hace decrecer a lo largo del tanque colocando menos difusores o aireadores (IMTA, 2009b)

Mezcla completa convencional

Consiste en uniformizar la aireación y la entrada del licor mezclado en el tanque de aireación y extraer los lodos de una forma igualitaria a lo largo del tanque. Con este sistema se logra que la demanda de oxígeno permanezca constante en todos los lugares del tanque de aireación siendo más eficiente la utilización del aire suministrado (CONAGUA, 2016a).

Aireación extendida

Técnica que se utiliza en el tratamiento de aguas que exige una fuente de oxígeno, funciona mediante la inyección de aire con motor soplador a través de difusores de burbuja fina. El aire es presionado a través de la superficie del agua, este burbujea y el agua se provee de oxígeno. Más información sobre la aireación (Ramos-Calla, 2013).

Zanjas de oxidación

Las zanjas de oxidación son una variante del proceso de lodos activados por aireación extendida. El proceso se asemeja a la autopurificación de un río que mantiene condiciones aerobias en su recorrido, con una inoculación de microorganismos (lodos activados) en el lugar de la aplicación de las aguas residuales (CONAGUA, 2016a)

Tratamientos anaerobios

Es la descomposición u oxidación de la materia orgánica realizada por bacterias en ausencia de oxígeno libre, se realiza generalmente en reactores cerrados, la mayoría de las sustancias orgánicas se convierte en dióxido de carbono y metano. Consiste en la eliminación de la materia orgánica, empleando bacterias que actúan en ausencia de oxígeno. Este proceso es menos eficiente en la

producción de energía que el aerobio, debido a que la mayoría de la energía liberada en el catabolismo permanece en el producto final como el metano y la cantidad de biomasa generada es de menor proporción (Alfonso-Correa y Vargas-Guerrero, 2018b).

Este tratamiento puede realizarse mediante varios sistemas:

- ✚ Lagunas anaerobias
- ✚ Filtros anaerobios
- ✚ Lecho expandido

Lagunas anaerobias

El proceso que tiene lugar en ellas consta de dos etapas, en la primera se descomponen las cadenas complejas de materia orgánica y en la segunda un grupo de bacterias anaerobias transforman los productos anteriores en gas metano, amoníaco, anhídrido carbónico e hidrógeno.

Filtro anaerobio

El agua fluye en sentido ascendente por una columna rellena de medios sólidos en el que están fijas y se desarrollan las bacterias anaerobias.

Lecho Expandido

El agua residual se bombea a través de un lecho de material adecuado como arena, carbón, conglomerado, en el que se han desarrollado el cultivo biológico (Lombardero, 2009).

Tratamiento terciario

El tratamiento avanzado se utiliza cuando se desea eliminar alguno de las componentes del agua residual que no es posible eliminar mediante el tratamiento secundario.

El proceso de desinfección consiste normalmente en la inyección de una disolución de cloro al inicio del canal de cloración. La dosis de cloro depende entre otros factores del contenido microbiano del agua residual, aunque su valor oscila normalmente entre 5 y 10 mg/l.

Micro-tamizados

Hecho sobre tela metálica o plástica de malla inferior a 100 micras. Se usa para eliminar materias en suspensión muy pequeñas contenidas en el agua de abastecimiento o en aguas servidas pre tratadas (Alfaro-Vega y Fernández- Neyra, 2019a).

Filtración

La filtración es otro proceso de separación de sólidos desde un agua, basado en el paso de una mezcla sólido-líquido a través de un medio más o menos poroso el cual retendrá los sólidos, permitiendo por el contrario el paso al líquido. Dependiendo del tamaño de los sólidos con relación al de los poros, la filtración podrá radicarse bien en la superficie del medio filtrante, bien en profundidad o más generalmente en ambas zonas (Marín.Galvín, 2013)

Precipitación, coagulación y floculación

La precipitación es el proceso físico que consiste en la separación de las partículas suspendidas sedimentables del agua, por efecto gravitacional.

La coagulación es el proceso de adición de compuestos químicos al agua, para alterar el estado físico de los sólidos disueltos, coloidales o suspendidos, a fin de facilitar su remoción por precipitación o filtración.

La floculación es una aglomeración de partículas desestabilizadas en el proceso de coagulación química, a través de medios mecánicos o hidráulicos (NOM-127-SSA1, 1994).

Adsorción

El proceso de la adsorción consiste, en la captación de sustancias solubles presentes en la interfase de una solución. Esta interfase puede hallarse entre un líquido y un gas, un sólido, o entre dos líquidos diferentes. El tratamiento del agua residual con carbón activado suele estar considerado como un proceso de refinado de aguas que ya han recibido un tratamiento biológico normal. El carbón se emplea para eliminar parte de la materia orgánica disuelta, así mismo puede eliminar parte de la materia

particulada, dependiendo de la forma en la que se encuentra en contacto el carbón y el agua (Metcalf & Eddy, 1995b).

Intercambio iónico

Es el proceso de hacer reaccionar los iones calcio y magnesio que se encuentran presentes en el agua dura con los iones de la resina que se encuentra dentro del intercambiador o también llamado ablandador que por lo general contiene iones de sodio. Es así que al intercambiar estos iones el agua queda libre de tales iones que hacen producir una dureza en el agua, obteniendo así un agua sin estos minerales (Soto-Espinoza, 2016).

Osmosis Inversa

Osmosis es el fenómeno que consiste en el paso recíproco de líquidos de distinta densidad a través de una membrana semipermeable que los separa. El osmosis inversa es uno de los métodos de purificación más importante; forma parte del tipo de membranas de filtrado con flujo cruzado. Este es un proceso en que se remueven tanto los orgánicos disueltos como las sales, usando un mecanismo diferente del intercambio iónico o el carbón activado. Para entender el proceso de la ósmosis inversa, cabe recordar la ósmosis natural como un mecanismo de transferencia de nutrientes en las células de los seres vivos a través de las membranas que las recubren. En tal sentido, cuando se ponen en contacto dos soluciones de diferentes concentraciones de un determinado soluto (por ejemplo sales), se genera un flujo de solvente (por ejemplo agua) desde la solución más diluida a la más concentrada, hasta igualar las concentraciones de ambas. El agua que atraviesa la membrana es "empujada" por la presión osmótica de la solución más salada y el equilibrio del proceso se alcanza cuando la columna hidrostática iguala dicha presión osmótica (Escobedo *et al.*, 2006).

Cloración

La utilización del cloro como desinfectante es el método de desinfección más común, la cloración juega un papel muy importante en todo el mundo

para evitar infecciones. Se están utilizando numerosos derivados clorados para llevar a cabo estas desinfecciones, como pueden ser cloro gas, hipoclorito o dióxido de cloro; el ácido hipocloroso es el que efectúa una función germicida, pudiendo el resto de compuesto transformarse en él previa reacción con el agua (Osorio-Robles *et al.*, 2011). Gracias a este proceso se asegura que el consumidor reciba agua esencialmente saludable mediante la destrucción de los agentes patógenos y, además, que mantenga una barrera protectora contra los gérmenes dañinos a la salud humana que se podrían introducir en el sistema de abastecimiento de agua, suprimiendo de esta manera la posterior contaminación microbiológica del agua. Todo esto se consigue mediante la utilización del cloro gas como tal o en forma de hipoclorito sódico o hipoclorito cálcico (Yahyaoui *et al.*, 2018).

Ozonización

El ozono (O₃) puede ser usado como desinfectante del agua residual, después de que ésta se haya sometido a tratamiento. Como desinfectante, el ozono es un agente efectivo en la desactivación de bacterias, esporas bacterianas y microorganismos vegetativos encontrados en las aguas residuales. Adicionalmente, el ozono actúa para oxidar químicamente materiales encontrados en el agua residual. La inyección del ozono al flujo de agua residual puede ser llevada a cabo mediante el uso de aparatos de mezcla mecánicos, columnas de flujo a corriente o contracorriente, difusores porosos o inyectoros jet. Por su rápida acción requiere de períodos de contacto relativamente cortos (CONAGUA, 2007b).

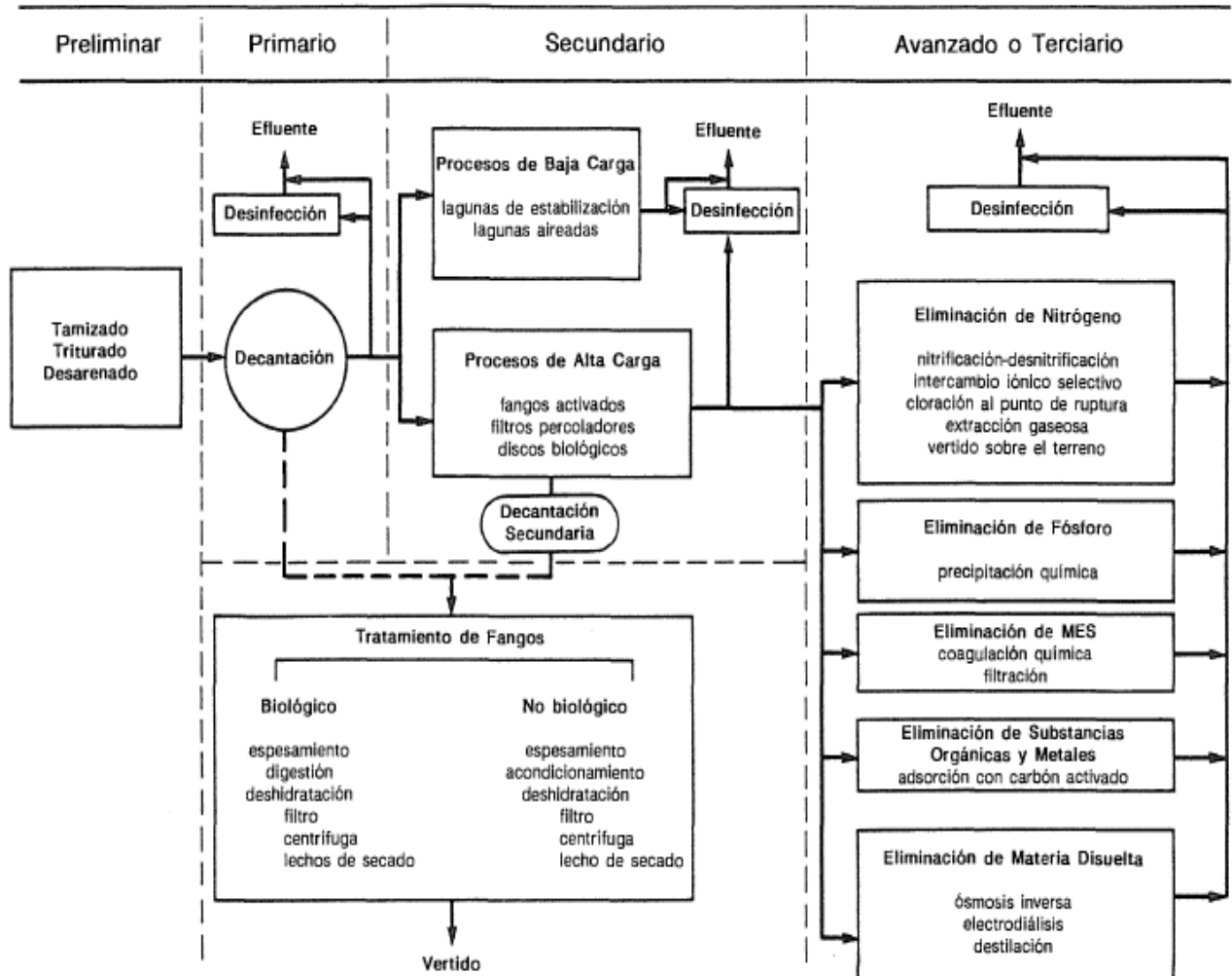


Ilustración 3. Diagrama general del proceso de tratamiento de aguas residuales (Mujeriego, 1990b)

Aguas residuales para reúso en el medio urbano

La utilización de efluentes urbanos es reconocida como alternativa viable para aumentar la disponibilidad local de recursos hídricos y por su aporte de nutrientes fertilizantes para las plantas, sin embargo, la puesta en marcha de esta actividad requiere a su vez de determinadas medidas para evitar riesgos tanto para la salud humana como para el medio ambiente (FAO, 2017).

Entre las aplicaciones más habituales de las aguas residuales depuradas, en el medio urbano se pueden citar:

- ✚ Riego de zonas públicas (parques y jardines, campos de deportes, medianas y andenes de autopistas, etc.).
- ✚ Riego y limpieza de urbanizaciones o áreas residenciales.

- ✚ Riego y limpieza de zonas comerciales, polígonos industriales, etc.
- ✚ Riego de campos de golf.
- ✚ Usos comerciales: lavado de automóviles, limpieza de ventanas y cristalerías de grandes edificios.
- ✚ Usos ornamental y decorativo: fuentes.
- ✚ Red de agua para uso contra incendios.

La reutilización de aguas urbanas puede incluir sistemas de servicios específicos para cada gran usuario, tales como grandes parques, campos de golf, complejos industriales con alto consumo de agua y áreas residenciales o comerciales (Prats y Melgarejo, 1995).

La NOM-003-SEMARNAT-1997 considera como reúso en el medio urbano con contacto directo los siguientes reúsos: llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en lancha, remo, canotaje y esquí; fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego de parques y jardines. Y como reúso en servicios al público con contacto indirecto u ocasional riego de jardines y camellones en autopistas; camellones en avenidas; fuentes de ornato, campos de golf, abastecimiento de hidrantes de sistemas contra incendio, lagos artificiales no recreativos, barreras hidráulicas de seguridad y panteones, siendo actividades en las que se puede reutilizar el efluente del agua residual en el medio urbano.

Plantas de tratamiento de aguas residuales

En la actualidad, en México se encuentran 2,540 plantas de tratamiento de aguas residuales en operación, siendo Sinaloa el estado con más PTAR funcionando y Coahuila el estado con menos plantas en operación.

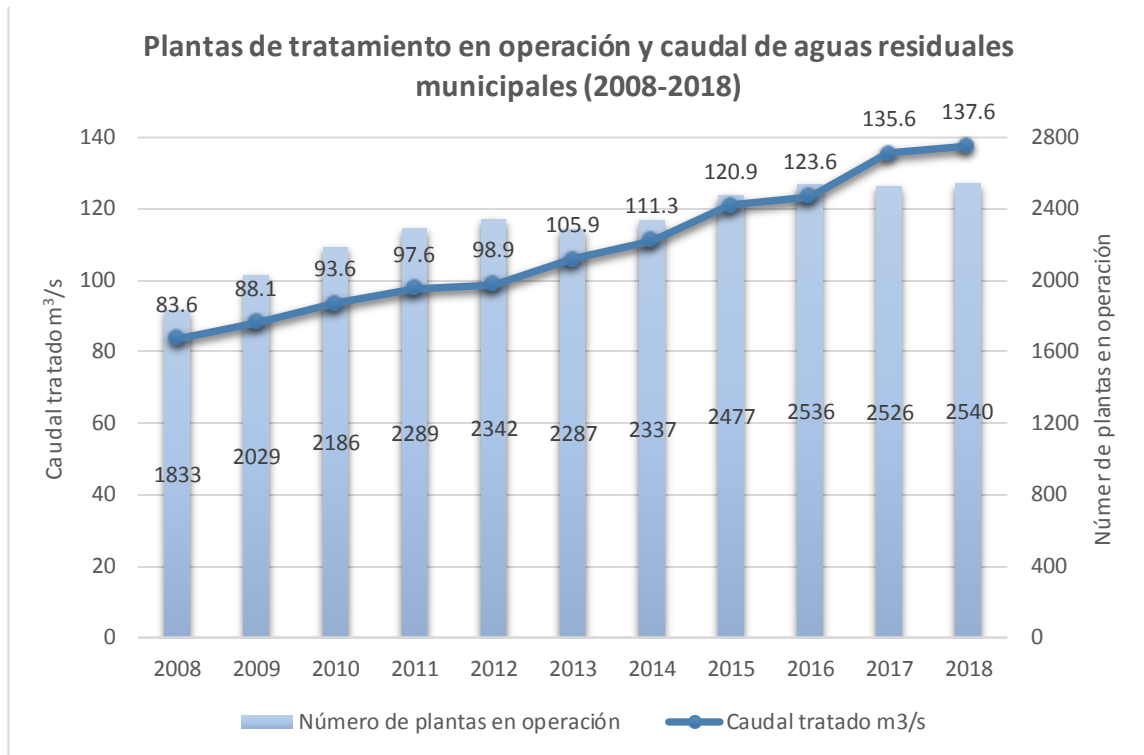


Ilustración 4. Plantas de tratamiento en operación y caudal de aguas residuales 2008-2018 (CONAGUA, 2015)

En la región norte del país que abarca los estados de: Baja California, Baja California Sur, Coahuila, Chihuahua, Durango, Nuevo León, Sonora y Tamaulipas se encuentran en operación 653 plantas de tratamiento de aguas residuales.

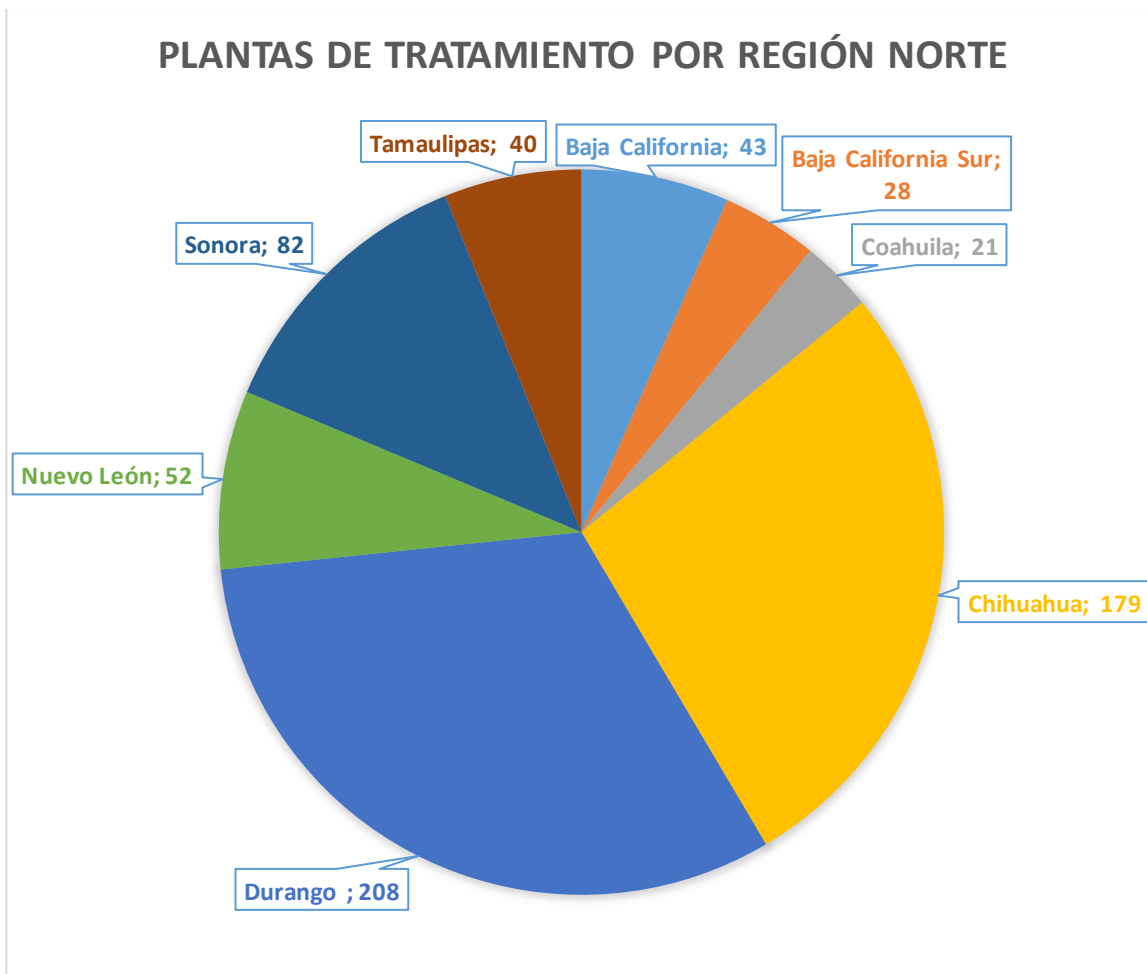


Ilustración 5. Plantas de tratamiento de aguas residuales por región norte (CONAGUA, 2015)

Plantas de tratamiento en la región norte del país

Baja California tiene 43 PTAR en operación, las cuales tratan un caudal de 5479.9 l/s.

Municipio	Localidad	Nombre de la Planta	Proceso	Reúso
Mexicali	Mexicali	CETYS	Lodos Activados	Riego de campos deportivos
Mexicali	Mexicali	U.A.B.C.	Lodos Activados	Riego de campos deportivos, áreas verdes y jardines
Playas de Rosarito	Puerto Nuevo	Puerto Nuevo	Lodos Activados	Riego de áreas verdes
Tijuana	Tijuana	Club Campestre	Lodos Activados	Riego de campos de golf
Tijuana	Tijuana	El prado	Lodos Activados	Riego de áreas verdes de un parque adyacente

Tijuana	Tijuana	La morita	Zanjas de Oxidación	Reúso en viveros y riego de áreas verdes.
Tijuana	Tijuana	San Antonio de los Buenos	Lagunas Aireadas	El reúso en zonas arboladas y jardines en los terrenos de la misma planta
Tijuana	Tijuana	San Antonio del Mar	Lodos Activados	Descargas al océano pacífico y riego de áreas verdes
Tijuana	Tijuana	Santa Fe	Lodos Activados	Descarga en arroyo y riego de áreas verdes

Tabla 6. Plantas de tratamiento de Baja California que usan sus efluentes en riego de áreas verdes (CONAGUA, 2015)

Sólo 9 de las 43 plantas utilizan su efluente para el riego de áreas verdes, con procesos de Lodos activados, lagunas aireadas y zanjas de oxidación.

En Baja California Sur hay 28 PTAR, las cuales tratan 1 242.0 l/s.

Municipio	Localidad	Nombre de la Planta	Proceso	Reúso
Loreto	Loreto	Loreto	Lodos Activados	Campos de golf y áreas verdes
Loreto	Nopoló	Nopoló	Lodos Activados	Campos de golf
Los Cabos	Cabo San Lucas	El Arenal	Lodos Activados	Campos de golf y áreas verdes
Los Cabos	Cabo San Lucas	Los Cangrejos	Terciario	Campos de golf
Los Cabos	Cabo San Lucas	Miraflores	Lodos Activados	Riego de áreas verdes
Los Cabos	Cabo San Lucas	Sonrise	Lodos Activados	Campos de golf y áreas verdes
Los Cabos	La Ribera	La Ribera	Aerobio	Áreas verdes
Los Cabos	San José del Cabo	La Sonoreña	Terciario	Campos de golf
Los Cabos	San José del Cabo	San José del Cabo	Lodos Activados	Campos de golf y áreas verdes
Los Cabos	Santiago	Santiago	Aerobio	Áreas verdes

Tabla 7. Plantas de tratamiento de aguas residuales de Baja California Sur que usan su agua tratada en riego de áreas verdes (CONAGUA, 2015)

De las 28 plantas en operación, solo 10 utilizan el agua tratada para su reutilización en riego de áreas verdes, utilizan procesos de lodos activados, aerobio y terciario.

El estado de Chihuahua cuenta con 179 plantas de tratamiento de aguas, de las cuales solo 1 utiliza su efluente para su reutilización en el riego de áreas verdes, que utiliza el proceso de lodos activados.

Municipio	Localidad	Nombre de la Planta	Proceso	Reúso
Juárez	Juárez	U.A.C.J. Campus Juárez	Lodos Activados	Áreas verdes

Tabla 8. Plantas de tratamiento de aguas residuales del estado de Chihuahua que reúsan el agua en el riego de áreas verdes (CONAGUA, 2015)

El estado de Coahuila cuenta con 21 plantas de tratamiento de aguas residuales en operación.

Municipio	Localidad	Nombre de la Planta	Proceso	Reúso
Saltillo	Saltillo	El Chapulín (Jardines para la humanidad)	Lodos Activados	Parques y jardines
Saltillo	Saltillo	Gran Bosque Urbano	Lodos Activados	Áreas verdes
Saltillo	Saltillo	Saltillo I, Club Campestre	Zanjas de Oxidación	Campo de golf
Torreón	Torreón	Club Campestre la Rosita	Lodos Activados	Campo de golf
Torreón	Torreón	Cooperativa Torreón Jardín	Lodos Activados	Riego de áreas verdes
Torreón	Torreón	Las Etnias	Lodos Activados	Riego de áreas verdes del bosque urbano
Torreón	Torreón	Met Mex Peñoles	Lodos Activados	Industrial y riego de áreas verdes

Tabla 9. Plantas de tratamiento de Estado de Coahuila que reúsan el agua tratada en riego de áreas verdes (CONAGUA, 2015)

De las 21 plantas, solo 5 utilizan su agua para reúso en riego de áreas verdes, las cuales utilizan procesos de lodos activados y zanjas de oxidación.

En el municipio de Torreón hay 5 plantas de las cuales, cuatro utilizan el proceso de Lodos activados y una es de Lagunas de estabilización, los efluentes tratados son destinados a reúso en riego de áreas verdes, usos recreativos (campos de golf), uso industrial y riego agrícola.

Municipio	Localidad	Nombre de la planta	Proceso	Capacidad instalada (l/s)	Caudal tratado (l/s)	Cuerpo receptor o reuso	Observaciones
Torreón	Torreón	Club Campestre La Rosita	Lodos Activados	50.0	30.0	Recreativo (campo de golf)	Inició operación en 1991
Torreón	Torreón	Cooperativa Torreón Jardín	Lodos Activados	15.0	13.0	Riego de áreas verdes	Inició operación en 1999
Torreón	Torreón	Las Etnias	Lodos Activados	20.0	20.0	Riego de áreas verdes del Bosque Urbano	Inició operación en 2013
Torreón	Torreón	Met Mex Peñoles	Lodos Activados	150.0	110.0	Industrial y Riego de áreas verdes	Inició operación en 1997
Torreón	Torreón	Torreón	Lagunas de Estabilización	1 900.0	1 400.0	Riego agrícola	Inició operación en 2003

Tabla 10. Plantas de tratamiento de aguas residuales del municipio de Torreón, Coahuila (CONAGUA, 2014).

El estado de Durango cuenta con 208 plantas de tratamiento, de las cuales solo dos de las plantas utilizan sus efluentes para reúso en riego de áreas verdes. Estas plantas utilizan los procesos de lodos activados y Lagunas de Estabilización.

Municipio	Localidad	Nombre de la Planta	Proceso	Reúso
Durango	Victoria de Durango	El Parque	Lagunas de Estabilización	Riego del parque Guadiana y Sahuatoba
Gómez Palacio	Gómez Palacio	Centenario	Lodos Activados	Centenario (riego de áreas verdes)

Tabla 11. Plantas de tratamiento de aguas residuales del estado de Durango que reutilizan el agua en riego de áreas verdes (CONAGUA, 2015)

En el estado de Nuevo León hay 52 plantas de tratamiento, pero ninguna utiliza su efluente en el riego de áreas verdes.

En Sonora operan 82 plantas de tratamiento de las cuales solo 5 reutilizan el agua en actividades de riego de áreas verdes, mediante los procesos de lodos activados y lagunas de estabilización.

Municipio	Localidad	Nombre de la Planta	Proceso	Reúso
Guaymas	San Carlos	San Carlos	Lagunas de Estabilización	Campos de golf
Hermosillo	Hermosillo	Fracc. Los Lagos	Lodos Activados	Campos de golf

Hermosillo	Hermosillo	La Saucedá	Lodos Activados	Calles y áreas verdes
Hermosillo	Hermosillo	Los Arroyos	Lodos Activados	Riego de áreas verdes y calles
Puerto Peñasco	Puerto Peñasco	Puerto Peñasco	Lagunas de Estabilización	Riego de áreas verdes

Tabla 12. Plantas de tratamiento de aguas residuales de Sonora que reúsan sus efluentes en riego de áreas verdes (CONAGUA, 2015)

En el estado de Tamaulipas operan 40 plantas de tratamiento de aguas residuales, pero ninguna de sus plantas utiliza los efluentes para reúso en riego de áreas verdes.

Tratamientos utilizados para aplicarlo en el riego de áreas verdes en la región norte de México

ESTADOS DE LA REGIÓN NORTE DE MÉXICO	PROCESO UTILIZADO PARA REÚSO DE EFLUENTES EN RIEGO DE ÁREAS VERDES		
BAJA CALIFORNIA	Lodos Activados	Lagunas Aireadas	Zanjas de oxidación
BAJA CALIFORNIA SUR	Lodos Activados	Tratamiento terciario	Aerobio
COAHUILA	Lodos Activados	Zanjas de oxidación	Lagunas de Estabilización
CHIHUAHUA		Lodos Activados	
DURANGO		Lodos Activados	
NUEVO LEÓN		NA	
SONORA	Lodos Activados		Lagunas de Estabilización
TAMAULIPAS		NA	

Tabla 13. Procesos utilizados en la región norte de México para reúso de efluentes en riego de áreas verdes

Sistemas de tratamiento de aguas residuales para riego de áreas verdes

De acuerdo a (Ugaz-Odar, 2018) en el estudio “Reúso de aguas residuales tratadas biológicamente, para el regadío del Jardín Botánico, Trujillo” el diseño del proceso consideró que el agua residual es residencial, biodegradable y que puede ser tratada por operaciones y procesos unitarios convencionales.

El sistema de tratamiento está compuesto por un tratamiento preliminar: A través de rejillas finas y desarenadores estrictamente diseñados con el objeto de eliminar sólidos suspendidos de gran tamaño que afecten negativamente a los biofiltros,

equipos y unidades subsecuentes de tratamiento, además la separación de grasas y aceites del cuerpo de agua residual.

Tratamiento Secundario (Bio-Filtro): Es la combinación de una acción mecánica de retención de las materias en suspensión (MES), mediante la filtración y de una transformación biológica de los contaminantes contenidos en las aguas que se han de tratar, mediante la intervención de microorganismos. Se compone de 3 fases: Una fase sólida, de un material granular (arcilla), una fase líquida, donde ingresan aguas que se han de depurar, una fase gaseosa, la insuflación de aire en la masa filtrante necesaria para la degradación aeróbica de la materia orgánica.

Tratamiento Terciario (Desinfección) Se contempla un sistema de desinfección como respaldo para reducción de coliformes. Se seleccionó para el Proyecto el método de desinfección con cloro.

Tratamiento final y disposición de lodos: El lodo es extendido sobre la arena, formando una capa de 200 a 300 mm de espesor y se deja secar, el lodo se deshidrata por drenaje a través de la masa de lodo y arena y por evaporación de la superficie expuesta al aire.

El sistema de tratamiento de agua residual para el riego de áreas verdes de acuerdo a "Tratamiento de aguas residuales del campus n° II de la Universidad Nacional del Santa para uso del riego en áreas verdes." un estudio realizado en Perú en 2019 consiste en: PRE-TRATAMIENTO + LODOS ACTIVADOS (Modalidad aireación extendida) + SEDIMENTADOR SECUNDARIO + DESINFECCIÓN (cámara de contacto con cloro).

El sistema de tratamiento consiste en (Alfaro-Vega y Fernández- Neyra, 2019b):

Pre-tratamiento: Cámara de rejillas medias; ubicada a la entrada del recinto de la planta. Tiene por finalidad retener cuerpos extraños o sólidos gruesos que pueden alterar posteriormente el proceso de tratamiento y el desarenador que es una estructura diseñada para retener la arena que traen las aguas servidas a fin

de evitar que ingresen al proceso de tratamiento y lo obstaculicen creando serios problemas.

Tratamiento primario: Ecuador sirve de pre-aireación y homogenización del caudal afluente, cuya función es dotar de caudales de diseño al sistema de lodos activados. Y en momentos de poco caudal permite que el sistema de lodos activados trabaje siempre con un caudal determinado. El diseño del estanque ecualizador es el mismo que el de lodos activados, ya que cuando se realiza el mantenimiento de este último, el estanque ecualizador permite que el sistema de tratamiento total no se interrumpa.

Tratamiento secundario: Lodo activo modalidad aireación extendida, en este proceso la masa de agua doméstica en este estanque es agitada y aireada para evitar la sedimentación de sólidos y mantener su condición aeróbica. El agua residual ingresa al estanque de aireación donde se mezcla con lodo. Lo resultante es conocido como licor de mezcla, el cual es aireado dentro del mismo estanque. Las bacterias que naturalmente se encuentran en el agua doméstica, se nutren de la materia orgánica que se encuentra en suspensión y en disolución, generándose un aumento de la población microbiana y un consumo de oxígeno. Una vez que se ha logrado metabolizar la materia orgánica y flocular las partículas, se hace pasar la mezcla a un estanque de sedimentación de flujo laminar donde se separan los sólidos por decantación, los que se acumulan en su fondo, obteniéndose en la zona superior agua clarificada (efluente). Por el hecho que estos lodos contienen gran cantidad de microorganismos y en menor medida materia orgánica, ellos son retornados al reactor, de modo de mantener una cantidad constante de biomasa activa en aireación (encargada de la degradación de materia orgánica), el sedimentador es de tipo circular.

Tratamiento terciario: Desinfección en este proceso el agua clarificada que abandona el sedimentador, al nivel de superficie (por rebalse), es conducida a un pequeño estanque donde se efectúa su desinfección mediante cloración por hipoclorito de sodio. Se persigue reducir la cantidad de microorganismos patógenos, para eliminar la posibilidad de provocar contagio de personas y otros

seres vivos producto del contacto con el curso de agua receptora. Luego de esta etapa se obtiene el Efluente final de la planta, que será apto para fines de regadío.

Ventajas de la utilización de aguas tratadas

La regeneración de aguas residuales ofrece numerosas ventajas, entre las que destacan;

- 1.-Un mayor ahorro energético
- 2.- Menores costes de vertido del agua residual
- 3.- Aprovechamiento de los elementos nutritivos contenidos en el agua, mediante su asimilación por los cultivos agrícolas y las plantas de jardinería
- 4.- Aplazamiento, disminución o incluso abandono de proyectos de construcción de instalaciones adicionales de tratamiento de agua de abastecimiento (Stuart y Asano, 2017).

El agua reciclada es una fuente confiable de agua que se debe tener en cuenta al formular una política de agua sostenible. La reutilización del agua es un campo en crecimiento. La necesidad de suministro adicional a través de la reutilización de las aguas residuales tratadas es una prioridad y también la protección del medio ambiente receptor se considera un tema importante (Angelakis *et al.*, 2003).

Otras de las ventajas de la reutilización del agua son (Faleschini, 2016):

- ✚ Disponibilidad de agua para riego considerable, predecible y constante, lo cual permite planificar sosteniblemente la viabilidad y las dimensiones para el riego de espacios verdes.
- ✚ Ahorro de agua potable
- ✚ Protección del medio ambiente
- ✚ Desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas en sitios con escasez de agua.

Legislación del agua

La gestión jurídica del agua en México tiene como fundamento lo que dictan tres artículos de la Constitución Política y la Ley de Aguas Nacionales.

- El artículo 4° reconoce que toda persona tiene derecho al acceso, la disposición y el saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado debe garantizar este derecho de forma equitativa y sustentable, y establecer la participación de la Federación, los estados y la ciudadanía para conseguirlo.

-El artículo 27 señala que las aguas son propiedad de la Nación y sienta las bases para que el Estado regule su aprovechamiento sostenible, con la participación de la ciudadanía y de los tres niveles de gobierno. Especifica que la explotación, el uso o aprovechamiento de los recursos se realizará mediante concesiones otorgadas por el Ejecutivo, con base en las leyes.

-El artículo 115, por su parte, especifica que los municipios tienen a su cargo los servicios públicos de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales (CPEUM, 2015).

Legislación para la contaminación del agua

El principal regidor de la contaminación del agua es la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), es un ordenamiento con leyes reglamentarias en materia de protección al ambiente, prevención y control de la contaminación de agua residual (LGEEPA, 2018).

Normatividad para la contaminación del agua en México

El comité consultivo de normalización tiene como objeto proponer, diseñar y aprobar la normatividad ambiental para el aprovechamiento sustentable, su conservación y restauración de los recursos naturales. Para la prevención y control de la contaminación del agua, se crearon normas oficiales mexicanas que establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en la descarga del agua residual.

NOM-001-SEMARNAT-1996

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es de

observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta Norma Oficial Mexicana no se aplica a las descargas de aguas provenientes de drenajes pluviales independientes, fue establecida el 30 de octubre de 1996. La Comisión Nacional del Agua llevará a cabo muestreos y análisis de las descargas de aguas residuales, de manera periódica o aleatoria, con objeto de verificar el cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos para los parámetros señalados en la presente Norma Oficial Mexicana (SEMARNAT, 1997a).

La concentración de contaminantes básicos, así como de contaminantes patógenos y parasitarios, toxicidad aguda y color verdadero, metales pesados y cianuros para las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, no debe exceder el valor indicado como límite permisible de acuerdo al tipo de cuerpo receptor en las Tablas 1 y 2.

<i>Parámetros (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)</i>	<i>Suelo</i>		
	<i>Riego de áreas verdes</i>		
	<i>P.M</i>	<i>P.D.</i>	<i>V.I.</i>
<i>Temperatura (°C)</i>	35	35	35
<i>Grasas y Aceites</i>	15	18	21
<i>Huevos de helminto (huevos/litro)</i>	1	1	1
<i>Escherichia coli (NMP/100ml)</i>	1000	1200	1400
<i>Enterococos fecales (NMP/100 ml)</i>	1000	1200	1400
<i>pH (upH)</i>	6.5-8.5		
<i>Color verdadero</i>	Pureza del 15%		
<i>Toxicidad aguda (Sánchez-Gutiérrez y Jeréz-Rativa)</i>	Menor o igual a 5		

Tabla 14. Límites máximos permisibles para riego de áreas verdes de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996.

LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS Y CIANUROS

PARAMETROS (miligramos por litro)	RIEGO DE ÁREAS VERDES		
	P.D.	P.M.	V.I.
Arsénico	0.2	0.3	0.4
Cadmio	0.05	0.075	0.1
Cianuro	2	2.5	3
Cobre	4	5	6
Cromo	0.5	0.75	1
Mercurio	0.005	0.008	0.01
Níquel	2	3	4
Plomo	0.5	0.75	1
Zinc	10	15	20

Tabla 15. Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996

NOM-002-SEMARNAT-1996

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal con el fin de prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como proteger la infraestructura de dichos sistemas, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta Norma no se aplica a la descarga de las aguas residuales domésticas, pluviales, ni a las generadas por la industria, que sean distintas a las aguas residuales de proceso y conducidas por drenaje separado. Esta norma fue aprobada el 6 de Enero de 1997.

LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES

PARÁMETROS (miligramos por litro, excepto cuando se especifique otra)	Promedio mensual	Promedio diario	Instantáneo
Grasas y aceites	50	75	100
Sólidos sedimentables (ml/l)	5	7.5	10
Arsénico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1	1.5	2

<i>Cobre total</i>	10	15	20
<i>Cromo hexavalente</i>	0.5	0.75	1
<i>Mercurio total</i>	0.01	0.015	0.02
<i>Níquel total</i>	4	6	8
<i>Plomo total</i>	1	1.5	2
<i>Zinc total</i>	6	9	12

Tabla 16. Límites Máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado de acuerdo a la NOM-002-SEMARNAT-1996

NOM-003-SEMARNAT-1997

Esta Norma Oficial Mexicana se aprobó el 22 de abril de 1998 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público, con el objeto de proteger el medio ambiente y la salud de la población, y es de observancia obligatoria para las entidades públicas responsables de su tratamiento y reúso.

LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES

TIPO DE REUSO	COLIFORMES FECALES NMP/100 ML	HUEVOS DE HELMINTO (h/l)	GRASAS Y ACEITES mg/l	PROMEDIO MENSUAL	
				DBO ₅ mg/l	SST mg/l
SERVICIO AL PÚBLICO CON CONTACTO DIRECTO	240	>1	15	20	20
SERVICIO AL PÚBLICO CON CONTACTO INDIRECTO O OCASIONAL	1000	<5	15	30	30

Tabla 17. Límites MÁXIMOS permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público de acuerdo a lo establecido en la NOM-003-SEMARNAT-1997

CONCLUSIÓN

Torreón es una región que sufre problemas de escasez de agua, debido a la sobreexplotación del recurso hídrico. Las actividades agropecuarias y mineras en las que se ha basado la región lagunera consumen enormes cantidades de agua, además de otras actividades como el riego agrícola, riego de áreas verdes y uso industrial. Por ello, el tratamiento y reúso de las aguas residuales es una buena alternativa para aprovechar los efluentes en las diversas actividades.

El tratamiento de aguas residuales para el reúso en áreas verdes ayuda a reducir el consumo del agua potable.

El proceso de Lodos activados es el mejor para llegar a la calidad del agua requerida de acuerdo a lo establecido en las NOM-001-SEMARNAT-1996 Y NOM-003-SEMARNAT-1997 para reúso en riego de áreas verdes con contacto directo y sin duda es el más utilizado para obtener la calidad requerida para esta actividad. Las plantas de tratamiento de aguas residuales que enfocan sus efluentes al riego de espacios verdes utilizan sistemas de lodos activados principalmente, lagunas aireadas, zanjas de oxidación, terciario, aerobio y lagunas de estabilización.

REFERENCIAS

- AGUA 2014. ¿QUÉ ES EL AGUA? consultado en línea en enero 2020(<https://agua.org.mx/que-es/>):
- Alfaro-Vega, Y. y Y. Fernández- Neyra 2019a. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL CAMPUS N° II DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA PARA USO DEL RIEGO EN ÁREAS VERDES, UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA 120
- Alfaro-Vega, Y. A. y Y. D. Fernández- Neyra 2019b. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL CAMPUS N° II DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA PARA USO DEL RIEGO EN ÁREAS VERDES. Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad Nacional del Santa
- Alfonso-Correa, L. A. y L. T. Vargas-Guerrero 2018a. DESARROLLO DE UNA PROPUESTA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTE DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PULPAS DE FRUTA DE LA EMPRESA ALIMENTOS SAS S.A.S. Programa de Ingeniería Química de Bogotá, Facultad de Ingenierías 60
- Alfonso-Correa, L. A. y L. T. vargas-Guerrero 2018b. DESARROLLO DE UNA PROPUESTA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTE DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PULPAS DE FRUTA DE LA EMPRESA ALIMENTOS SAS S.A.S. Programa de Ingeniería Química, Facultad de Ingenierías 157
- Angelakis, A., L. Bountoux y V. Lazarova 2003. "Challenges and prospectives for water recycling and reuse in EU countries." *Water Supply* 3: 59-68.
- Babbitt, E. y R. Baumann (1980). sewerage and blackwater treatment.
- Buitrón-Méndez, G., C. Reino-Sánchez y J. Carrera-Muyo (2018). Manual técnico sobre tecnologías biológicas aerobias aplicadas al tratamiento de aguas residuales industriales.
- CENAPRED 1993. PROCESOS BIOLÓGICOS DE TRATAMIENTO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE RESIDUOS LÍQUIDOS TÓXICOS. <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/153->

[PROCESOSBIOLGICOSDETRATAMIENTOPARALAESTABILIZACINDE
RESIDUOSLQUIDOSTXICOS.PDF\(Consultado](#) en línea en Enero 2020):

Cisneros-Estrada, O. y H. Saucedo-Rojas 2016a. "Reúso de aguas residuales en la agricultura." IMTA.

Cisneros-Estrada, O. y H. Saucedo-Rojas 2016b. "Reúso de aguas residuales en la agricultura " IMTA:
https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/riego-drenaje/re-uso-aguas-residuales.pdf.

CNA 2013. Estadísticas del agua en México
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/260111/EAM2013_br.pdf
(CONSULTADO EN JUNIO 2019):

CNA 2018. Uso del Agua <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/usos-del-agua>(CONSULTADO EN JUNIO 2019):

CONAGUA 2007a. MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO.
<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Libros/11DisenoDePlantasPotabilizadorasTipoDeTecnologiaSimplificada.pdf>

CONAGUA 2007b. MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO SISTEMAS ALTERNATIVOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y LODOS PRODUCIDOS

CONAGUA (2007c). DISEÑO DE PLANTAS POTABILIZADORAS TIPO DE TECNOLOGÍA SIMPLIFICADA

CONAGUA 2007d. DISEÑO DE PLANTAS POTABILIZADORAS TIPO DE TECNOLOGÍA SIMPLIFICADA.
<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Libros/11DisenoDePlantasPotabilizadorasTipoDeTecnologiaSimplificada.pdf>
(Consultado en línea en Enero 2020):

CONAGUA 2007e. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento.

CONAGUA (2013). Uso de agua Estadísticas del Agua en México.

- CONAGUA 2014. Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación.
- CONAGUA 2015. Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/197610/Inventario_2015.pdf(Consultado en Enero 2020):
- CONAGUA 2016a. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Lodos Activados
- CONAGUA 2016b. Estadísticas del agua en México
- CONAGUA 2017. Estadísticas del agua en México. consultado en enero 2020(http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf):
- CONAGUA 2018a. Usos del Agua. <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/usos-del-agua>(CONSULTADO EN MAYO DEL 2019):
- CONAGUA 2018b. Uso del agua. <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/usos-del-agua>(CONSULTADO EN JUNIO 2019):
- CPEUM 2015. (Consultado en mayo de 2019 en línea):
- Cruz, M., N. Carbo, L. Javier, L. Gonzalez, G. Tito, K. Depaz, S. Torres, R. Nuñez y W. Quispe 2016. "Tratamiento De Las Aguas De La Laguna "Mansión" Mediante La Especie Eichhorniacrassipes, Para El Riego De Áreas Verdes En La Universidad Peruana Unión." IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science 9: 53-65.
- Chaplin, M. 2001. "Water: its importance to life." Biochemistry and Molecular Biology Education 29: 54-59.
- Delgado-Sandoval, G. 2019. "Estudio de biodiscos como tratamiento secundario de aguas residuales domésticas." Revista TECNIA 29: 12-18.
- Diaz-Cuenca, E., A. Alvarado-Granados y K. Camacho-Calzada 2012. "El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía " Quivera 14: 78-97.

- Engelmann, G. 1991. "Water quality conservation for buntainable development."
Revista Internacional de Contaminación Ambienta 7: 51-61.
- Escalante, V., L. Cardoso, E. Ramirez, G. Moeller, G. Mantilla, J. Montecillos, C. Servín y F. Villavicencio 2003. "El reuso del agua residual tratada en México." Seminario Internacional sobre Métodos Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales 1.
- Escobedo, M. T., S.-P. J.A. y G. E. Muñoz 2006. "EVALUACION DE LOS PROCESOS DE PURIFICACION DE UNA DESPACHADORA DE AGUA POTABLE EN CIUDAD JUAREZ " CULCyT//Agua Potable 3: 17-25.
- Espinosa-Lloréns, M., Y. León-Hernández y X. Rodríguez-Petit 2013. "Problemática de la determinación de especies nitrogenadas (nitrógeno total y amoniacal) en aguas residuales." Revista CENIC. Ciencias Químicas 44: 1-12.
- Faleschini, M. 2016. "ESTRATEGIAS, DIFICULTADES Y BENEFICIOS EN LA APLICACIÓN DEL REUSO DEL AGUA TRATADA EN TRES MUNICIPIOS DE LA PATAGONIA " IFRH Tercer Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos.
- FAO (1992). Wastewater treatment and use in agriculture.
- FAO 2017. "Reutilización de aguas para agricultura en América Latina y el Caribe Estado, principios y necesidades " FAO 1.
- Ford, D. y W. Eckenfelder 1966. "The effect of process variables on sludge floe formation and settling characteristic. ." water resource 13: 178-185.
- Forero, J. E., J. Díaz y V. Blandón 1999. "DISEÑO DE UN NUEVO SISTEMA DE FLOTACIÓN PARA TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES." C.T.F. Cienc. Technol. Futuro 1.
- Fried, J. (1975a). Growndwater Pollution
- Fried, J. (1975b). Groundwater pollution
- Guzmán-Soria, E., A. García-Salazar, S. Mora-Flores, M. Fortis-Henández, R. Valdivia.Alcalá y M. Portillo-Vázquez 2006. "DEMAND FOR WATER IN THE COMARCA LAGUNERA, MÉXICO." Agrocienza 40: 793-804.

- Henze, M. 1992. "Characterization of Wastewater for Modelling of Activated Sludge Processes." *Water Sci Technol* 25: 1-15.
- Hernández, D. y S. Sánchez 2014. DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL PARA EL MUNICIPIO DE SAN MARCOS DEPARTAMENTO DE SUCRE. Programa de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia
- Iglesias, R., E. Ortega, G. Batanero y L. Quintas 2010. "Water reuse in Spain: Data overview and costs estimation of suitable treatment trains." *Desalination* 263: 1-10.
- IMPLAN 2017. Instituto Municipal de Planeación y Competitividad de Torreón. Agua, recurso indispensable para el desarrollo de la ZML. <http://www.trcimplan.gob.mx/blog/agua-recurso-indispensable-para-el-desarrollo-de-la-zml.html>(CONSULTADA MARZO 2019 EN LINEA):
- IMTA 2009a. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE LODOS ACTIVADOS. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
- IMTA (2009b). Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de lodos activados
- IMTA 2018. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. <https://www.gob.mx/imta/es/articulos/esta-mexico-preparado-para-enfrentar-los-retos-del-agua?idiom=es>. E. M. p. p. e. l. r. d. agua?(CONSULTADO MARZO 2019 EN LINEA
-):
- INEGI 2011. Usos del agua. consultado en enero 2020(<http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/usos.aspx?tema=T>):
- Jeevananda, M., R. Kannan, S. Srinivasalau y V. Rammohan 2007. "Hydrogeochemistry and Groundwater Quality Assessment of Lower Part of the Ponnaiyar River Basin, Cuddalore District, South India." *Environmental Monitoring and Assessment* 132.

- Jiménez-Cisneros, B., M. Torregrosa-Armentia y L. Aboites-Aguilar (2010). El agua en México: cauces y encauces.
- Kalagbor, I., V. Johnny y E. Ogbolokot 2019. "Application of National Sanitation Foundation and Weighted Arithmetic Water Quality Indices for the Assessment of Kaani and Kpean Rivers in Nigeria." *American Journal of Water Resources* 7: 11-15.
- LGEEPA 2018. LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148_050618.pdf(Consultado en junio 2019 en línea):
- Lombardero, J. (2009). Manual para la formación en medio ambiente. Valladolid, Lex Nova.
- López del Pino, S. J. y S. Martín-Calderón (2014). Tratamiento de residuos urbanos o municipales.
- Lozano-Rivas, W. (2012). Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.
- Lyu, S., W. Chen, W. Zhang, Y. Fan y W. Jiao 2016. "Wastewater reclamation and reuse in China: Opportunities and challenges." *Journal of Environmental Science* 39: 86-96.
- Mara, D. 1976. *Sewage Treatment in Hot Climates*
- Marín.Galvín, R. (2013). Procesos fisico-químicos en depuración de aguas: Teoría, práctica y problemas resueltos.
- Mazari-Hiriart, M., G. Perez-Ortiz, M. Orta-Ledesma, F. Armas-Vargas, M. Tapia, R. Solano-Ortiz, M. Silva, I. Yañez-Noguez, Y. Lopez-Vidal y C. Diaz-Avalos 2014. "Final Opportunity to Rehabilitate an Urban River as a Water Source for Mexico City." *PLOS ONE* 9.
- Méndez Sayago, J. A., F. Carreño Sayago y H. A. Hernández-Escolar 2011. "Confiabilidad y viabilidad para la reutilización de los efluentes de las Ptar que operan con lagunas de estabilización en cundinamarca." *Producción + Limpia* 6: 35-49.

- Metcalf & Eddy, I. (1995a). Proyecto de instalaciones para el tratamiento físico y químico. Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, Vertido y reutilización McGraw-Hill. 1.
- Metcalf & Eddy, I. (1995b). Ingeniería de aguas residuales Tratamiento, vertido y reutilización
- Metcalf & Eddy, I. (1995c). Proyecto de instalaciones para el tratamiento físico y químico del agua residual. Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento vertido y reutilización mcGraw-Hill. 1.
- Morán-Ramírez, J., R. Ledesma-Ruiz, J. Mahlknecht y J. Ramos-Leal 2016. "Rock–water interactions and pollution processes in the volcanic aquifer system of Guadalajara, Mexico, using inverse geochemical modeling." *Applied Geochemistry* 68: 79-94.
- Mujeriego, R. (1990a). Manual práctico de riego con agua residual municipal regenerada.
- Mujeriego, R. (1990b). Manual Práctico De Riego Con Agua Residual Municipal Regenerada.
- Mujeriego, R. (1990c). Riego con agua residual municipal regenerada. Manual práctico.
- Mujeriego, R. (1990d). RIEGO CON AGUA RESIDUAL MUNICIPAL REGENERADA.
- NMX-AA-005-SCFI 2013. ANÁLISIS DE AGUA – MEDICIÓN DE GRASAS Y ACEITES RECUPERABLES EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS – MÉTODO DE PRUEBA. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166764/nmx-aa-005-scfi-2013.pdf>
- NMX-AA-007-SCFI 2013. ANÁLISIS DE AGUA – MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa007-2014_01.pdf(Consultado en línea en Enero 2020):

- NMX-AA-028-SCFI 2001. ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES (DBO5) Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA. <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2001/nmx-aa-028-scfi-2001.pdf>
- NMX-AA-029-SCFI 2001. ANÁLISIS DE AGUAS - DETERMINACIÓN DE FÓSFORO TOTAL EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166773/NMX-AA-029-SCFI-2001.pdf>(Consultado en Enero 2020):
- NMX-AA-042-SCFI 2015. ANÁLISIS DE AGUA - ENUMERACIÓN DE ORGANISMOS COLIFORMES TOTALES, ORGANISMOS COLIFORMESFECALES (TERMOTOLERANTES) Y Escherichia coli – MÉTODO DEL NÚMERO MÁS PROBABLE EN TUBOS MÚLTIPLES <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166147/nmx-aa-042-scfi-2015.pdf>(CONSULTADO EN MAYO 2019 EN LÍNEA);
- NMX-AA-072-SCFI 2001. "ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE DUREZA TOTAL EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA." Secretaría de Economía <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166788/NMX-AA-072-SCFI-2001.pdf>.
- NMX-AA-073-SCFI 2001. ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE CLORUROS TOTALES EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166789/NMX-AA-073-SCFI-2001.pdf>
- NMX-AA-079-SCFI 2001. ANÁLISIS DE AGUAS - DETERMINACIÓN DE NITRATOS EN AGUAS NATURALES, POTABLES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA. <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD1/DO88.pdf>(Enero 2020 en Línea);

NMX-AA-099-SCFI 2006. ANÁLISIS DE AGUA – DETERMINACIÓN DE NITRÓGENO DE NITRITOS EN AGUAS NATURALES Y RESIDUALES – MÉTODOS DE PRUEBA.

<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166802/NMX-AA-099-SCFI-2006.pdf>(Enero 2020):

NMX-AA-113-SCFI 2012. ANÁLISIS DE AGUA – MEDICIÓN DEL NÚMERO DE HUEVOS DE HELMINTO EN AGUAS RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS POR OBSERVACIÓN MICROSCÓPICA - MÉTODO DE PRUEBA. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166809/NMX-AA-113-SCFI-2012.pdf>(CONSULTADO EN MAYO DEL 2019 EN LÍNEA):

NOM-127-SSA1 1994. SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO-LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION(Consultado en línea en Enero 2020):

Ojeda-Guzzini, M. (2015). Tratamiento de agua potable.

ONU 2014a. Organización de las Naciones Unidas. <https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml>. W.

Quality(CONSULTADO EN JUNIO 2019 EN LINEA):

ONU 2014b. Organización de las Naciones Unidas. <https://www.un.org/waterforlifedecade/quality.shtml>. W.

Quality(CONSULTADO JUNIO 2019 EN LINEA):

Osorio-Robles, F., J. C. Torres-Rojo y M. Sánchez-Bas (2011). Tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes: Aplicación de procesos industriales a la reutilización de aguas residuales

OWA, F. D. 2013. "Water Pollution: Sources, Effects, Control and Management." Mediterranean Journal of Social Sciences 4.

Pal, A., K. Yew-Hoong, A. Yu-ChenLin y M. Reinhard 2010. "Impacts of emerging organic contaminants on freshwater resources: Review of recent occurrences, sources, fate and effects." Science of The Total Environment 408: 6062-6069.

- Pasqualino, J., M. Meneses y F. Castells 2010. "Life cycle assessment of urban wastewater reclamation and reuse alternatives." *Journal of Industrial Ecology* 15: 49-63.
- Pimentel, D., J. Houser, E. Preiss, O. White, H. Fang, L. Mesnick, T. Barsky, S. Tariche, J. Schreck y S. Alpert 1997. "Water Resources: Agriculture, the Environment, and Society." *BioScience* 47: 97-106.
- Prats, D. y J. Melgarejo (1995). Reutilización de las aguas residuales Nuevas Tecnologías para el Saneamiento, Depuración y Reutilización de las Aguas Residuales en la Provincia de Alicante.
- Quaglia, A., A. Pennati, M. Bogataj, Z. Kravanja, G. Sin y R. Gani 2013. "Industrial Process Water Treatment and Reuse: A Framework for Synthesis and Design." *Industrial & Engineering Chemistry Research*: 53.
- Ramalho, R. (1996a). Tratamiento secundario: otros procesos aerobios y anaerobios Tratamiento de aguas residuales REVERTÉ.
- Ramalho, R. (1996b). Wastewater treatment.
- Ramalho, R. (2003a). Pretratamientos y tratamientos primarios Tratamiento de aguas residuales. REVERTÉ.
- Ramalho, R. (2003b). Tratamiento de aguas residuales.
- Ramdani, A., P. Dold, S. Deleris, D. Lamarre, A. Gadbois y Y. Comeau 2010. "Biodegradation of the endogenous residue of activated sludge." *Water Research* 44: 2179-2188.
- Ramos-Calla, W. 2013. DISEÑO DE UN CONTROL SEMIAUTOMATIZADO USANDO PLC S7 – 200 CON INTERFAZ SCADA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES BIOLÓGICO DE LODOS ACTIVADOS BASADO EN LA MODALIDAD DE AIREACIÓN EXTENDIDA, UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO 121
- Ramos-Olmos, R., R. Sepúlveda-Marqués y F. Villalobos-Moreto (2003). El agua en el medio ambiente: Muestreo y análisis.
- Rashid, A., S. Anjum, L. Ali, M. Zaib, S. Jehan, M. Ayub y S. Ullah 2019. "Geochemical profile and source identification of surface and groundwater

pollution of District Chitral, Northern Pakistan." *Microchemical Journal* 145: 1058-1065.

Reynolds, K. 2002. "Tratamiento de Aguas Residuales en Latinoamérica." *Agua Latinoamericana*: 1-4.

Rigola Lapeña, M. (1990). TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES : AGUAS DE PROCESO Y RESIDUALES.

Rojas, R. 2002. GETIÓN INTEGRAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/57123734/GESTION_INTEGRAL_DEL_TRATAMIENTO_AR.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DCurso_Internacional_GETION_INTEGRAL_DE_T.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20200122%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-Date=20200122T234429Z&X-Amz-Expires=3600&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=0b030ecda01ce573c2756b000a487a3e3de77d4f9b6efd78535f98b8d75d9e87(Consultado en Enero 2020):

Rojas, R. 2012. Curso Internacional "GETIÓN INTEGRAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES" 25 al 27 de setiembre de 2002(https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/57123734/GESTION_INTEGRAL_DEL_TRATAMIENTO_AR.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DCurso_Internacional_GETION_INTEGRAL_DE_T.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20200209%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-Date=20200209T022458Z&X-Amz-Expires=3600&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=0d1f7b9ffa2f797bddcac22202f565c932cf1a5f352b3e8e50ddc30843cb7421):

Sainz Sastre, J. A. (2005). Tecnologías para la sostenibilidad

Sánchez-Gutiérrez, J. y K. Jeréz-Rativa 2018. "Estudio del porcentaje de eficiencia de la remoción de arenas en desarenadores de flujo horizontal

construidos respecto a teorías de diseño."
https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1337&context=ing_civil.

SEMARNAT 1997a. NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

<http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/60197.pdf>(CONSULTADO EN LINEA EN JUNIO DE 2019):

SEMARNAT 1997b. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/S/GAA-15-13.pdf>(Consultado en abril del 2019 en línea):

SEMARNAT 2015. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Resumen_15_ejecutivo.pdf. enero 2020

Sepulveda Mancipe, B., J. Sierra-Mesa y J. Romero-Rojas 2017. GUÍA Y HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL DISEÑO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PRELIMINAR (CRIBADO Y DESARENADOR) DE AGUAS RESIDUALES. RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Gravito

Silva, J., P. Torres y C. Madera 2008. "Reuso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión." *Agronomía Colombiana* 26: 347-359.

Soto-Espinoza, K. A. 2016. APLICACIÓN DEL INTERCAMBIO IÓNICO COMO MÉTODO DE ABLANDAMIENTO PARA UNA MUESTRA DE AGUA POTABLE CON DUREZA ALTA DEL CANTÓN PASAJE. UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD, Universidad Técnica de Machala21

Sperling, M. (2007a). Wastewater treatment plants: planning, design and operation.

Sperling, M. (2007b). Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal.

- Stuart, G. (1990). Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater - A Guidance Manual.
- Stuart, G. y T. Asano (2017). Irrigation With Reclaimed Municipal Wastewater - A Guidance Manual.
- Sun, Y., Z. Chen, G. Wu, Q. Wu, F. Zhang, Z. Niu y H. Hu 2016. "Characteristics of water quality of municipal wastewater treatment plants in China: implications for resources utilization and management." *Journal of Cleaner Production* 131: 1-9.
- Tchobanoglous, G., F. Burton y H. Stensel (1995). Wastewater Engineering Treatment and Reuse
- Tyagi, S., B. Sharma, P. Singh y R. Dobhal 2013a. "Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index." *American Journal of Water Resources* 1: 34-38.
- Tyagi, S., B. sharma, P. Singh y R. Dobhal 2013b. "Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index." *American Journal of Water Resources* 1: 34-38.
- Ugaz-Odar, F. E. 2018. "Reúso de aguas residuales tratadas biológicamente, para el regadío del Jardín Botánico, Trujillo." *SCIÉNDICO Ciencia Para El Desarrollo* 21: 7-14.
- UNESCO 2009. "WWAP, 3er Informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo." *El agua en un mundo en constante cambio*.
- Valdes-Ramos, A., E. Aguilera-González, G. Tobón-Echeverri, L. Samaniego-Moreno, L. Díaz-Jiménez y S. Carlos-Hernández 2019. "Potential Uses of Treated Municipal Wastewater in a Semiarid Region of Mexico." *Sustainability* 11: 2217.
- Valín, M., R. Castro, C. Pedras y L. Pereira 2011. "USO DEL AGUA EN ESPACIOS VERDES: CÁLCULO Y EVALUACIÓN DE ESTRATEGIAS DE RIEGO." VII Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua: 16-19.
- Yahyaoui, K. E., E. P. S. d. E. d. Manresa y I. i. T. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Minera (2018). Estudio de distintos

sistemas de cloración del agua potable, Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa.

Zurita-Martinez, F., O. Castellanos-Hernandez y A. Rodriguez-Sahagun 2011. "MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT IN RURAL COMMUNITIES IN MEXICO." Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas: 139-150.