



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

EVALUACIÓN DEL SISTEMA NACIONAL DE AGUAS RESIDUALES DE MÉXICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA

Jorge Adrián Botello Rueda



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX

2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: Margarita Eugenia Gutiérrez Ruiz

VOCAL: Profesor: Victor Manuel Luna Pabello

SECRETARIO: Profesor: Luis Gerardo Martínez Jardines

1er. SUPLENTE: Profesor: Alfonso Duran Moreno

2° SUPLENTE: Profesor: Norma Ruth López Santiago

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

**LABORATORIO DE BIOGEOQUÍMICA AMBIENTAL, FACULTAD DE QUÍMICA, EDIFICIO "F"
LAB 308.**

ASESOR DEL TEMA:

Margarita Eugenia Gutiérrez Ruiz

SUPERVISOR TÉCNICO:

Norma Ruth López Santiago

SUSTENTANTE (S):

Jorge Adrián Botello Rueda

Índice

Listado de figuras.....	3
Listado de Cuadros.....	5
Resumen.....	7
Introducción	8
Capítulo I. Infraestructura	12
1.1 Antecedentes	12
1.2 Evaluación de las Plantas de Tratamiento según las Observaciones del Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación (INPMPTARO)	18
1.3 Evaluación de las plantas de tratamiento municipales con base en el anexo 3 de la publicación “Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento edición 2014” haciendo uso del % de uso del caudal instalado	23
1.4 Plantas de tratamiento de agua municipal que no operan.	25
1.5 Plantas de Tratamiento Industriales.....	26
Capítulo II. Calidad del Agua	30
2.1 Antecedentes	30
2.2 Datos ambientales utilizados como "Evaluadores de Impacto Ambiental" (EIA)	34
2.2.1 Administración de los cuerpos de agua.....	34
2.2.2 Evaluadores del Impacto Ambiental	36
2.2.2.1 Sólidos Suspendidos Totales.....	37
2.2.2.2 Demanda Bioquímica de Oxígeno.....	38
2.2.2.3 Demanda Química de Oxígeno	41
2.3 Evaluación de los cuerpos de agua con base a los EIA	42
2.4 Nitrógeno y Fosforo.....	47
2.5 Elementos potencialmente tóxicos.....	49
3.1 Generalidades	52
3.2 Operaciones unitarias	53
3.3 Tratamientos Biológicos	56
3.3.1 Características	56
3.3.2 Lodos Activados	57
3.3.3 Lagunas de Estabilización	58

3.3.4 Humedales Artificiales	59
3.4 Desechos producidos por las plantas de tratamiento	59
3.4.1 Tratamiento de lodos.....	59
3.4.2 Disposición final de los lodos	61
Conclusiones y Recomendaciones	63
Bibliografía	66
Apéndice I. Análisis estadístico de las plantas de tratamiento reportadas en el anexo 3 del inventario SSAPDS	72

Listado de figuras

Figura 1. 1. Distribución en m ³ /s del agua municipal.....	13
Figura 1. 2. Inversiones realizadas en el sector hidráulico a través del tiempo	17
Figura 1. 3. Distribución del presupuesto asignado al Sector hídrico entre los diferentes subsectores que lo conforman	17
Figura 1. 4. Distribución Porcentual de las Plantas de tratamiento municipales según su funcionamiento.....	19
Figura 1. 5. Clasificación de las plantas de tratamiento municipales según su porcentaje de uso de caudal instalado (%UCI).....	25
Figura 1. 6. Porcentaje de plantas de tratamiento municipales fuera de operación.....	26
Figura 1. 7. Porcentaje de agua residual municipal y no municipal generada a través del tiempo.....	29
Figura 1. 8. Porcentaje del agua residual no tratada municipal y no municipal	29
Figura 2. 1. Distribución porcentual del uso que se le da al agua residual tratada de origen municipal.....	31
Figura 2. 2. Ubicación, datos demográficos y socioeconómicos de las Regiones Hidrológico-Administrativas	35
Figura 2. 3. Porcentaje de agua catalogada como Buena Calidad, Aceptable y Contaminada según el indicador SST, junto con el caudal tratado municipal e industrial y las lluvias en el territorio a través del tiempo	45
Figura 2. 4. Porcentaje de agua catalogada como Buena Calidad, Aceptable y Contaminada según el indicador DBO, junto con el caudal tratado municipal e industrial y las lluvias en el territorio a través del tiempo	46

Figura 2. 5. Porcentaje de agua catalogada como Buena Calidad, Aceptable y Contaminada según el indicador DQO, junto con el caudal tratado municipal e industrial y las lluvias en el territorio a través del tiempo 46

Figura 3. 1. Porcentaje de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales según el proceso usado 53

Figura A. 1. Distribución normal de los valores de %UCI de la muestra de plantas de tratamiento obtenido del anexo 3 del inventario SSAPDS. 73

Listado de Cuadros

Cuadro 1. 1. Comparación de las observaciones hechas en el Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación para diferentes plantas de tratamiento	20
Cuadro 2. 1. Límites máximos permisibles para contaminantes básicos	32
Cuadro 2. 2. Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros	33
Cuadro 2. 3. Clasificación en la calidad de los cuerpos de agua hecha por Conagua según los niveles de Sólidos Suspendidos Totales	38
Cuadro 2. 4. Clasificación de la calidad de los cuerpos de agua hecha por Conagua según los niveles de la Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días	41
Cuadro 2. 5. Clasificación de la calidad de los cuerpos de agua hecha por Conagua según los niveles de la Demanda Química de Oxígeno	42
Cuadro 2. 6. Niveles de nitrato y fosfato para aguas superficiales	49
Cuadro 2. 7. Algunos EPT presentes en efluentes industriales	51

Abreviaturas y acrónimos

AR	Agua Renovable
Conagua	Comisión Nacional del Agua
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EIA	Evaluadores del Impacto Ambiental
INPMPTARO	Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación
EPT	Elementos Potencialmente Tóxicos
PIB	Producto Interno Bruto
REPDA	Registro Público de Derechos de Agua
RHA	Regiones Hidrológico-Administrativas
Semarnat	Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SINA	Sistema Nacional de Información del Agua
SSAPDS	Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento
SST	Sólidos Suspendidos Totales
%UCI	% de uso del caudal instalado

Resumen

Existe unanimidad en la importancia que tiene el agua para la vida y también en la que tiene para la humanidad. Por esa razón, se ha vuelto necesario generar un sistema que de tratamiento al agua usada por el hombre, a fin de perturbar lo menos posible nuestro entorno natural. Cada nación ha hecho lo que ha considerado pertinente en materia de saneamiento y México no es la excepción. El Gobierno Federal ha dado prioridad al desarrollo de un sistema hídrico incluyente, se ha fijado objetivos claros como la recolección y tratamiento del 100% de aguas residuales municipales para el 2030. Sin embargo, existen una serie de incongruencias entre el discurso dado a la ciudadanía y los datos presentados por organismos gubernamentales y científicos.

El proyecto de investigación "Evaluación del Sistema Nacional de Tratamiento de Aguas Residuales de México" consiste en el análisis de los datos presentados en las diferentes publicaciones gubernamentales, revistas científicas y técnicas, a través de tres indicadores propuestos que reflejan el estado del saneamiento en México: "infraestructura", "calidad de los cuerpos de agua receptores" y "procesos de saneamiento". Lo anterior con el fin de conocer en donde se encuentra México en materia de saneamiento de aguas residuales.

Introducción

El territorio mexicano cuenta con 1,964 millones de kilómetros cuadrados. Según su ubicación geográfica, la porción sur de México se localiza en la zona intertropical del globo terráqueo; en tanto que la porción norte lo hace en la zona templada. Dicha ubicación y los accidentes geográficos, que establecen el relieve del país, determinan la disponibilidad del agua en todo el territorio nacional.

Dos terceras partes del territorio mexicano son áridas o semiáridas, con precipitaciones menores a los 500 mm. Sin embargo, el sureste es húmedo con precipitaciones promedio de más de 2 000 mm por año. Por lo regular la precipitación es más intensa en verano.

El agua es necesaria para todo tipo de actividad humana, desde la subsistencia hasta actividades de producción, por lo que en México, se estableció a la Comisión Nacional del Agua (Conagua); órgano administrativo, normativo, técnico, consultivo y desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat); para administrar y preservar las aguas nacionales y sus bienes inherentes.

La Conagua, a través de la Ley de Aguas Nacionales (1992) establece que la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales, así como su descarga en los cuerpos de agua, se debe realizar mediante títulos de concesión o asignación.

Las actividades concesionadas que presentan un “uso consuntivo”; termino que se refiere al agua de una calidad determinada que se consume al llevar a cabo una actividad específica (Ley de Aguas Nacionales, 1992); pueden dividirse en cuatro categorías:

- El agrupado agrícola correspondiente a las actividades agrícolas cuenta con un volumen concesionado de 65.2 km³, del cual el 35.58% del agua tiene un origen subterráneo.
- El uso agrupado del abastecimiento público que consiste en el agua entregada por las redes de agua potable, las cuales abastecen a los usuarios domésticos, así como a diversas industrias y servicios. Presenta un volumen concesionado de 12.1 km³, del cual el 60.4% proviene de aguas subterráneas.
- El uso agrupado de la industria autoabastecida que consiste en el agua entregada a las industrias minera, química, azucarera, del petróleo, del papel y, en general, a todas las industrias manufactureras. El agua catalogada en este uso es tomada y descargada directamente de los cuerpos de agua como ríos, arroyos, lagos o acuíferos. Cuenta con un volumen concesionado de 3.6 km³, del cual el 55.5 % proviene de aguas subterráneas.
- Uso para la generación eléctrica, que presenta un volumen concesionado de 4.1 km³, del cual 13.8 % proviene de agua subterránea. De este grupo se excluye al agua usada para la generación de energía en plantas hidroeléctricas, por no ser éste de uso consuntivo (Conagua, 2014).

El Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) regulado por la Conagua, registra los volúmenes concesionados o asignados a los usuarios de aguas nacionales. En los títulos de concesión se especifican los parámetros que deben cumplir las descargas, la concentración de contaminantes y la capacidad de asimilación y dilución que los cuerpos de agua pueden recibir. Sin embargo, el establecimiento de títulos de concesión y parámetros de descarga no han ayudado a mejorar la calidad de los cuerpos de agua, por lo que se han ido deteriorando con el paso del tiempo.

La Conagua, en colaboración con el Gobierno Federal y gobiernos estatales han intentado, con poco éxito, revertir dicha situación a través de la construcción de plantas de tratamiento municipales, que en general, cuentan con procesos biológicos de tratamiento (Conagua, 2016). Por lo anterior, y para coadyuvar en el esfuerzo de entender el nivel de avance en este tema y poder plantear metas a futuro se llevó a cabo este estudio, cuyo objetivo es **realizar una evaluación documental de los avances en materia de saneamiento de aguas residuales en México, basándose en datos oficiales de publicaciones gubernamentales, así como revistas científicas y técnicas concernientes a la materia.**

Específicamente, se llevó a cabo la evaluación documental, basándose en el análisis de tres indicadores que reflejan el estado del saneamiento en México:

1. "Infraestructura", en donde se examina el número de plantas y su funcionamiento según los inventarios publicados por Conagua

2. "Calidad de los cuerpos de agua receptores", donde se valora el efecto causado por las descargas de agua tratadas y no tratadas; y finalmente,
3. "Procesos de saneamiento", en el que se describen los procesos y prácticas más comunes en México.

Las metas del estudio son las siguientes:

- Obtener un panorama general de la calidad y cantidad de información documental disponible sobre el sistema nacional de saneamiento de aguas residuales.
- Evaluar el funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas municipales y no municipales a través de la información oficial publicada.
- Determinar el estado de salud general de los cuerpos de agua en México y analizar si el tratamiento de agua residual ha logrado mejorar su calidad.
- Valorar si los procesos utilizados para el saneamiento son adecuados y suficientes para la mejora de la calidad del agua.
- Hacer un análisis crítico sobre la disposición y uso de los desechos producidos en los tratamientos de aguas residuales.
- Evaluar las políticas gubernamentales propuestas por el gobierno federal y los gobiernos municipales en función del éxito de las mismas, medido con base en la información generada en este estudio.

Capítulo I. Infraestructura

1.1 Antecedentes

En México, el término “cobertura de agua potable” se refiere al número de personas que cuentan con agua entubada, dentro o fuera de la construcción en donde viven, pero dentro del terreno en donde se ubica la vivienda (Conagua, 2014). Por otra parte, al total de la población que cuenta con conexión a la red de alcantarillado o fosa séptica, o bien a un desagüe, barranca, grieta, lago o mar se le denomina “cobertura de alcantarillado” (Conagua, 2014).

Las aguas municipales corresponden a las que son manejadas en los sistemas de alcantarillado urbano y rural, mientras que las no municipales son aquellas que se descargan directamente a los cuerpos receptores de propiedad nacional (Conagua 2014). Es decir, el agua municipal es el agua proveniente de ciudades y pueblos, mientras que el agua no municipal corresponde a la industria clasificada como “autoabastecida” (Ley de Aguas Nacionales, 1992).

Tanto la cobertura de agua potable, la cobertura de alcantarillado y el saneamiento de agua residual son indicadores que muestran la calidad de vida de una población (UNESCO, 2003). Para diciembre del 2013 México contaba con el 92.3% en cobertura nacional de agua potable y del 90.9 % en la cobertura de alcantarillado (Conagua, 2016), considerándose estos porcentajes como bajos a escala mundial (Banco Mundial, 2015).

En relación al tratamiento de las aguas residuales municipales, en el año 2013 se recolectó el 92.05% de toda el agua residual, y de ese porcentaje se trató el 49.97% (Conagua, 2016). Estos resultados en materia de saneamiento, aunque reflejan una mejora importante a través del tiempo, ver figura 1.1, aún están lejos de las metas gubernamentales de suministrar de agua potable y alcantarillado al 100% de la población y para el año 2030, tratar el 100% de las aguas residuales municipales (Conagua, 2011).

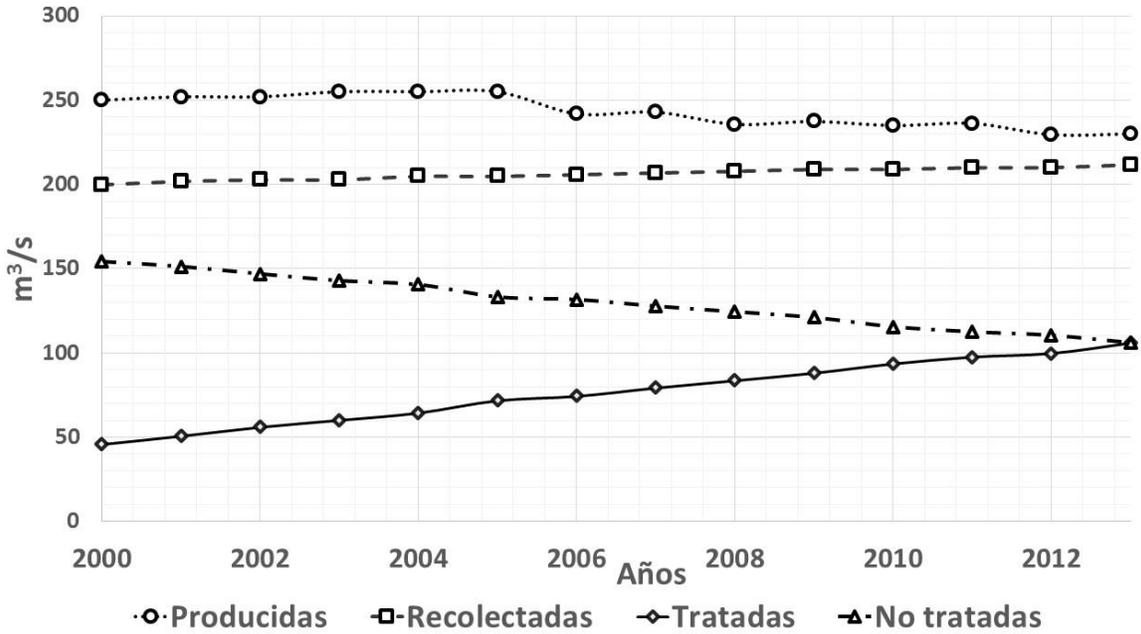


Figura 1. 1. Distribución en m³/s del agua municipal. Fuente: Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) Conagua 2016. (<http://201.116.60.25/sina/>)

La estrategia con la que el gobierno pretende cumplir los objetivos mencionados es descrita en el Programa Nacional de Infraestructura 2014-2018 (2015) emitido por el Gobierno Federal, en donde se especifica para el Sector Hidráulico, particularmente en el subsector de saneamiento; la línea de acción 3.1.3 que consiste en la construcción de nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.

Dicha estrategia no es nueva, pues poner en marcha nuevas plantas de tratamiento municipales ha sido una práctica común para el Gobierno Federal y gobiernos estatales (De la Peña et al., 2013). En el año 2010 se contaban con 2,186 plantas de tratamiento municipales, con un caudal tratado de 93.6 m³/s; y para el 2013 el número de plantas de tratamiento municipales había crecido a 2,287 con un caudal tratado de 105.93 m³/s. Poniéndose en marcha, en tres años, 101 plantas de tratamiento municipales (Conagua, 2014).

Los proyectos previstos en el Programa Nacional de Infraestructura 2014-2018 (2015) son los siguientes:

- Planta de tratamiento de aguas residuales Atotonilco, Hidalgo. Con capacidad de 23 m³/s en época de estiaje y de hasta 35 m³/s en época de lluvias con una inversión de 9,563.9 millones de pesos (2014). Actualmente se encuentra detenida por irregularidades, se espera su apertura para él 2016.
- Planta de tratamiento de aguas residuales Bahía de Banderas, En el estado de Nayarit. Capacidad de 600 L/s y 245.4 millones de pesos (2014) de inversión. Opera desde febrero del 2016.
- Construcción de la Planta de tratamiento de aguas residuales para la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez en el Estado de Chiapas, con una inversión de 550 millones de pesos (2014) y con capacidad de 320 L/s, opera desde Marzo 2015.

- Planta de tratamiento San Cristóbal de las Casas, Chiapas. Con una inversión de 135 millones de Pesos (2014), con capacidad de 324 L/s, no se encontró fecha de apertura.
- Construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales en Miramar, Guerrero. Con una inversión de 170 millones de pesos (2014) no se especifica capacidad ni apertura.
- Construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales en la localidad de Tlapehula, Guerrero. Con una inversión de 18 millones de pesos (2014), no se especifica capacidad ni apertura.
- Construcción de la Planta de tratamiento de aguas Residuales en la localidad de Taxco municipio de Taxco de Alarcón, Guerrero. Con una inversión de 95 millones de pesos (2014) tendrá una capacidad de 100 L/s, opera parcialmente.
- Rehabilitación de la planta de tratamiento de aguas residuales en la localidad de Tixtla municipio de Tixtla, Guerrero. Con una inversión de 51.9 millones de pesos (2014), no se especifica capacidad ni fecha de apertura.
- Reingeniería de la planta de tratamiento de aguas residuales la Marina 1 y 2 en el municipio de Zihuatanejo de Azueta, Guerrero. Con una inversión de 30 millones de pesos (2014), no se especifican cambios en su capacidad.
- Planta de tratamiento Tehuacán en Puebla. Con una inversión de 140 millones de pesos (2014), no se especifica capacidad ni fecha de apertura.
- Construcción, Mejoramiento o ampliación de planta de tratamiento de aguas residuales municipales, Playa de Carmen, municipio de Solidaridad, estado

de Quintana Roo. Con una inversión de 35.8 millones de pesos (2014) no se especifica su capacidad ni fecha de apertura.

- Construcción de planta de tratamiento de aguas residuales en Tlacotalpan, Veracruz. Con una inversión de 25 millones de pesos (2014) no se especifica capacidad ni fecha de apertura.
- Construcción de planta de tratamiento de aguas residuales en Poza Rica, Veracruz. Con una inversión de 150 millones de pesos (2014) no se especifica capacidad ni fecha de apertura.

Debido a que la mayoría de los proyectos en saneamiento consisten en la apertura de nuevas plantas de tratamiento, es de esperar que la inversión gubernamental, en el sector hídrico, haya aumentado a través del tiempo, ver figura 1.2. Cabe señalar que aunque dicho aumento no ha sido regular, si presenta una clara tendencia positiva. Cada uno de los valores presentados en la figura mencionada corresponden a la inversión total en el sector hídrico, por lo que el valor incluye las inversiones hechas a los subsectores: Agua Potable, Alcantarillado, Saneamiento, Mejoramiento de Eficacia y Otros.

Para el último año reportado, 2013, Conagua invirtió un total de 29,423.34 millones de pesos, de los cuales el 25% se destinó al subsector de agua potable, el 29% a alcantarillado, 25% a saneamiento, 16% a mejoramiento de eficiencia y finalmente el 6% a otros aspectos relacionados con el tema (Conagua, 2016). Pese a que la administración del sistema hídrico ha inyectado recursos económicos, no sigue un plan a largo plazo sino que cambia de acuerdo a los nuevos gobiernos, generando un comportamiento inestable, figura 1.3, que no promete una protección eficiente

de los recursos hídricos. La inconsistencia en el presupuesto es una de las causas que se le atribuye a las deficiencias presentadas en las plantas de tratamiento municipales (Conagua, 2014)

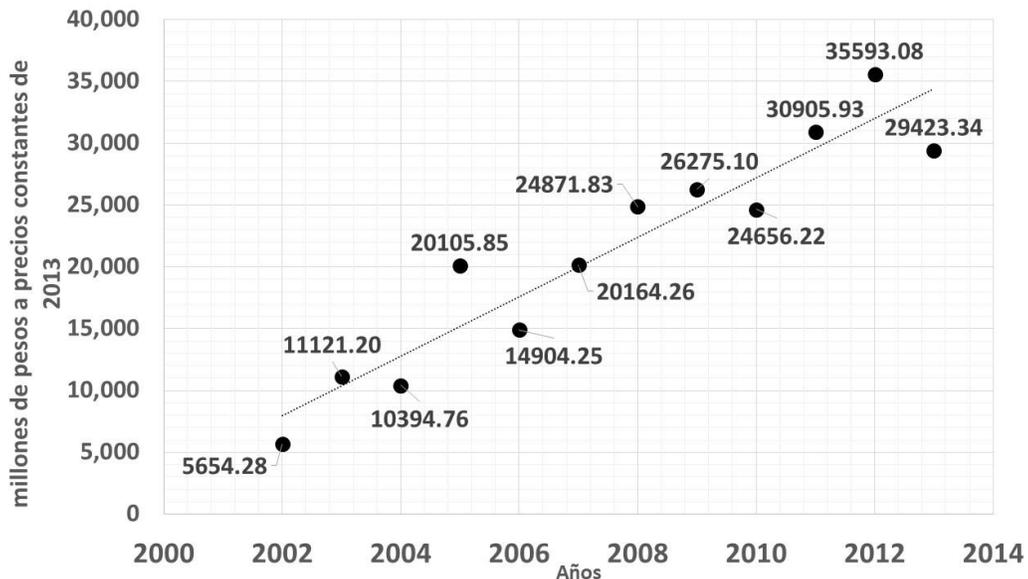


Figura 1. 2. Inversiones realizadas en el sector hidráulico a través del tiempo. Fuente: Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) Conagua 2016. <http://201.116.60.25/sina/>

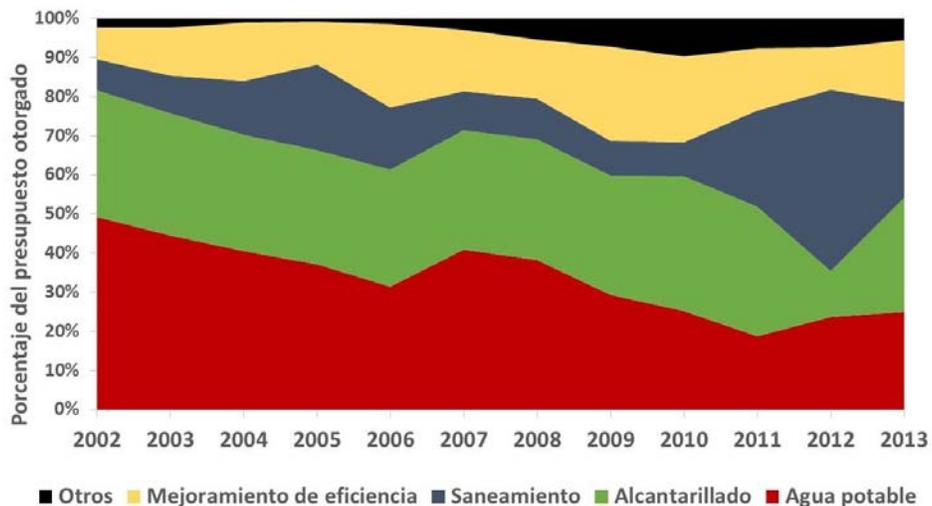


Figura 1. 3. Distribución del presupuesto asignado al Sector Hídrico entre los diferentes subsectores que lo conforman. Fuente: Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) Conagua 2016. (<http://201.116.60.25/sina/>)

Por lo dicho anteriormente, los avances en saneamiento no son fácilmente trazables analizando sólo las inversiones realizadas en este sector. Para lograr una buena calidad en las aguas nacionales, objetivo último de un sistema de saneamiento, es importante contar con parámetros complementarios, especialmente es necesario tener información sobre la calidad de los influentes y efluentes. Sin embargo, estos datos no están disponibles, por lo que se consideró utilizar otros criterios como: las condiciones en las que se trabaja en las plantas de tratamiento, el caudal tratado y no tratado, y el porcentaje de uso de la caudal instalado (%UCI).

1.2 Evaluación de las Plantas de Tratamiento según las Observaciones del Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación (INPMPTARO)

En el INPMPTARO publicado en diciembre del 2013, se listan todas las plantas de tratamiento municipales en funcionamiento. Este inventario cuenta con una sección de observaciones donde se especifica el estado en el que se encuentran cada una de las plantas. Los datos publicados fueron clasificados en las siguientes categorías:

- "No operan correctamente"; plantas que presentan observaciones que indican mal funcionamiento.
- "Rehabilitadas"; plantas donde se menciona algún tipo de mantenimiento o expansión en la capacidad de la planta.

- "Buenas condiciones"; plantas que funcionan adecuadamente según los datos publicados.
- "Sin especificación", cuando no se encontró ninguna información sobre el funcionamiento de la planta.
- "Otros", plantas con observaciones que no corresponden a ninguna de las categorías anteriores y son poco específicas, por ejemplo: "son reservorios", "propiedad de termoeléctrica" o "grupos industriales", "sin sistema de drenaje", etc.

En la figura 1.4 se presentan gráficamente los resultados obtenidos. Se puede observar que el 82 % de las plantas de tratamiento quedan en la categoría de "sin especificación", 10.62 % en la de "no operan adecuadamente", 6.72 % en la de "rehabilitadas", 0.31% en la de "buenas condiciones" y el 0.5% en la de "otros".

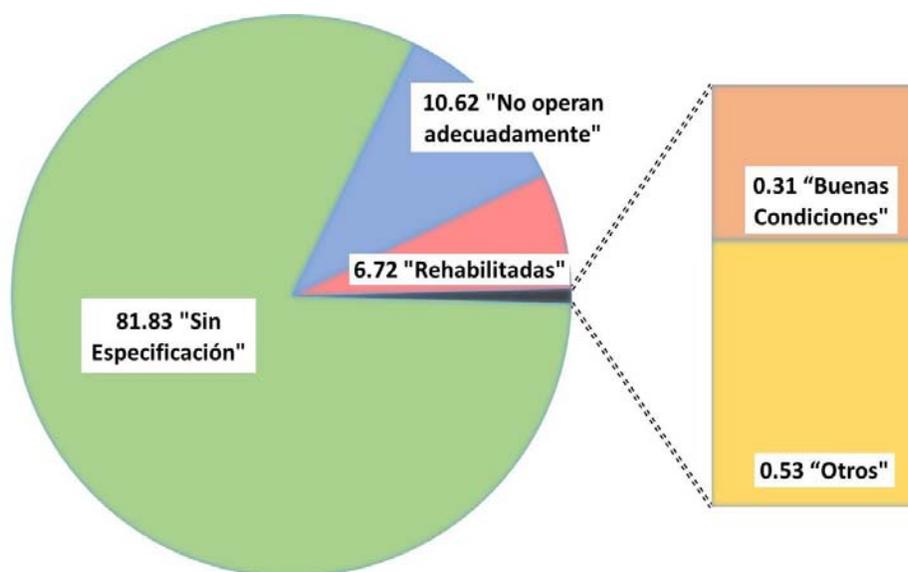


Figura 1. 4. Distribución Porcentual de las Plantas de tratamiento municipales según su funcionamiento. Fuente: Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Conagua 2013.

En el inventario no hay información para cerca del 82 % de las plantas y solamente se asegura que el 0.31 % de las plantas de tratamiento presenta buenas condiciones. Se debe señalar que dicho porcentaje corresponde a 7 plantas de tratamiento ubicadas en Baja California, estado que actualmente trata el 93.2% de sus aguas residuales; sin embargo, existen otros estados como Guadalajara y Monterrey en los que el 100 % de su caudal es tratado (Conagua, 2014) y ninguna de sus plantas es calificada como en "buenas condiciones". Lo anterior podría reflejar la falta de homogeneidad en los criterios aplicados por los inspectores o de las plantas al enviar su información. Posiblemente, lo que para algunos inspectores u operadores es una planta en buenas condiciones, para otros puede significar que la planta no funciona correctamente o simplemente que no amerite observación alguna, como se ejemplifica en el Cuadro 1.1.

Estado	Municipio	Localidad	Nombre de la Planta	Proceso	Capacidad Instalada (l/s)	Caudal Tratado (l/s)	Cuerpo receptor	Observaciones
Baja California	Ensenada	Ensenada	Noreste	Lodos activados	26	28	Arroyo Doña Petra-Arroyo Ensenada-Océano Pacífico	En buenas condiciones. Rebasa su Capacidad.
Guanajuato	San Felipe	San Felipe	San Felipe	Rafa + Filtro Biológico	70	92.1	Arroyo el cocinero	Inició operación en el 2006
Sonora	Moctezuma	Moctezuma	Moctezuma	Lagunas de Estabilización	10	12.9	Río Moctezuma	Requiere ampliación y rehabilitación

Cuadro 1. 1. Comparación de las observaciones hechas en el Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación para diferentes plantas de tratamiento. Conagua 2013, Páginas 105, 148, 225.

Los tres casos presentados en el cuadro anterior son un ejemplo de la falta de congruencia en la información recabada. La planta de Baja California tiene la observación de que rebasa su capacidad instalada, lo cual es un indicativo de que

su funcionamiento no es el óptimo, al mismo tiempo que es etiquetada como una planta que opera en buenas condiciones. En la planta localizada en Guanajuato el caudal tratado también sobrepasa su capacidad, pero no aparece ningún comentario al respecto, solamente se especifica que inició su operación en el año 2006; mientras que la planta ubicada en el estado de Sonora hace mención que su capacidad es rebasada, y anuncia que es necesaria una ampliación y rehabilitación. Lo anterior muestra que para una misma situación la interpretación sobre las circunstancias que rodean a la plantas pueden variar en una misma versión del inventario.

Los casos presentados en el cuadro 1.1 no son únicos, en muchas de las plantas reportadas el caudal tratado supera la capacidad instalada, lo que implicaría una sobrecarga en las plantas de tratamiento que podría ocasionar mal funcionamiento o calidad deficiente del agua tratada.

Otro aspecto que indica la falta de un marco metodológico para llevar a cabo los inventarios, es el hecho de que en el año 2013 se reporta que 10 plantas fueron rehabilitadas hace más de 10 años, en el periodo comprendido entre 1992 y 2001, pero sin incluir comentarios sobre el estado actual de las plantas de tratamiento.

También se observan aparentes contradicciones, pues de acuerdo al inventario de 2013 se señala la rehabilitación de plantas de tratamiento, que en 2011 calificaban en buenas condiciones de operación. Por ejemplo, la planta Loreto localizada en el municipio de Loreto, Baja California Sur; se cataloga en 2011 como una planta en

buenas condiciones de operación, pero en el inventario del año 2013 se indica que fue rehabilitada (INPMPTARO,2013:109; INPMPTARO,2011:132).

Existen casos en los que no queda claro si la planta fue rehabilitada o fue sustituida por otra. Por ejemplo, la planta Tlahualilo, ubicada en el municipio Tlahualilo Durango, en el año 2011 se reporta como una planta que requiere rehabilitación. Sin embargo, en la versión del inventario 2013 aparece con la misma capacidad y caudal tratado y con la observación de que ha sido sustituida (INPMPTARO, 2013:145; INPMPTARO, 2011:181), pero no se observa ninguna planta en el sitio que haya iniciado actividades en el 2012 o 2013.

Los ejemplos anteriores son una muestra de las deficiencias con las que cuenta la documentación oficial relativa al saneamiento, ya que la información que se presenta no está actualizada, es poco precisa, con metodología deficiente, de difícil acceso y es poco utilizada por los gobiernos para la toma de decisiones (Aboites et al., 2008; Figueroa, 2008; Perevochtchikova, 2009; Morgan et al., 2016).

Lo anterior pone en evidencia la incapacidad de determinar si las plantas de tratamiento funcionan adecuadamente haciendo uso de las observaciones hechas en el INPMPTARO.

1.3 Evaluación de las plantas de tratamiento municipales con base en el anexo 3 de la publicación “Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento edición 2014” haciendo uso del % de uso del caudal instalado

Dado que las observaciones del inventario INPMPTARO no ofrecen información confiable sobre el funcionamiento y estado de las plantas de tratamiento, se utilizó como criterio alternativo el % de uso del caudal instalado (%UCI).

En el anexo 3 del documento denominado Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento edición 2014 (SSAPDS) de la Conagua, se reportan la capacidad instalada y el caudal tratado por las plantas de tratamiento, en unidades de litros por segundo [L/s], por lo que, se pueden contrastar estos valores para determinar si se cumplen los parámetros de operación calculados o si las plantas se encuentran subutilizadas o excedidas en su capacidad.

Cabe señalar que la SSAPDS cuenta con información proporcionada por los organismos operadores, además de que indican que en dicho documento se omitieron "datos ilógicos y errores propios al manejo de la información" y está más actualizado (Conagua, 2014).

La SSAPDS muestra en su anexo 3 un inventario de una gran parte de las plantas de tratamiento para saneamiento divididas en tres categorías de acuerdo al número de personas beneficiadas: poblaciones mayores a 50 mil habitantes, poblaciones mayores a 20 mil pero menores a 50,000 habitantes y, poblaciones

menores a 20 mil habitantes. La gran mayoría de plantas de tratamiento están ubicadas en poblaciones mayores a 50 mil habitantes (Conagua, 2014).

Las plantas de tratamiento presentadas en el anexo 3, descartando las que no se encuentran operando, son 1,060 de las 2,287 plantas en funcionamiento reportadas por Conagua a finales del año 2013.

Además, dado que la SSAPDS solamente reporta la situación de aproximadamente el 50% del total de plantas, y que se eliminaron 7 % del total reportado por no estar en funcionamiento, se debe considerar que el grupo de plantas de tratamiento analizadas como una muestra aleatoria de población finita, ver apéndice I. Cabe hacer mención que las plantas que se omitieron del análisis por reportar un caudal de 0 L/s o estar fuera de operación, se evaluarán posteriormente.

La variable a analizar es el porcentaje de uso del caudal instalado (%UCI), es decir, la relación entre el caudal tratado y el caudal instalado multiplicado por cien. En la figura 1.5 muestra los resultados obtenidos del análisis estadístico (apéndice I) donde se observa que del total de las plantas de tratamiento municipales que se encuentran operando, el 11% reportan un caudal tratado superior a la capacidad de la planta, lo que implicaría un tratamiento deficiente del agua, pues los tiempos de retención son menores a los calculados en el diseño original (Maskew, Geyer, & Okun, 1976). El 28% presentan subutilización de menos del cincuenta por ciento de su capacidad, lo que representa una mala planeación de los proyectos y un desperdicio de los recursos públicos. El resto de plantas de tratamiento, 61%,

cuentan con un %UCI que oscila entre el 50% al 100%, situación común en plantas de tratamiento municipales (Russel, 2012) y que puede considerarse que corresponden a plantas cuya operación es aceptable.

Estos porcentajes, de acuerdo al análisis estadístico que se muestra en el Apéndice I, se pueden extrapolar al total de plantas de tratamiento, que es de 2,287, para el año 2013, con una confianza del 99.78%.

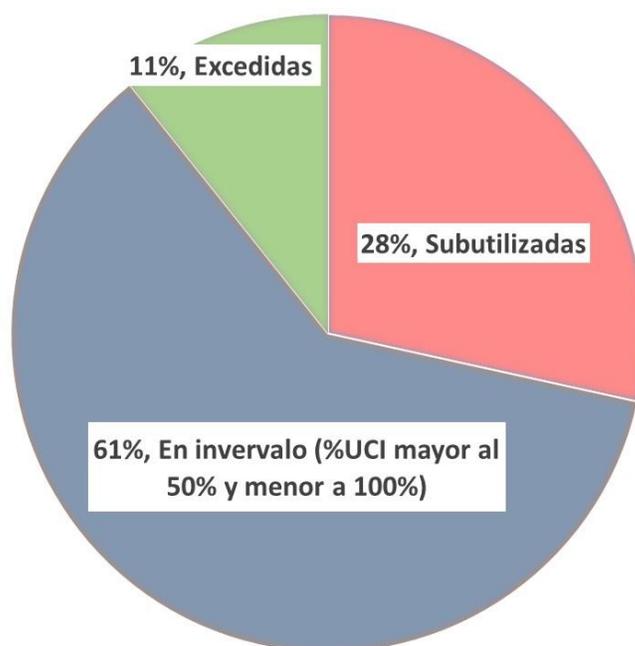


Figura 1. 5. Clasificación de las plantas de tratamiento municipales según su porcentaje de uso de caudal instalado (%UCI). Fuente: Anexo 3 de la publicación *Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, Conagua 2014*.

1.4 Plantas de tratamiento de agua municipal que no operan.

Así como constantemente se ponen en operación nuevas plantas de tratamiento, otras tantas van dejando de operar. En la figura 1.6, se puede observar que el porcentaje de plantas de tratamiento municipales sin operación ha ido en aumento

desde el año 2009. No obstante, el caudal tratado también lo ha hecho y de una manera constante, ver figura 1.1, situación que sugiere que las plantas nuevas compensan a las que van dejando de operar.

Entre los factores que propician el paro de las plantas de tratamiento van desde la deficiencia de personal capacitado y falta mantenimiento hasta desinterés de las autoridades locales (Conagua, 2014). Estas mismas limitaciones podrían ser también las que impiden que funcionen correctamente las plantas que se encuentran en operación.

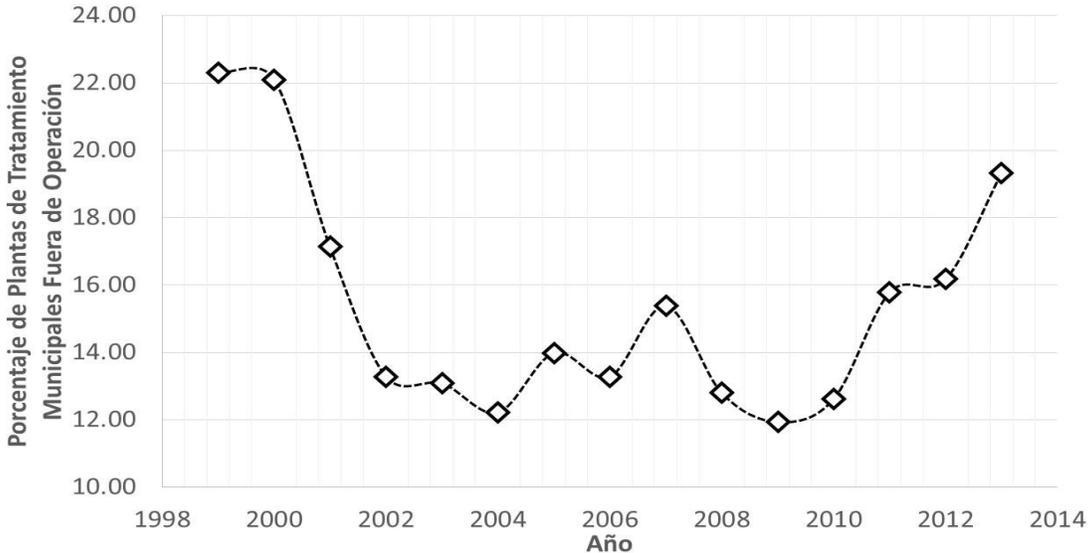


Figura 1. 6. *Porcentaje de plantas de tratamiento municipales fuera de operación. Fuente: Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) Conagua 2016. (<http://201.116.60.25/sina/>)*

1.5 Plantas de Tratamiento Industriales.

El Gobierno Federal siempre ha querido fomentar el crecimiento económico y esto se logra en parte con el desarrollo de nueva industria (INEGI, 2016; Oxford Business Group, 2015). Recientemente han llegado a México nuevas inversiones

extranjeras y se han favorecido créditos para que mexicanos logren formar empresas propias (CNN Expansión, 2015; Secretaría de Economía, 2016). Sin embargo, esta tendencia en el crecimiento industrial no se ha reflejado en una política hídrica congruente con el uso-tratamiento del agua industrial.

Existe poca información acerca de las plantas de tratamiento industriales y de su funcionamiento. El agua industrial no se cataloga dentro de la municipal, en consecuencia las plantas reportadas en los inventarios INPMPTARO y SSAPDS no incluyen información sobre plantas de agua de carácter industrial.

En el año 2010 se contaban con 2,850 plantas industriales, con un caudal tratado de 63.59 m³/s. pero, para el año 2013 el número de plantas de tratamiento industriales habían disminuido a 2,617, con un caudal tratado de 60.7 m³/s (Conagua, 2014); a diferencia del avance en el caudal de tratamiento de agua municipal, que fue de 12.33 m³/s en el mismo intervalo de años 2010-2013, el agua industrial tratada disminuyó 2.89 m³/s.

Lo anterior muestra que las estrategias gubernamentales han apuntado directamente al tratamiento de aguas municipales descuidando al agua no municipal, a pesar de que las aguas industriales no tratadas son enviadas directamente a cuerpos de agua (Ley de Aguas Nacionales, 1992), y que la mayor parte de ellas contienen sustancias peligrosas o altas cargas orgánicas.

Recordando las estrategias y líneas de acción del Programa Nacional de Infraestructura 2014-2018 (2015) para el subsector de saneamiento, el objetivo 3.1.3 se refiere únicamente a plantas de tratamiento de tipo municipal. De la

misma forma, el objetivo para el año 2030 contempla únicamente el tratamiento del total de aguas residuales de carácter municipal, dejando al tratamiento de aguas industriales como un objetivo posterior (Conagua, 2011).

Es posible que la política de dar preferencia al tratamiento de agua residual municipal se deba a que las descargas de éstas sean mayores que las no municipales, ver figura 1.7. Sin embargo, desde el año 2013 la mayor cantidad de agua residual no tratada que se descarga a los cuerpos de nacionales es de carácter industrial, ver Figura 1.8, lo que indica que el tratamiento a este tipo de agua residual no puede postergarse, pues de no darse en un tiempo razonable un aumento en los caudales de agua industrial tratada, los cuerpos de agua que todavía presentan un nivel aceptable de calidad pueden ser afectados con contaminantes persistentes y otros de muy lenta degradación, que representaría un riesgo irreversible.

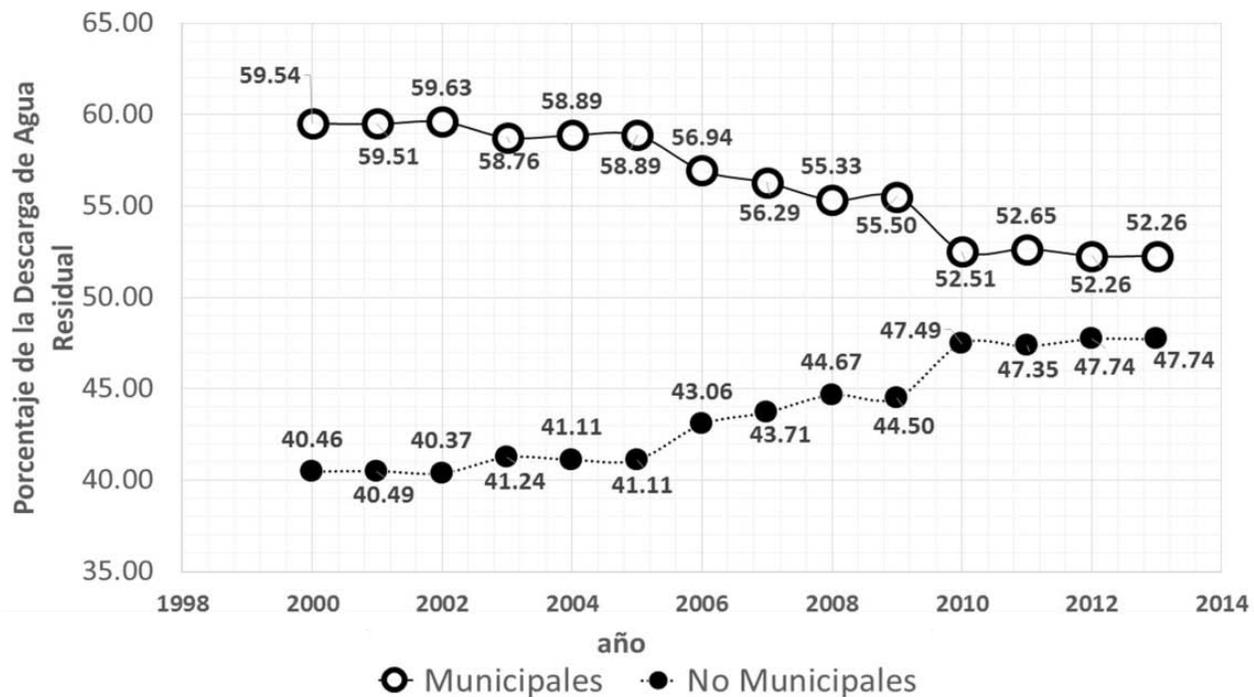


Figura 1. 7. Porcentaje de agua residual municipal y no municipal generada a través del tiempo. Fuente: Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) Conagua 2016. (<http://201.116.60.25/sina/>)

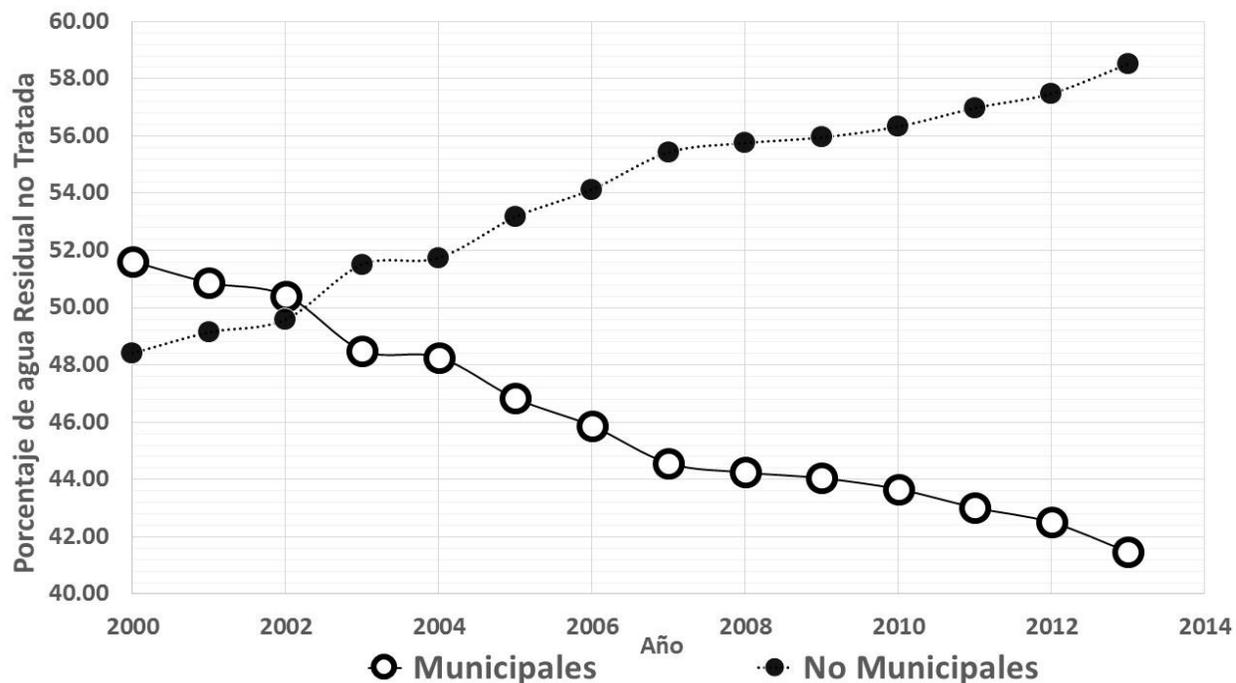


Figura 1. 8. Porcentaje del agua residual no tratada municipal y no municipal. Fuente: Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) Conagua 2016. (<http://201.116.60.25/sina/>)

Capítulo II. Calidad del Agua

2.1 Antecedentes

En el capítulo anterior se evaluó el sistema de saneamiento de aguas residuales usando como indicador el funcionamiento de las plantas de tratamiento reportado en los inventarios publicados por Conagua. Este capítulo usa como criterio la calidad de los cuerpos de agua nacionales, ya que:

- Aproximadamente el 60% del agua tratada se vierte a diferentes cuerpos de agua (Conagua, 2013)
- El sistema de saneamiento de agua residual se creó para mitigar la contaminación y presión en las reservas de agua (Conagua, 2014; Riffat, 2013)

Para determinar la calidad del agua tratada se deben seleccionar los criterios más adecuados tomando en cuenta su destino final (Russel, 2012). En la figura 2.1 se muestran los usos que se le da al agua municipal después de su tratamiento: 58% del total de aguas tratadas son vertidas en aguas nacionales como ríos, arroyos, grietas y lagos; 11% es utilizado para riego agrícola; 3% en usos municipales o industriales; 6% para riego de áreas verdes; 12% para usos particulares de cada comunidad y 10% en donde no se cuenta con información sobre la disposición final del agua tratada (Conagua, 2013).

Por lo anterior la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de agua

residuales que puedan descargarse en bienes nacionales o para uso agrícola, cuadros 2.1 y 2.2. Por otro lado la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMANAT-1997 establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios públicos, como el riego de áreas verdes, o el uso en la industria.

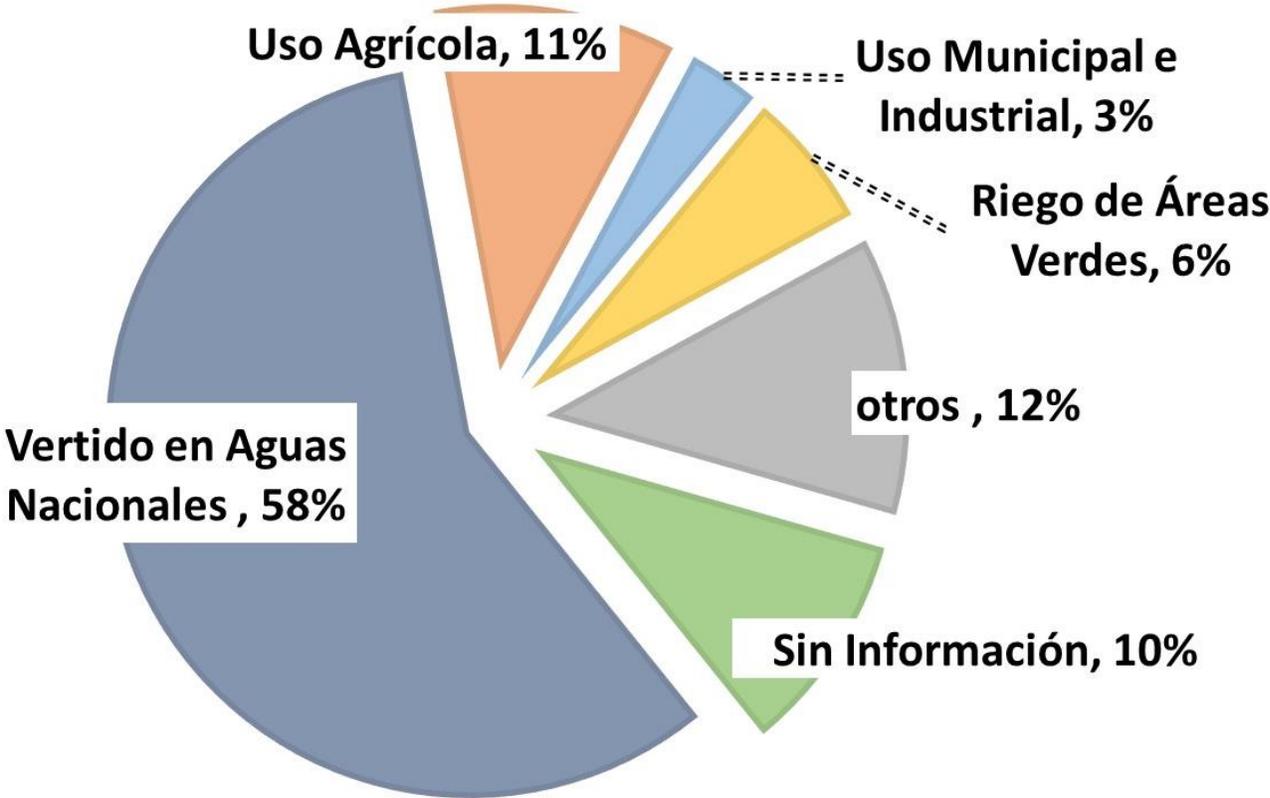


Figura 2. 1. Distribución porcentual del uso que se le da al agua residual tratada de origen municipal. Fuente: Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Conagua 2013.

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BÁSICOS																						
PARÁMETROS	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES						AGUAS COSTERAS						SUELO			
	Uso en riego agrícola (A)		Uso Público Urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		Estuarios (B)		Uso en riego agrícola (A)		Humedales naturales (B)			
(miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Temperatura °C (1)	N.A.	N.A.	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	N.A.	N.A.	40	40	40	40
Grasas y Aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25
Materia Flotante (3)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
Sólidos Sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	N.A.	N.A.	1	2
Sólidos Suspendedos Totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	75	125	40	60	75	125	200	200	150	150	75	125
Demanda Bioquímica de Oxígeno ₅	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	75	150	30	60	75	150	200	200	150	150	75	150
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	N.A.	N.A.	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	15	25	N.A.
Fósforo Total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	N.A.	N.A.	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	5	10	N.A.

(1) Instantáneo

(2) Muestra Simple Promedio Ponderado

(3) Ausente según el Método de Prueba definido en la NMX-AA-006. Derechos.

P.D.= Promedio Diario; P.M.= Promedio Mensual; N.A.= No es aplicable

(A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de

Derechos.

Cuadro 2. 1. Límites máximos permisibles para contaminantes básicos. Fuente: NOM-001-SEMARNAAT-1996; Límites Máximos permisibles de contaminantes en la descarga de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS Y CIANUROS																				
PARÁMETROS (*)	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS				SUELO					
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		ESTUARIOS (B)		Uso en riego agrícola (A)		HUMEDALES NATURALES (B)	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.05	0.1	0.1	0.2
Cianuro	1.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	3.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0
Cobre	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4.0	6.0
Cromo	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
Mercurio	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01	0.01	0.02	0.005	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01
Níquel	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	5	10	0.2	0.4
Zinc	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20

(*) Medidos de manera total.

P.D.= Promedio Diario, P.M.= Promedio Mensual; N.A.= No es aplicable

(A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos.

Cuadro 2. 2. Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros. Fuente: NOM-001-SEMARNAT-1996; Límites Máximos permisibles de contaminantes en la descarga de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

2.2 Datos ambientales utilizados como "Evaluadores de Impacto Ambiental" (EIA)

2.2.1 Administración de los cuerpos de agua

Los cuerpos de agua se administran y distribuyen en trece regiones hidrológico-administrativas (RHA), las cuales a su vez están formadas por conjuntos de cuencas, que son las unidades básicas de gestión de los recursos hídricos (Conagua, 2016).

Las RHA se clasifican en tres categorías denominadas tercil inferior, tercil medio y tercil superior, de acuerdo a su aportación al Producto Interno Bruto (PIB) (Conagua, 2014). En general, la aportación al PIB de las RHA catalogadas como tercil inferior es baja pero con una gran cantidad de agua renovable, relación que se invierte a medida que las RHA pasan de tercil medio a superior. Las zonas que pertenecen a esta última categoría presentan baja cantidad de agua renovable pero conforman el mayor aporte al PIB.

En la figura 2.2 se muestra un mapa del territorio nacional donde se presenta la ubicación de las RHA, además de una tabla donde se muestran los principales datos demográficos, socioeconómicos y de agua renovable (AR) de cada RHA.

Las regiones I, II, III, IV, V, VII, IX, X y XI están agrupadas en el tercil inferior y en conjunto representan el 35.9% de la aportación al PIB (2014). Las regiones VI, VIII, y XII forman el tercil medio que representan el 40.2% de la aportación al PIB

(2014) y; finalmente, la región XIII pertenece al tercil superior con una aportación al PIB del 23.9% (2014).



Clave	RHA	Superficie Continental Km ²	Agua Renovable 2011 (hm ³ /año)	Población a mediados del 2013 (millones de habitantes)	Aportación al PIB nacional 2012(%)	Agrupación por aportación al PIB
I	Península de Baja California	145385.0	4999.2	4.29	3.64	Tercil Inferior
II	Noroeste	205218.0	8324.9	2.76	2.86	Tercil Inferior
III	Pacífico Norte	152013.0	25939.1	4.42	2.72	Tercil Inferior
IV	Balsas	119248.0	22898.7	11.56	6.14	Tercil Inferior
V	Pacífico Sur	77525.0	32350.6	4.99	2.39	Tercil Inferior
VI	Río Bravo	379552.0	12757.2	12	14.02	Tercil Medio
VII	Cuencas Centrales del Norte	202562.0	8064.7	4.47	4.36	Tercil Inferior
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	190367.0	35754.0	23.6	18.19	Tercil Medio
IX	Golfo Norte	127166.0	28114.6	5.19	2.43	Tercil Inferior
X	Golfo Centro	104790.0	95124.5	10.4	6.07	Tercil Inferior
XI	Frontera Sur	101231.0	163845.5	7.48	5.3	Tercil Inferior
XII	Península de Yucatán	137753.0	29856.3	4.43	8.01	Tercil Medio
XIII	Aguas del Valle de México	16438.0	3468.4	22.82	23.86	Tercil Superior

Figura 2. 2. Ubicación, datos demográficos y socioeconómicos de las Regiones Hidrológico-Administrativas. Fuente: Conagua 2014.

2.2.2 Evaluadores del Impacto Ambiental

Para evaluar la calidad de los cuerpos de agua se pueden utilizar los parámetros llamados Evaluadores del Impacto Ambiental (EIA), que consisten en datos ambientales que se expresan como índices o tendencias. Los EIA son utilizados por los gobiernos para interpretar un fenómeno o proceso de una forma simple y sistémica (INE, 1997) y mientras se apliquen correctamente, son de gran utilidad debido a que no es necesario utilizar muchos de ellos para realizar un diagnóstico sólido (Perevochtchikiva, 2013).

Los EIA se dividen en tres categorías: "evaluadores de presión", que consisten en acciones que afectan directamente o indirectamente al ambiente; "evaluadores de estado", que se refieren al diagnóstico de la calidad ambiental; y finalmente "evaluadores de respuesta", que muestran el esfuerzo social y político en materia ambiental (Semarnat, 2016).

Los caudales tratados y no tratados de aguas residuales, utilizados en el primer capítulo, son indicadores de presión, ya que una descarga de agua municipal tratada o no tratada afecta en diferente magnitud al ambiente, considerando que entre mayor sea la calidad del tratamiento del agua residual, el impacto sobre el cuerpo de agua receptor, será menor.

En este capítulo se utilizan los EIA referentes al saneamiento del agua, que corresponden a los denominados "evaluadores de estado" y que son los que normalmente utilizan las dependencias relacionadas con el control de la calidad del agua (Conagua, 2014).

Dichos EIA son: Sólidos Suspendidos Totales (SST), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO). En este estudio también se incluyen otros parámetros químicos, que normalmente no son utilizados por Conagua (2015), como son el nitrógeno total, fósforo total y la concentración de elementos potencialmente tóxicos (EPT), conocidos como metales pesados.

2.2.2.1 Sólidos Suspendidos Totales

Se refiere a los sólidos sedimentables y materia orgánica en suspensión o coloidal que son retenidos en un elemento filtrante. Son regulados por la NOM-001-SEMARNAT-1996 para la descarga de aguas en bienes nacionales. El método para su determinación está descrito en la norma NMX-AA-34-SCFI-2001.

Por lo general, los SST representan del 30% al 60% de la DBO en aguas municipales, sus tamaños varían de 0.001 mm a 5 mm, y presentan una densidad entre 0.8 y 2.65 g/cm³ (Russel, 2012). El aumento de los niveles de SST reduce la capacidad del cuerpo de agua para sustentar la vida acuática (Conagua, 2014).

En México, existen 3,608 sitios de monitoreo para SST colocados en los lugares de mayor influencia antropogénica. El agua se clasifica en cinco categorías: excelente, buena calidad, aceptable, contaminada y fuertemente contaminada. Cada una de ellas se determina con base en un intervalo de valores de SST, tal y como se muestra en el cuadro 2.3.

Categoría	SST [mg/L]
Excelente	SST ≤ 25
Buena Calidad	25 < SST ≤ 75
Aceptable	75 < SST ≤ 150
Contaminada	150 < SST ≤ 400
Fuertemente Contaminada	SST > 400

Cuadro 2. 3. Clasificación en la calidad de los cuerpos de agua hecha por Conagua según los niveles de Sólidos Suspendidos Totales. Fuente: Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) Conagua 2016. (<http://201.116.60.25/sina/>)

2.2.2.2 Demanda Bioquímica de Oxígeno

La solubilidad del oxígeno en agua no clorada, a una presión de 101.3 kPa y a una temperatura de 25°C, es de 10.657mg/L (Russel, 2012). La degradación de materia orgánica por microorganismos disminuye la concentración de oxígeno limitando la capacidad de sustentar la vida. El oxígeno disuelto es medido a través del método Winkler modificado (Romero J. , 2005).

La DBO es un parámetro que mide la cantidad de oxígeno que se consume al degradar la materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos. Es medida a través de un ensayo que determina la cantidad de oxígeno utilizado por microorganismos aclimatados a condiciones anaeróbicas, temperatura de 20°C a un tiempo determinado (Riffat, 2013). Los detalles de la técnica analítica se encuentran en la norma NMX-AA-028-SCFI-2001. Las descargas de aguas tratadas deben cumplir con los límites máximos permisibles de la DBO, que se indican en las normas correspondientes NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997, dependiendo de la disposición del agua tratada.

La DBO es aplicable a aguas continentales (ríos, lagos o acuíferos), aguas negras, aguas pluviales o agua de cualquier procedencia que contengan una cantidad apreciable de materia orgánica. Este método no es adecuado para evaluar la calidad del agua potable, pues su contenido de materia oxidable es muy baja, en relación con la precisión del método (Romero J. , 2005).

Normalmente la DBO se mide después de 5 días de la reacción y se expresa en miligramos de oxígeno molecular por litro (mgO_2/L). Se considera que en 5 días el 60%-70% de la materia orgánica presente en la muestra se habrá degradado, y en 20 días lo habrá hecho más del 90%. No obstante, el test de la DBO_5 fue propuesto por el hecho de que en Inglaterra ningún curso de agua demora más de 5 días en alcanzar el océano (desde nacimiento a desembocadura). Así la DBO_5 es la demanda máxima de oxígeno para un cuerpo de agua de Inglaterra pero puede no ser el indicador más adecuado cuando el agua tratada se descarga en un cuerpo de agua aislado, como es el caso de lagos volcánicos existentes en México. Es necesario fijar una temperatura y un tiempo debido a que la velocidad a la que los microorganismos degradan a la materia orgánica es descrita en términos de la ecuación diferencial (Ecuación 2.1) de primer orden (Riffat, 2013).

$$\frac{dL_t}{dt} = -kL_t$$

Ecuación 2.1

Donde:

L_t : El oxígeno equivalente a la materia orgánica remanente al tiempo t , [mg/L].

K : Constante de la rapidez de reacción dependiente de la temperatura, [d^{-1}].

t : Tiempo [días]

Aunque la DBO_5 es muy utilizada para evaluar la eficiencia de las plantas de tratamiento, pocas poseen un tiempo de residencia de 5 días, por lo que, para cuando el ensayo está terminado el agua analizada tiene varios días de haber abandonado la planta de tratamiento, dejando los datos de DBO_5 sólo como un registro histórico (Russel, 2012). Sin embargo, es útil como indicador comparativo de la calidad del agua tratada en diferentes plantas de tratamiento.

El método pretende medir, en principio, exclusivamente la concentración de contaminantes orgánicos. Sin embargo, la oxidación de la materia orgánica no es la única causa del fenómeno, también intervienen la oxidación de nitritos y de las sales amoniacales. Para evitar esta limitante se añade N-aliltiourea como inhibidor. Además, influyen las necesidades de oxígeno originadas por los fenómenos de asimilación y de formación de nuevas células.

También se producen variaciones significativas en la medición de DBO_5 según las especies de gérmenes, concentración de estos y su edad, presencia de bacterias nitrificantes y de protozoos consumidores de oxígeno que se nutren de las bacterias, entre otros factores. Es por estas limitaciones que esta prueba de carácter biológico ha sido constantemente objeto de discusión.

Conagua utiliza este parámetro para conocer la cantidad de materia orgánica en la descarga de aguas tratadas que posteriormente se degradará, trayendo consigo una disminución de oxígeno disuelto en el cuerpo receptor (Conagua, 2014).

En México existen 2,647 sitios de monitoreo ubicados en lugares de alta influencia antropogénica, en los que se determina la DBO_5 clasificando los valores en las

categorías excelente, buena calidad, aceptable, contaminada y fuertemente contaminada de acuerdo a los intervalos de DBO₅ mostradas en el cuadro 2.4.

Categoría	DBO₅ [mg/L]
Excelente	DBO ₅ ≤ 3
Buena Calidad	3 < DBO ₅ ≤ 6
Aceptable	6 < DBO ₅ ≤ 30
Contaminada	30 < DBO ₅ ≤ 120
Fuertemente Contaminada	DBO ₅ > 120

Cuadro 2. 4. Clasificación de la calidad de los cuerpos de agua hecha por Conagua según los niveles de la Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días. Fuente: Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) Conagua 2016. (<http://201.116.60.25/sina/>)

2.2.2.3 Demanda Química de Oxígeno

La demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que están presentes en una muestra líquida o una suspensión. Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mgO₂/L). La oxidación es llevada a cabo mediante el dicromato de potasio, usando mercurio como catalizador. El método analítico se describe en la norma NMX-AA-030/1-SCFI-2001 y, generalmente, presenta valores de consumo de oxígeno de entre 20% y 50%, mayores que las de DBO. (Romero J. , 2005)

En México la DQO es un indicador de actividad industrial (Conagua, 2014) pues cuando se obtiene un valor mucho mayor que la DBO se sabe que hay sustancias generalmente producidas por la industria, como son los sulfuros, sulfitos, yoduros.

Cabe mencionar, que no existe ninguna especificación sobre los niveles de DQO en las normas de calidad de agua, pero es utilizado como un EIA (Conagua, 2016).

La DQO varía en función de las características de las materias presentes, de sus proporciones respectivas, de sus posibilidades de oxidación entre otras variables. Es por esto que la reproducibilidad de los resultados y su interpretación no pueden ser satisfechas más que en condiciones de metodología de ensayo bien definidas y estrictamente respetadas.

Existen 2,651 sitios de monitoreo de DQO colocados en lugares de alta influencia antropogénica. Nuevamente, Conagua cataloga la calidad del agua en las categorías excelente, buena calidad, aceptable, contaminada y fuertemente contaminada según los niveles de DQO presentados en el cuadro 2.5.

Categoría	DQO [mg/L]
Excelente	DQO ≤ 10
Buena Calidad	10 < DQO ≤ 20
Aceptable	20 < DQO ≤ 40
Contaminada	40 < DQO ≤ 200
Fuertemente Contaminada	DQO > 200

Cuadro 2. 5. Clasificación de la calidad de los cuerpos de agua hecha por Conagua según los niveles de la Demanda Química de Oxígeno. Fuente: Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) Conagua 2016. (<http://201.116.60.25/sina/>)

2.3 Evaluación de los cuerpos de agua con base a los EIA

Para el análisis de los tres diferentes EIA usados (SST, DBO y DQO), se modificó la clasificación hecha por Conagua de la siguiente manera: se agruparon las categorías “Excelente” y “Buena Calidad” en una sola llamada Buena Calidad, y de

la misma forma se agruparon las categorías “Contaminada” y “Fuertemente Contaminada” para formar solamente una que se denominó Contaminada. La categoría “Aceptable” se mantuvo sin cambios. Lo anterior se realizó para facilitar el tratamiento de datos.

Estas nuevas clasificaciones se graficaron en función del año junto con el porcentaje de caudal tratado para aguas municipales, no municipales y los milímetros de lluvia en el territorio nacional. Los resultados se presentan a continuación en las Figuras 2.3, 2.4 y 2.5.

La figura 2.3 muestra que los procesos de tratamiento de agua municipal son particularmente eficientes en la remoción de los sólidos suspendidos o, dado que se deja sin tratamiento al 50% y el 70% de las aguas municipales e industriales respectivamente (Conagua, 2016), las aguas residuales producidas en México no se caracterizan por una cantidad grande de sólidos suspendidos, dado los valores relativamente bajos de este parámetro. También puede observarse que el agua de buena calidad ha ido en aumento desde el año 2003 y se ha mantenido cercana al 80% desde el año 2009. Por lo anterior, es posible mencionar que la calidad de los cuerpos de agua en México, tomando como indicador a los SST, se encuentran en un estado aceptable en la mayoría del territorio nacional.

El número de precipitaciones que han ocurrido hace unos años podría ser un factor que redujera la concentración de partículas suspendidas en los cuerpos de agua, por lo que se graficó la magnitud de las precipitaciones en mm de manera conjunta. Se puede observar que la variación en las precipitaciones no indica que

estas pudieran ser la causa de la mejora en la calidad del agua. Esta observación, también se aplica a las figuras 2.4 y 2.5.

En la figura 2.4, usando como indicador a la DBO, muestra cómo, desde el 2003 al año 2014, la cantidad de “agua contaminada” ha disminuido del 20% a menos del 10%, mientras que los volúmenes catalogados como “buena calidad” se han mantenido cercanos al 65%. Puede notarse que las cantidades de “agua aceptable” (concentraciones de DBO de 6mg/L a 30mg/L) se han incrementado de manera constante. En general, basándose en las mediciones de la DBO se observa una mejora general. Lo anterior posiblemente es consecuencia de las políticas de tratamiento de aguas municipales del Gobierno Federal, por lo que siguiendo su línea de acción es posible que se obtengan mejores resultados en cuando al indicador de DBO.

En la figura 2.5 se muestra las tendencias en la calidad del agua de acuerdo con la DQO, indicador de la presencia de aguas de origen industrial (Conagua, 2014). Se puede observar como el agua clasificada como de “buena calidad” ha disminuido notablemente desde un 50% hasta menos del 20% entre los años 2009 y 2014. Por otra parte, actualmente cerca del 45% del agua se encuentra contaminada.

La contaminación de los cuerpos de agua siguiendo el indicador DQO posiblemente se debe a que cerca del 70% de las aguas industriales no se tratan (Conagua, 2016), generando que la mayor cantidad de agua no tratada descargada en los cuerpos nacionales sea de origen no municipal, figura 1.8.

Dicha situación es agravada por el hecho de que actualmente se ha impulsado un crecimiento económico a través de políticas neoliberales (Romero, 2012) sin reforzar las leyes que protegen los recursos naturales.

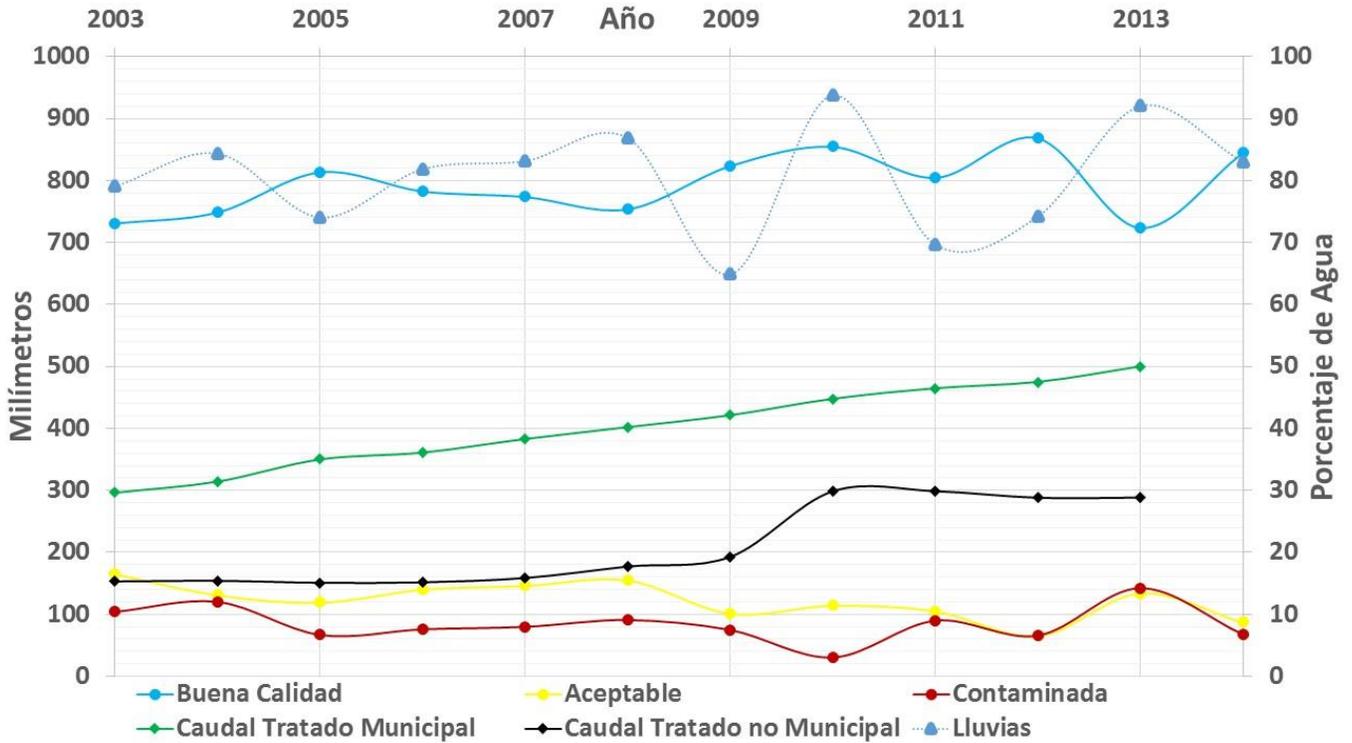


Figura 2. 3. Porcentaje de agua catalogada como Buena Calidad, Aceptable y Contaminada según el indicador SST, junto con el caudal tratado municipal e industrial y las lluvias en el territorio a través del tiempo. Fuente: Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) Conagua 2016. (<http://201.116.60.25/sina/>).

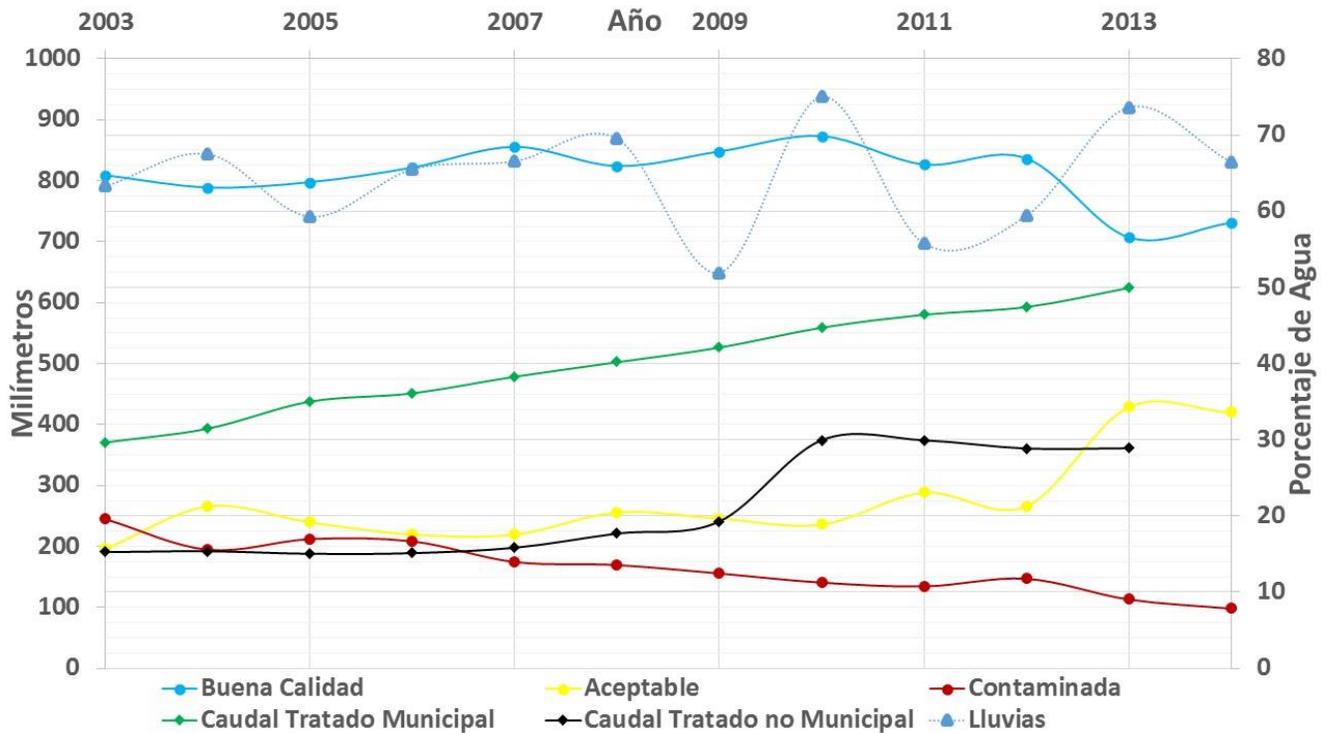


Figura 2. 4. Porcentaje de agua catalogada como Buena Calidad, Aceptable y Contaminada según el indicador DBO, junto con el caudal tratado municipal e industrial y las lluvias el territorio a través del tiempo. Fuente: Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) Conagua 2016. (<http://201.116.60.25/sina/>).

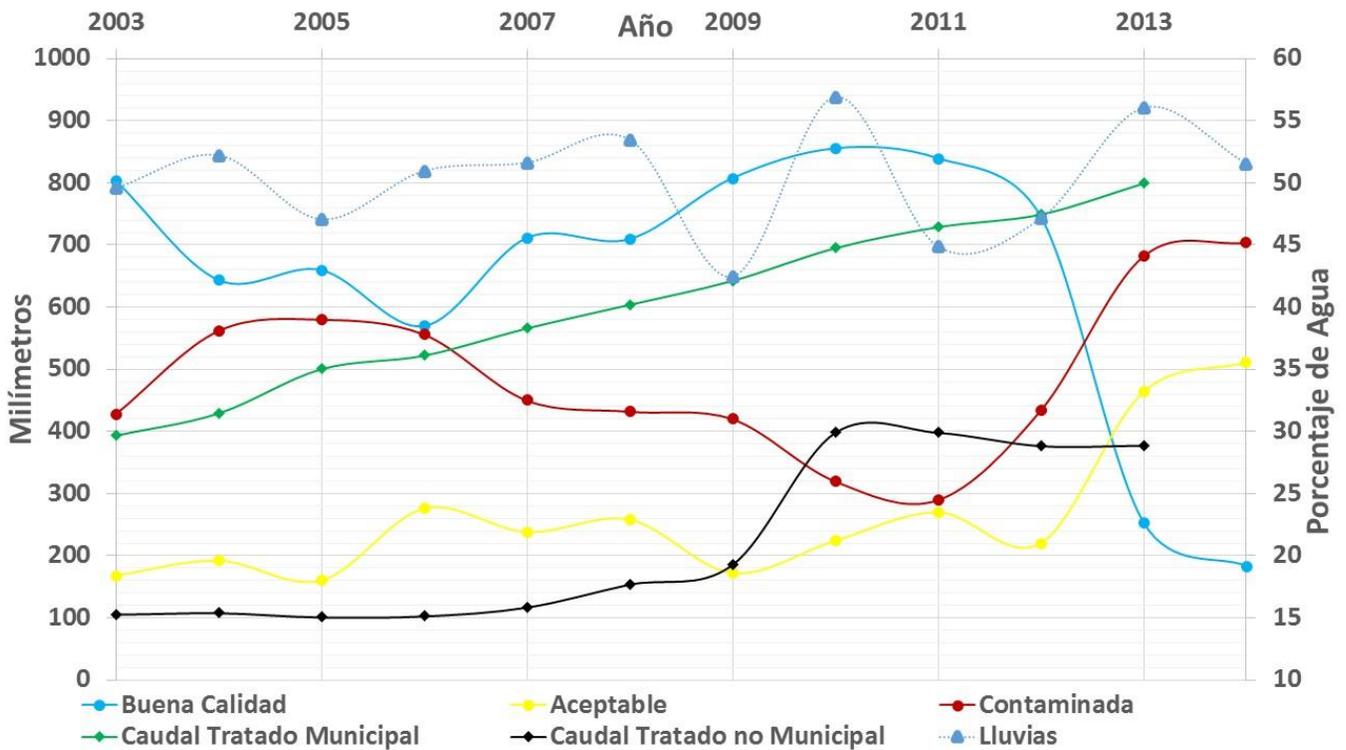


Figura 2. 5. Porcentaje de agua catalogada como Buena Calidad, Aceptable y Contaminada según el indicador DQO, junto con el caudal tratado municipal e industrial y las lluvias en el territorio a través del tiempo. Fuente: Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) Conagua 2016. (<http://201.116.60.25/sina/>).

2.4 Nitrógeno y Fosforo

La DBO₅ solo toma en cuenta la materia que se puede degradar por microorganismos en los primeros cinco días, por lo que este indicador no incluye la demanda de oxígeno debida a las reacciones microbiológicas que oxidan al nitrógeno (Riffat, 2013; Romero J. , 2005; Russel, 2012). Los niveles de nitrógeno y fósforo que deben tener las descargas de agua se especifican en la norma NOM-001-SEMARNAT-1996, ver cuadro 2.1.

La información disponible sobre los niveles de nitrógeno y fósforo en los cuerpos de agua nacionales es insuficiente, no actualizada, poco clara y dispersa. Un ejemplo, son los datos presentados en el cuadro 2.6 donde se muestran los niveles de nitrato y fosfato en aguas superficiales con un porcentaje de datos no disponibles que sobrepasan el 40%, además de que, los datos, no han sido actualizados desde el 2009. Sin embargo, es posible que los niveles de nitrógeno y fósforo en aguas nacionales actualmente sean altos, ya que: a) el sector agrícola consume 76.7% del agua disponible (Conagua, 2016), b) el incremento en la producción nacional de fertilizantes fosfatados y su consumo (Gaucín & Garrido, 2013), y c) las plantas de tratamiento, excepto las construidas en años posteriores al 2013, sólo remueven materia orgánica del tipo carbonoso, dejando concentraciones altas de nitrógeno y fosforo (Luna & Aburto, 2014).

El uso de fertilizantes y su presencia en agua de riego producen la acidificación del suelo, la disminución en las bacterias y el incremento en los hongos existentes; disolución de nutrientes y producción de Al³⁺ soluble, especie

tóxica para las plantas. Sin embargo, el efecto más grave asociado a niveles altos de nitrógeno y fósforo es el fenómeno de la eutrofización (Sodhi, 2005).

La eutrofización es un proceso natural de envejecimiento en los cuerpos de agua que puede ser acelerado por la adición de grandes cantidades de nutrientes. La eutrofización produce crecimiento de algas, disminución del oxígeno disuelto y muerte de peces. Actualmente se pueden encontrar estudios donde se evidencia la existencia de cuerpos de agua con eutrofización (Escobedo, 2010; Hernández, 2011). Además Herrera et al., (2011) hizo una recopilación de estudios en donde concluyen que de las 18 lagunas costeras del golfo de México evaluadas, el 50% presentaron inicios de eutrofización.

Por lo dicho anteriormente, es necesario contar con datos completos, claros y actualizados para conocer cuál es la calidad del agua de los cuerpos receptores según la concentración de nitrógeno y fósforo (Herrera, et al., 2011). Es recomendable monitorear dichos niveles a escala de los realizados para SST, DBO y DQO; además de establecer procesos económicos que permitan la remoción nitrógeno y fósforo como es el caso de los humedales artificiales (Luna & Aburto, 2014; Rodríguez & Durán, 2006).

FOSFATO TOTAL EN AGUAS SUPERFICIALES			
(concentración en mg/L y sitios de monitoreo en porcentaje)			
CONCENTRACIÓN	SITIOS DE MONITOREO		
	AÑO		
	2006	2007	2008
0.0 a 0.025	3.15	3.23	1.98
> 0.025 a 0.05	3.15	0.55	2.66
> 0.05 a 0.1	2.59	1.48	5.02
> 0.1	55.74	31.90	35.25
ND	35.37	62.83	55.09

Notas:

- 1) ND: no disponible.
- 2) Los niveles máximos permitidos no deben exceder 0.1 mg/L

Fuente:

Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua, Conagua, Semarnat. Septiembre del 2009.

NITRATO EN AGUAS SUPERFICIALES			
(concentración en mg/L y sitios de monitoreo en porcentaje)			
CONCENTRACIÓN	SITIOS DE MONITOREO		
	AÑO		
	2006	2007	2008
De 0 a 0.2	16.30	27.38	24.67
> 0.2 ≤ 3	46.85	29.82	27.62
> 3 ≤ 5	1.48	2.40	1.64
> 5 ≤ 10	1.11	1.29	1.06
ND	34.26	39.10	45.00

Notas:

- 1) ND: Información no disponible
- 2) Los porcentajes corresponden a las estaciones de monitoreo con un valor determinado de nitrato total.
- 3) El número de sitios de monitoreo difiere entre años: 2006= ND; 2007 = 519 y 2008 = 524

Fuentes:

Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua, Conagua, Semarnat. Agosto de 2007. Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua, Conagua. Semarnat. Septiembre de 2009.

Cuadro 2. 6. Niveles de nitrato y fosfato para aguas superficiales. Fuente: Indicadores Básicos del Desempeño Ambiental de México. Semarnat 2016. (http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/indicadores14/conjuntob/02_agua/02_calidad_esquema.html)

2.5 Elementos potencialmente tóxicos

Los elementos potencialmente tóxicos (EPT) son llamados coloquialmente "metales pesados" . ero dicho termino es poco preciso (Weiner, 2013), por lo que en este texto se denominan EPT.

Algunos de estos elementos son nutrimentos esenciales para una o varias especies, pero un exceso en el consumo puede ser perjudicial. Otros son denominados "benéficos" debido a que su presencia en ciertas cantidades favorece el crecimiento de las especies pero su ausencia no parece generar ningún daño. Por último, hay un grupo que no tienen ninguna función vital reconocida y solamente se consideran tóxicos cuando superan ciertas dosis. En realidad, son las especies las que pueden dañar y no necesariamente el elemento,

como es el caso del cromo que en su estado trivalente forma compuestos de muy baja biodisponibilidad por lo que su toxicidad es prácticamente nula. No obstante, el cromo hexavalente es muy oxidante y produce daños cuando se respira o se ingiere en altas concentraciones. Lo mismo sucede con el arsénico, que en forma trivalente es más tóxico que el pentavalente.

Los EPT se pueden encontrar de forma disuelta en los cuerpos de agua, generalmente a concentraciones bajas, o asociados a sedimentos y pueden ser bioacumulados a través de las cadenas alimenticias.

La disolución de EPT se puede dar por disolución y desorción de las arcillas y oxi-hidróxicos. Estos fenómenos se dan por competencia según las condiciones de óxido-reducción (pE) y a los valores de pH. Por ejemplo cuando las condiciones son reductoras aumenta la concentración de Mn (II) y la reducción del Mn (IV)

Las rutas en las que los metales pueden afectar la calidad de los cuerpos de agua, pueden ser por procesos naturales o antropogénicos, estas últimas pueden producir un aumento de todas las especies que forman compuestos solubles, como son Na^+ , Cl^- , HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , y aumentar la concentración natural de algunos elementos, como Fe^{3+} , Cu^{2+} , Hg^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} . Además, algunos EPT pueden no estar solubles pero encontrarse en coloides suspendidos en el agua.

Conagua no aporta información sobre las concentraciones de los EPT en los cuerpos de agua, pero Villanueva y Botello (1992) realizaron una recopilación de los datos sobre concentraciones de algunos metales no esenciales en agua, sedimento y organismos en las zonas costeras del Golfo y Caribe Mexicanos

donde concluyeron que el agua del 30% de los ríos y las lagunas del Golfo de México contienen mercurio y plomo. Además, de que existen un gran número de publicaciones donde se expone la contaminación de cuerpos de agua (Valdés, et al., 1999; Gómez, et al., 2004) y suelos (Mancilla, et al., 2012; Siebe, 1994) además de bioacumulación en seres vivos (Lara, et al., 2015; Lango, et al., 2010) ocasionada por EPT descargados tanto en aguas tratadas como no tratadas.

	Ag	As	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Pb	Ni	Sb	Sn	Zn
Pulpa y papel												
Químicos orgánicos y petroquímica												
Álcalis, Cloro, Químicos Inorgánicos												
Fertilizantes												
Refinerías de Petróleo												
Siderúrgicas de Hierro												
Metalurgia no ferrosas												
Galvanoplastia, automotores y aeroplanos												
Vidrio, cemento, productos de asbesto												
Textilerías												
Curtiembres												
Generación de energía con vapor												

Cuadro 2. 7. Algunos EPT presentes en efluentes industriales. Fuente: Criterios para la Selección de Procesos de Tratamiento de Aguas Residuales; Yáñez Fabián; Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente; Sin fecha.

Debido a su naturaleza, las descargas de aguas no municipales presentan una mayor concentración de EPT que las de origen municipal, cuadro 2.7. No se puede conocer de manera concreta la situación de los cuerpos de agua en materia de metales pesados debido a que no se poseen datos comparables entre sí, pero se puede considerar que los niveles pueden ser altos en zonas industriales, debido a que alrededor del 70% del agua generada por plantas de producción no recibe tratamiento y se descarga directamente en los cuerpos de agua nacionales (Conagua, 2016; Ley de Aguas Nacionales, 1992).

Capítulo III. Procesos de Saneamiento

3.1 Generalidades

La selección de los procesos de tratamiento es una parte vital en el sistema de saneamiento. Al diseñar una planta se debe tener en cuenta la capacidad de instalación y el método de tratamiento. Ambos criterios dependerán principalmente del origen, cantidad y composición de las aguas residuales que puedan descargarse en relación con el volumen y naturaleza del agua de dilución. Así como a las posibilidades que se tengan para el tratamiento de los residuos que todo proceso de tratamiento genera (Babbitt & Robert, 1983), pues representan un riesgo para el ambiente y la población.

Para la ubicación de una planta de tratamiento debe considerarse la topografía, el costo y la opinión de los residentes. Una planta puede operar satisfactoriamente en zonas urbanas, sin embargo, el aumento en el costo del equipo y del funcionamiento, las generación de malos olores, dificultades en el transporte y destino de los residuos y el posible aumento de fauna nociva, hace que haya una resistencia de la población para aceptarlas. En consecuencia, puede optarse por ubicar la plantas de tratamiento en sitios alejados, disminuyendo los problemas sociales y técnicos asociados al mal funcionamiento (Babbitt & Robert, 1983).

Al construir una planta de tratamiento se deben generar especificaciones en el equipo y en los procesos, las cuales no deben ser demasiado rígidas, pues se restringirá la capacidad de la planta para condiciones anormales de operación, ni

demasiado laxas, ya que se correría el riesgo de no cumplir con la calidad y el rendimiento requeridos.

En México el método más usado para el saneamiento de agua es el biológico (Conagua, 2016), siendo los procesos de lodos activados y lagunas de estabilización los más comunes (ver figura 3.1).

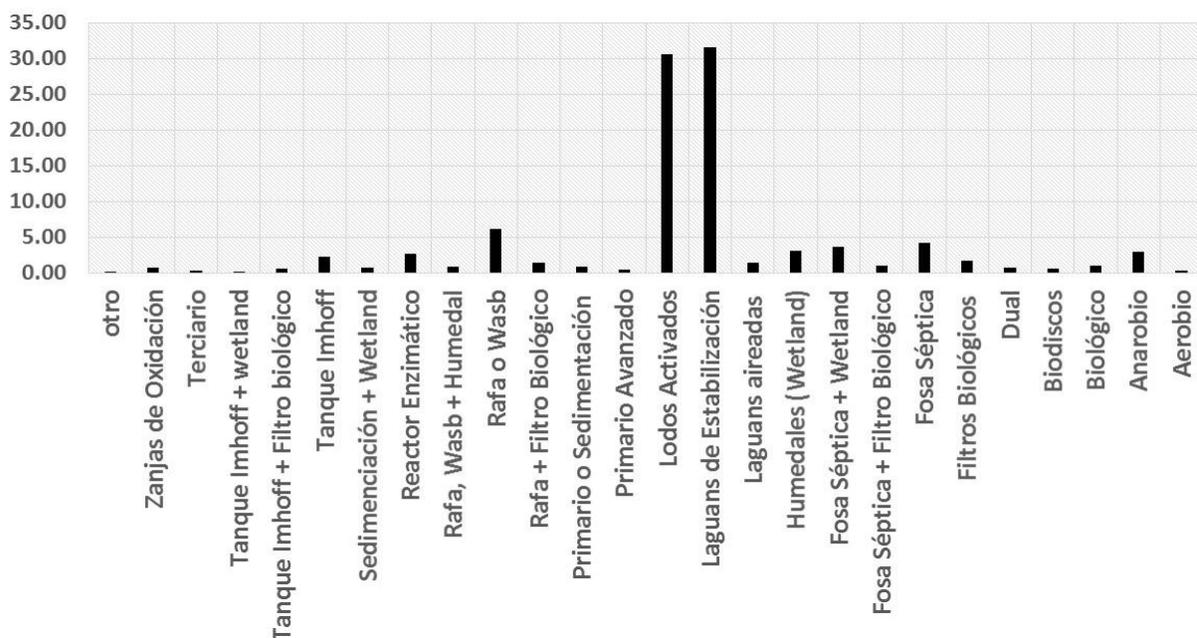


Figura 3. 1. Porcentaje de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales según el proceso usado. Fuente: Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Conagua 2013.

3.2 Operaciones unitarias

La finalidad de los procesos de saneamiento consiste en retirar del agua a tratar las sustancias indeseadas o transformarlas en sustancias no peligrosas. Para este fin, se hace uso de una serie de operaciones unitarias las cuales pueden combinarse en formas diferentes, hasta alcanzarse el grado de tratamiento deseable. Aunque las consideraciones económicas son el factor limitante al

número de operaciones unitarias posibles y por ende a la calidad del agua resultante (Maskew, Geyer, & Okun, 1976).

Para el caso de la ingeniería sanitaria, las operaciones unitarias se pueden agrupar en las categorías siguientes:

- Transferencia de gases, que consiste en la exposición del agua residual al aire o a otras atmósferas bajo presiones determinadas con el fin de desprender o absorber los gases.
- Transferencia de iones; que consiste en las operaciones siguientes:
 - Coagulación química. Cuya finalidad es la de acelerar la sedimentación agregando al agua sustancias formadoras de flóculos, con el propósito de que se combinen con los sólidos coloidales de lenta sedimentación.
 - Precipitación Química. Consiste en la precipitación de agentes que se encuentren disueltos en el agua residual mediante la adición de sustancias químicas.
 - Intercambio iónico. Intercambio de iones específicos presentes en el agua por otros complementarios.
 - Adsorción. Retención de iones y moléculas en la superficie de coloides presentes en el agua residual a través de interacciones polares, iónicas y covalentes. Cuando se denomina sorción, incluye fenómenos de absorción (parte interna del coloide) y coprecipitación de los contaminantes.

- Estabilización de solutos. Transformación de especies no deseables en el efluente del tratamiento, a especies aceptables haciendo uso de reacciones químicas.
- Transferencia de sólidos. Consiste en utilizar el cribado, sedimentación, flotación o filtración para separar de la solución los sólidos indeseables.
- Transferencia de nutrientes. Consiste en la purificación de las aguas residuales a través de microorganismos que convierten las sustancias complejas, principalmente de carácter orgánico, en otras más simples o estables que no representan riesgo.
- Operaciones "varias". Son procesos misceláneos que permiten asegurar la calidad necesaria para el uso final del agua tratada, como la desinfección, fluoración, desalinización, entre otras.

El proceso de saneamiento de agua puede separarse en cuatro etapas:

Tratamiento preliminar; cuyo objetivo es evitar problemas en etapas posteriores mediante la separación de sólidos y grasas a través de las etapas de cribado, tamizado, desengrasado, regulación y preaeración.

Tratamiento Primario; consiste en las operaciones de sedimentación, coagulación o precipitación química y se utiliza para reducir el esfuerzo en procesos posteriores. Este tratamiento no es obligatorio en plantas de tratamiento municipales (Marín & Osés, 2013).

Tratamiento Secundario; su principal función es remover la DBO. Los procesos secundarios más habituales son los biológicos en el que se hace uso de bacterias

aerobias o anaerobias para digerir la materia orgánica. El líquido efluente presenta una reducción de la DBO de hasta el 95% (Madigan et al., 2009).

El tratamiento terciario consiste en cualquier procedimiento físico-químico o biológico, empleando biorreactores, precipitación, filtración o cloración de modo similar a los procedimientos que se utilizan para la purificación en el agua potable. Este método es el más completo para el tratamiento de aguas residuales, pero no es ampliamente usado debido a su alto costo. Después del procedimiento terciario el agua puede utilizarse para el consumo humano.

3.3 Tratamientos Biológicos

3.3.1 Características

Los tratamientos biológicos tienen el objetivo de remover la materia orgánica ya sea oxidándola hasta CO_2 , H_2O y NH_3 o convirtiéndola en una forma sedimentable que pueda ser removida por gravedad.

En los procesos biológicos se han identificado relaciones adecuadas para el crecimiento de microorganismos entre el carbono:nitrógeno:fósforo (C:N:P), cuyos valores son 100:20:1 y 100:5:1. Esto implica que las aguas residuales no deben estar ni demasiado diluidas ni demasiado concentradas, los niveles adecuados de DBO en los influentes de las aguas municipales que se envían a las plantas de tratamiento deben estar entre 60mg/L a 500 mg/L (Russel, 2012; Babbitt et al., 1983).

Debe tenerse en cuenta que los sistemas biológicos no toleran los cambios bruscos en las condiciones de alimento (cargas de choque) y variaciones en cargas hidráulicas. El descenso en la temperatura puede provocar una disminución en la velocidad de la reacción biológica (Riffat, 2013).

3.3.2 Lodos Activados

Es un proceso biológico de contacto en el que los organismos vivos aerobios y los sólidos orgánicos de las aguas residuales se mezclan en un medio ambiente favorable para la descomposición de los sólidos. La eficacia del proceso depende de que se mantengan continuamente los niveles necesarios de oxígeno disuelto.

Debido a que las aguas residuales cuentan solamente con una pequeña cantidad de bacterias que degradan la materia orgánica, es necesario añadir lodos activados formados por flóculos provenientes de los residuos del mismo proceso, que se recirculan en forma constante. Los lodos son muy ricos en bacterias degradadoras y, además, favorecen la absorción y adsorción de la materia orgánica coloidal.

Los requerimientos de aire en el proceso de lodos activados dependerán principalmente de la carga de DBO, la cantidad de lodos activados, la concentración de sólidos y la eficacia de abatimiento de DBO. De manera general se debe mantener una concentración mínima de 2 mg/L. Es importante señalar que una cantidad deficiente de aire da como resultado lodo inadecuado y, en consecuencia, agua tratada de baja calidad. Sin embargo un exceso de aireación

también es perjudicial, pues podría ocasionar la formación de lodos finos de difícil sedimentación (Dpto. de Sanidad del Edo. de Nueva York, 1967).

3.3.3 Lagunas de Estabilización

Junto con los lodos activados, las lagunas de estabilización son los métodos de tratamiento biológico más usados en México. Consiste en ensambles artificiales dispuestos en un terreno natural expuestos al sol y al aire, debe evitarse la infiltración en el subsuelo. De acuerdo a su contenido de oxígeno se clasifican en:

- **Anaerobias:** lagunas que destacan por la ausencia de O_2 , generalmente reciben cargas volumétricas mayores a $100 \text{ g DBO}_5/\text{m}^3\text{d}$ produciendo condiciones anaeróbicas estrictas (Marín & Osés, 2013). Debido a que la temperatura ambiental alta y la intensidad de luz solar son clave para la eficiencia del proceso, este tipo funciona de manera óptima en lugares calientes, tropicales y subtropicales.
- **Facultativas:** contienen una baja carga de materia orgánica superficial que permite el desarrollo de algas, las cuales producen el oxígeno necesario para que las bacterias puedan remover la DBO_5 soluble.
- **Aerobias:** son más profundas que las anteriores (2 a 4.5 m). El oxígeno necesario por los microorganismos para la degradación de la materia orgánica es suministrado artificialmente por aeradores mecánicos. Lo que permite aumentar la carga orgánica y disminuir el tiempo de residencia pero aumentando los costos de operación.

3.3.4 Humedales Artificiales

Los humedales artificiales son una opción ambientalmente favorable frente a los tratamientos convencionales, en México son pocos los casos en que se han construido, figura 3.1. Sin embargo, sus bajos costos de operación, su baja generación de desechos y la alta calidad de su efluentes la hacen una buena opción para el desarrollo hídrico del país (Ramírez et al., 2009)

Los humedales se conforman de un medio filtrante que permite el crecimiento de plantas vasculares; las cuales permiten el flujo de agua e intercambio de nutrimentos y gases a través de sus tejidos; y de microorganismos que se desarrollan tanto en el medio filtrante como en las raíces de las plantas. Por medio de la interacción de dichos componentes es posible la remoción de la materia orgánica disuelta, nutrimentos, EPT, hidrocarburos y microorganismos (Romero, et al., 2009; Luna, et al., 2004).

3.4 Desechos producidos por las plantas de tratamiento

3.4.1 Tratamiento de lodos

Los lodos o biosólidos son residuos producto de la sedimentación de las aguas residuales, y su cantidad depende del proceso empleado para el tratamiento del agua. Se clasifican en función de la etapa en la que fueron generados, es decir, los lodos producto de una sedimentación de etapa primaria serán llamados primarios.

Los lodos primarios, por provenir simplemente de la sedimentación de agua residual cruda, son inestables y putrescibles; constan principalmente de materia fecal y restos de comida; presentan un olor nauseabundo por lo que deben someterse a un tratamiento de estabilización.

Los lodos secundarios, al provenir de una sedimentación posterior a un tratamiento biológico, se encuentran parcialmente descompuestos y presentan un olor no desagradable. Los tratamientos físico-químicos producen lodos de un olor no tan desagradable como los primarios, pero en cantidades tales que resultan difíciles de tratar.

Los tratamientos de los lodos tienen la finalidad de disminuir su cantidad y transformarlos a sólidos más estables e inertes. Los métodos usados para estos fines son:

- **Espesamiento.** Proceso que consiste en concentrar los lodos diluidos para hacerlos más densos.
- **Digestión.** Proceso en el que microorganismos anaerobios destruyen la materia orgánica de los lodos con el fin de estabilizarlos y disminuir su cantidad, produciendo biogás que puede ser utilizado.
- **Secado sobre lecho de arena.** proceso utilizado para llevar la humedad de los sólidos a un valor inferior al 70%.
- **Lavado.** Consiste en lavado de los lodos con efluentes de la planta de tratamiento con el fin de reducir los compuestos amínicos y amoniacaes, disminuyendo así el uso de productos químicos necesarios para el acondicionamiento final de los lodos.

- Acondicionamiento Químico. Consiste en la preparación de los lodos para su disposición final a través de medios químicos. Los productos que pueden ser usados para este fin son H_2SO_4 , alumbre ($KAl(SO_4)_2$), $FeSO_4$, $FeCl_3$ y cal, así como algunos polímeros orgánicos (Barrios, 2009).

3.4.2 Disposición final de los lodos

Los lodos generados por plantas de tratamiento municipales e industriales están clasificados por la norma NOM-52-SEMARNAT-2005 como residuos peligrosos, pues una disposición inadecuada perjudica de manera grave a la atmósfera, aguas subterráneas y a los suelos cercanos al sitio de depósito. Sin embargo, debido a sus características son susceptible de aprovechamiento siempre que cumplan con la norma NOM-004-SEMARNAT-2002, que establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Pese a lo anterior, muchas plantas de tratamiento ni siquiera cuentan con un sistema de manejo de lodos (INECC, 2012), por lo que una gran cantidad de residuos son transportados directamente a rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto o se vierten nuevamente al drenaje.

Entre los diferentes usos que se le pueden dar a los lodos o biosólidos son: generación de biogás a través de la digestión anaerobia de los lodos para la producción de energía (Colmenar, et al., 2015), como mejorador de suelos para campos de cultivo (Ortiz et al., 1995) y para la generación de bioceniza como aditivo para materiales de construcción (James, et al., 2012; Marín et al., 2013).

Actualmente se construyen las plantas de tratamiento sin considerar el tratamiento de los lodos, ya que no es un tema importante en las políticas públicas del manejo de residuos, por lo que terminan convirtiéndose en un problema ambiental y de salud pública (Rojas & Mendoza, 2012). Adicionalmente, salvo por obras de gran envergadura, las plantas de tratamiento no aprovechan la ventaja energética que representan los biosólidos, situación que debe ser inadmisibles para una administración que alega deficiencias en el presupuesto.

La generación promedio de lodos residuales en plantas de tratamiento municipales de México, tomando como referencia los años 2006 a 2011, fue de 232 mil toneladas de los cuales el 75.18% fueron enviados a rellenos sanitarios que en realidad operan como tiraderos a cielo abierto. Únicamente una fracción pequeña de los lodos fue aprovechada como mejoradores de suelo, por lo que los efectos adversos producto del manejo inadecuado de lodos tienden a incrementarse. Actualmente se desconoce la cifra exacta de los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales (Marín & Osés, 2013; INECC, 2012).

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Actualmente, no existe información confiable sobre el funcionamiento de las plantas de tratamiento, ya que los informes, inventarios y demás documentos oficiales presentan información no actualizada, poco precisa, con metodología deficiente y es poco utilizada por los gobiernos para la toma de decisiones.

Los resultados existentes, aunque claramente insuficientes, indican que el 11% de las plantas de tratamiento municipales operan sobre su capacidad, lo que puede sugerir una calidad deficiente del agua tratada; mientras que el 28% de ellas, opera por debajo de su capacidad evidenciando una mala planeación de proyectos y un desperdicio de los recursos públicos. Así mismo, la mayoría de las plantas cuentan con un diseño inadecuado, construcción defectuosa y ubicación inadecuada.

Las políticas relativas al saneamiento de agua han estado enfocadas al tratamiento de agua municipal omitiendo que actualmente la mayor cantidad de agua no tratada descargada en los cuerpos nacionales es de carácter no municipal. Dicha omisión ya ha comenzado a afectar los cuerpos de agua nacionales, ya que haciendo uso del Evaluador del Impacto Ambiental DQO, principal indicador de descargas industriales, la calidad de los cuerpos de agua nacionales es mala, pues cerca del 45% se encuentra contaminada y solo el 20% presenta buena calidad.

Existe información insuficiente sobre la concentración de nitrógeno, fosforo y EPT en los cuerpos de agua. Sin embargo, las concentraciones podrían ser altas, como indican las evidencias presentadas en esta investigación.

Los lodos residuales no son tratados adecuadamente y la mayor parte termina en rellenos controlados o basureros a cielo abierto (75% del total) en donde muchas veces no se cumple con las condiciones de higiene y seguridad representando un problema medioambiental y de salud pública. No obstante, dichos lodos, también son fuente de macro y micro nutrientes por lo que conforman una excelente materia prima para procesos oxidantes que generan composta (mejorador de suelos) o reductores para producción de biogás.

No hay datos suficientes sobre la generación y disposición de los residuos de las plantas de tratamiento de agua industrial.

Recomendaciones

Por lo anterior, es necesario sustituir la política basada en la construcción constante de nuevas plantas de tratamiento por una que dé prioridad a la rehabilitación y mantenimiento, además de favorecer alternativas de menor costo y mayor eficiencia.

Es necesario establecer un sistema de evaluación adecuado, transparente y suficiente para conocer el estado del total de plantas de tratamiento que se encuentren en operación, así como la calidad de sus efluentes. Es importante señalar que un inventario en donde se registren los principales problemas de las plantas de tratamiento; tales como: infraestructura dañada, diseño inadecuado,

construcción defectuosa, mala ubicación, falta de recursos, entre otros; sería una herramienta invaluable que ayudaría a determinar la eficiencia en el uso de recursos para el tratamiento de aguas residuales y ayudaría a retroalimentar los programas futuros.

Se debe implementar un programa de tratamiento para aguas residuales industriales congruente con el crecimiento del país, ya que el número de las plantas que actualmente opera es insuficiente, y no esperar hasta el año 2030 para tomar acciones.

Se recomienda que dentro del grupo de parámetros de control que actualmente se utiliza para determinar la calidad del agua tratada (DBO, SST y DQO), se incluya la concentración de nitratos, fosfatos, y elemento potencialmente tóxicos.

Se debe promover la investigación, construcción y operación de procesos ambientalmente viables con bajos costos de operación, baja generación de desechos y alta calidad de sus efluentes, como lo son los tratamientos naturales de aguas residuales.

Se debe optar por la generación de biogás a partir de los lodos generados por los procesos de saneamiento para satisfacer parte de las necesidades energéticas de las plantas o de las comunidades cercanas a ellas, con el fin de reducir costos de operación, disminuir la cantidad de desechos y obtener el apoyo de la comunidad. Así mismo, se debe incentivar las diferentes aplicaciones de los biosólidos con el fin de que se evite su almacenamiento en rellenos sanitarios.

Bibliografía

Citada

- Aboites, Cifuentes, Jiménez, & Torregrosa. (2008). *Agenda del Agua*. México: Academia Mexicana de Ciencias.
- Babbitt, H., & Robert, B. (1983). *Alcantarillado y Tratamiento de Aguas Negras*. México: Continental.
- Banco Mundial. (13 de noviembre de 2015). *the World Bank Group*. Obtenido de <http://datos.bancomundial.org/indicador>
- Barrios, J. (4 de Diciembre de 2009). *Aspectos Generales del Manejo de Lodos*. Obtenido de Academia de Ingeniería México: <http://www.ai.org.mx/ai/archivos/talleres/aprovechamiento-lodos/Aspectos%20Generales%20del%20Manejo%20de%20Lodos.pdf>
- CNN Expansión. (20 de agosto de 2015). La Inversión Extranjera Directa a México Crece 135% Anual. Ciudad de México, México.
- Colmenar; Zarzuelo; Borge; García. (2015). Thermodynamic and exergoeconomic analysis of energy recovery system of biogas from a wastewater treatment plant and use in a Stirling engine. *Elsevier*, 88, 171-174.
- Conagua . (2011). *Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Mexico, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Conagua. (2011). *Agenda del Agua 2030*. México, D.F.: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Conagua. (2014). *Diagnóstico del Programa U031 Operación y Mantenimiento en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales*. México, D.F: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Conagua. (2014). *Estadísticas del Agua en México*. México, D.F.: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales .
- Conagua. (2014). *Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento*. México, D.F.: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales .
- Conagua. (12 de Noviembre de 2015). *Sistema Nacional de Información del Agua*. Obtenido de Comision Nacional del Agua: <http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=60&n3=60>
- De la Peña, M., Ducci, J., & Zamora, V. (2013). *Tratamiento de Aguas Residuales en México*. Mexico D.F.: Banco Interamericano de Desarrollo.

- Dpto. de Sanidad del Edo. de Nueva York. (1967). *Manual de Tratamiento de Aguas Negras*. Mexico: Limusa.
- Escobedo, D. (Junio de 2010). Diagnóstico y Descripción del Proceso de Eutrofización en Lagunas Costeras del Norte de Sinaloa. *Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias Marinas*. La Paz, B.C.S., México: Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del Instituto Politécnico Nacional.
- Figueroa, B. (2008). *EL Dato en Cuestión, Un Análisis de las Cifras Sociodemográficas*. México: Colegio de México.
- Freund, J., & Simon, G. (1994). *Estadística Elemental*. México: Prentice-Hall Hispanoamericana.
- Gaucín, & Garrido. (2013). El Mercado de los Fertilizantes 2011-2012. *Claridades Agropecuarias, Edición Especial XX aniversario*, 45-48.
- Gomez, A., Villalba, A., Acosta, G., & Castañeda, M. (2004). Metales Pesados en el Agua Superficial del Río San Pedro Duarte 1997 y 1999. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 5-12.
- Hernández, K. (Septiembre de 2011). Determinación de la Eutrofización en el Lago del Parque las Etnias de la Ciudad de Torreón, Coahuila. *Tesis para obtener el título de Ingeniero en Procesos Ambientales*. Torreón, Coahuila, México: Universidad Autónoma Agraria, División de Carreras Agronómicas.
- Herrera, Morales, & Cortés. (Diciembre de 2011). Eutrofización en los Ecosistemas Costeros del Golfo de México. V.1. Semarnat- NOAA-GEF-UNIDO.
- INE. (1997). *Avances en el Desarrollo de Indicadores para la Evaluación del Desempeño Ambiental en México*. 1997: Instituto Nacional de Ecología .
- INECC. (2012). *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- INEGI. (15 de febrero de 2016). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía* . Obtenido de Indicador Mensual de Actividad Industrial:
<http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/cn/ai/>
- James, Tring, Helle, & Ghuman. (2012). Ash Management Review-Applications of Biomass Bottom Ash. *Energies*, 5, 3856-3873.
- Lango, Landeros, & Castañeda. (2010). Bioaccumulation of Cadmium, Lead and Arsenic in *Crassostrea Virginica*, From Tamiahua Lagoon System, Veracruz, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 26(3), 201-210.
- Lara, Ventura, Ehsan, Rodríguez, Vargas, & Landero. (2015). Contenido de Cd y Pb en Suelo y Plantas de diferentes cultivos Irrigados con aguas Residuales en el Valle de Mezquital, Hidalgo, México. *Revista internacional de Contaminación Ambiental*, 31(2), 127-132.
- Ley de Aguas Nacionales. (1992). (última reforma publicada DOF 24-03-2016). México: Camara de Diputados del H. Congreso de la Unión.

- Luna, V., & Aburto, S. (2014). Sistema de Humedales Artificiales para el Control de la Eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 17(1), 32-55.
- Luna, V., & Ramirez, H. (2004). Medios de Soporte Alternativos para la Remoción de Fósforo en Humedales Artificiales. *Revista Internacional contaminación Ambiental*, 31-38.
- Madigan, M., Martinko, J., Dunlap, P., & Clark, D. (2009). *Brock Biología de los Microorganismos*. Madrid, España: Pearson.
- Mancilla, Ortega, Ramírez, Uscanga, Ramos, & Reyes. (2012). Metales Pesados Totales y Arsénico en el Agua para Riego de Puebla y Veracruz, México. *Revista Internacional Contaminación Ambiental*, 28(1), 39-48.
- Marín, A., & Osés, M. (2013). *Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales con el Proceso de Lodos Activados (Tomo I)*. Jalisco, Guad. México: Comisión Estatal de Agua de Jalisco.
- Marín, A., & Osés, M. (2013). *Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales con el Proceso de Lodos Activados (Tomo II)*. Jalisco, Guad. México: Comisión Estatal de Agua de Jalisco.
- Maskew, G., Geyer, J., & Okun, D. (1976). *Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales (Volumen II)*. México: Limusa.
- Morgan, J., & Benítez, V. (2016). Análisis del estado de las plantas de tratamiento de aguas residuales en la República Mexicana. Instituto de Ingeniería de la UNAM.
- NMX-AA-012-SCFI. (2001). Determinación de Oxígeno Disuelto en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas.
- NMX-AA-028-SCFI. (2001). Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en Aguas Naturales, Residuales (DBO5) y Residuales Tratadas.
- NMX-AA-030/1-SCFI. (2012). Medición de la Demanda Química de Oxígeno en Aguas Naturales, Residuales y Residuales tratadas. .
- NMX-AA-034-SCFI. (2001). Determinación de Sólidos y Sales Disueltas en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas. Secretaría de Economía.
- NOM-001-SEMARNAT. (6 de enero de 1996). Establece los Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en las Descargas de Aguas Residuales en Aguas y Bienes Nacionales.
- NOM-002-SEMARNAT-1996. (3 de junio de 1998). Establece los límites Máximos Permisibles de Contaminantes en las Descargas de Agua Residuales a los Sistemas de Alcantarillado Urbano o Municipal.
- NOM-003-SEMARNAT. (21 de Septiembre de 1997). Establece los Límites Máximos Permisibles de Contaminantes para las Aguas Residuales Tratadas que Se Reusen en Servicios al Público.

- NOM-004-SEMARNAT. (2002). Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.
- NOM-052-SEMARNAT. (2005). Que Establece las Característica, el Procedimiento de Identificación, Clasificación y los Listados de los Residuos Peligrosos.
- NOM-052-SEMARNAT. (2005). Que Establece las Características, el Procedimiento de Identificación, Clasificación y los Listados de los Residuos Peligrosos.
- Ortiz, L., Gutiérrez, M., & Sanchez, E. (1995). Propuesta de Manejo de los Lodos Residuales de la Planta de Tratamiento de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca, Estado de Morelos, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 11, 105-115.
- Oxford Business Group. (26 de febrero de 2015). Mexico's Industry Poised for Growth.
- Perevochtchikiva, M. (2009). Situación Actual del Sistema de Monitoreo Ambiental en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Estudios demográficos y Urbanos*, 24(3), 513-574.
- Perevochtchikiva, M. (2013). La Evaluación del Impacto Ambiental y la Importancia de los Indicadores Ambientales. *Gestión y Política Pública, Volumen XXII, Numero 2*, 283-312.
- Programa Nacional de Infraestructura 2014-2018. (4 de Noviembre de 2015). Mexico: Presidencia de la República. Obtenido de de la página Gobierno de la República: <http://presidencia.gob.mx/pni/consulta.php?c=1>
- Ramírez, Luna, & Arredondo. (2009). Evaluación de un Humedal Artificial de Flujo Vertical Intermitente, Para Obtener Agua de Buena Calidad para la agricultura. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 93-99.
- Riffat, R. (2013). *Fundamentals of Wastewater Treatment and Engineering*. United States of America: CRC Press Taylor & Francis Grup.
- Rodríguez, & Durán. (2006). Remoción de Nitrógeno en un Sistema de Tratamiento de Aguas Usando Humedales Artificiales de Flujo Vertical a Escala de Banco. *Tecnología y Ciencia*, 21(1), 25-33.
- Rojas, & Mendoza. (2012). Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México. *Producción + Limpia*, 7(2), 74-94.
- Romero, Colín, & Sánchez, O. (2009). Tratamiento de Aguas Residuales por un Sistema Piloto de Humedales Artificiales: Evaluación de la Remoción de la Carga Orgánica. *Revista Internacional Contaminación Ambiental*, 25(3), 157-167.
- Romero, J. (2005). *Calidad del Agua* (Segunda Edición ed.). Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero, José. (2012). Inversión Extranjera Directa y Crecimiento Económico en México: 1940-2011. *Investigación económica*, 71(282), 109-147.
- Russel, D. L. (2012). *Tratamiento de Aguas Residuales, Un enfoque Práctico*. Barcelona, España: Reverté.

- Secretaría de Economía. (9 de febrero de 2016). Inician Talleres para Dar a Conocer el Fondo Nacional Emprendedor 2016. Ciudad de México, México.
- Semarnat. (6 de enero de 2016). *Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Obtenido de Indicadores Básicos del Desempeño Ambiental de México:
http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/indicadores14/conjuntob/02_agua/02_calidad_esquema.html
- Siebe. (1994). Acumulación y Disponibilidad de Metales Pesados en Suelos Regados con Aguas Residuales en el Distrito de Riego 03, Tula, Hidalgo, México. *Revista Internacional Contaminación Ambiental*, 10(1), 15-21.
- Sodhi, G. S. (2005). *Fundamental Concepts of Environmental Chemistry* (Second ed.). India: Alpha Science International.
- UNESCO. (2003). *Agua para Todos Agua para la Vida*. España: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
- Valdés, & Cabrera. (1999). *La Contaminación por Metales Pesados en Torreón, Coahuila, México*. Torreón Coahuila, México: Texas Center for Policy Studies.
- Villanueva, S., & Botello, A. (1992). Metales Pesados en la Zona Costera del Golfo de México y Caribe Mexicano: Una Revisión. *Contaminación Ambiental*, 47-61.
- Weiner, E. (2013). *Application of Environmental Aquatic Chemistry* (third ed.). United States of America: CRC press Taylor & Francis Group.
- Yáñez, F. (190¿?). *Criterios par la Selección de Procesos de Tratamiento de Aguas Residuales*. Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

Consultada

- Conagua. (2008). *Estadísticas del Agua en México*. México, D.F.: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales .
- Conagua. (2010). *Estadísticas del Agua en México*. México, D.F.: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales .
- Conagua. (2011). *Estadísticas del Agua en México*. México, D.F.: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales .
- Conagua. (2012). *Estadísticas del Agua en México*. México, D.F.: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales .
- Conagua. (2013). *Estadísticas del Agua en México*. México, D.F.: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales .

- Conagua. (2013). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*. México D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Fentanes, A. (20??). *Proyecto P.T.A.R. San Cristobal de las Casas Chiapas. Memoria Descriptiva de Cálculo Funcional y Factibilidad Técnica*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: Servicios de Ingeniería Aplicada S.A. de C.V.
- Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C. (2006). *El Agua en México: Lo que Todos y Todas Debemos Saber*. Obtenido de Centro Mexicano de Derecho Ambiental A.C.: www.agua.org.mx
- GrupoFórmula. (24 de Marzo de 2015). Inaugura Peña Nieto Planta de Tratamientos Residuales Tuchtlán. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
- NVC Noticias. (30 de enero de 2015). Por Fin Cuenta Bahía de Banderas con Planta de Tratamiento de Aguas Negras. Bahía de Banderas , Nayarit, Mexico .
- Semarnat. (2010). *Indicadores Básicos del Desempeño Ambiental de México*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Semarnat. (2013). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, Compendio de Estadísticas Ambientales, Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental*. México D.F. : Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Apéndice I. Análisis estadístico de las plantas de tratamiento reportadas en el anexo 3 del inventario SSAPDS

Las plantas de tratamiento reportadas en el anexo 3 del inventario SSAPDS presentan un promedio del %UCI = 65.73 con una desviación estándar de $s = 27.67$. Se descartaron plantas de tratamiento que se encontraran fuera de operación.

Se utilizó el teorema de la media de la distribución muestral de \bar{x} , el cual dice que si $\sigma_{\bar{x}}$ (error estándar de la media) es baja, la media de la muestra se aproximará a la media de la población (Freund & Simon, 1994). $\sigma_{\bar{x}}$ Se calcula:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{N-n}{N-1}}$$

Ecuación A.1

Donde:

$\sigma_{\bar{x}}$: Es el error estándar de la media.

σ : Desviación estándar de la población. Se aproximará el valor a la desviación estándar de la muestra $s=27.67$.

N: número de datos de la población, 2287.

n: número de datos de la muestra, 1060.

Sustituyendo los valores, obtenemos que el error estándar de la media es bajo, con un valor de $\sigma_{\bar{x}} = 0.62$, por lo que podemos considerar que el promedio de la muestra, %UCI = 65.73, se acerca al promedio de la población. Para obtener el error a dicha aproximación, es necesario, el teorema del límite central, que se aplica cuando nuestros datos presentan una distribución normal, y para muestras finitas, cuando n es grande y la relación entre n/N es pequeña.

Los valores de %UCI obtenidos de la muestra del anexo 3 del SSAPDS presentan una distribución normal, ver figura A.1, por lo que usando el teorema del límite central tenemos que:

$$z = \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma_{\bar{x}}}$$

Ecuación A.2

Donde:

Z: El número de desviaciones estándar por encima o por debajo de la media de la distribución en el que se desvía el valor correspondiente a la media de la muestra.

$\bar{x} - \mu$: Diferencia entre la media de la muestra y la media de la población.

$\sigma_{\bar{x}}$: Error estándar de la muestra. $\sigma_{\bar{x}} = 0.62$ (Obtenido de la ecuación A.1)

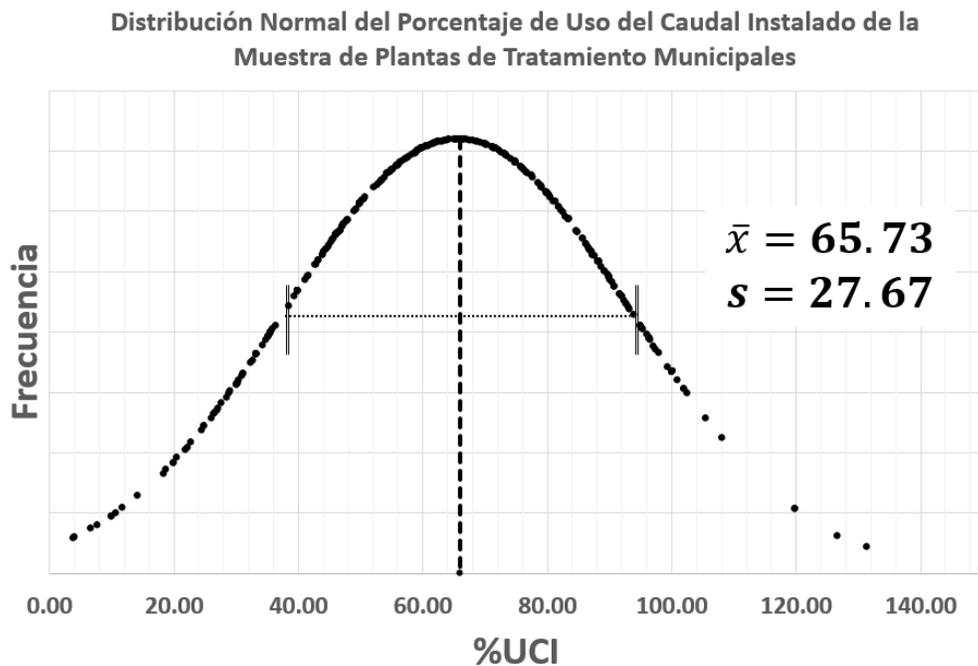


Figura A. 1. Distribución normal de los valores de %UCI de la muestra de plantas de tratamiento obtenido del anexo 3 del inventario SSAPDS.

Para calcular la probabilidad de que el error del %UCI media de la muestra sea menor al 2 por ciento de la media de la población; se debe sustituir $\bar{x} - \mu$ por 2 y $\sigma_{\bar{x}}$ por 0.62, calculado arriba; ahora, sustituyendo los valores, obtenemos un valor de $z = 3.0769$. Con este valor, se consulta una tabla de áreas de la curva normal para obtener la probabilidad asociada al valor de z , el cual es 0.4990;

multiplicando éste valor por dos, ya que la tabla de los valores de la curva normal ofrecen datos de la mitad de la curva, se obtiene la probabilidad de que el error entre el promedio del %UCI de la muestra y de la población sea menor al 2%. Dicha probabilidad es de 0.9978, es decir, una confianza de la media muestral del 99.78%.

Ahora, podemos usar la curva normal; la desviación estándar de la población aproximada a la de la muestra; la media de la población; la ecuación A.3; y una tabla de áreas de la curva normal, para obtener el porcentaje de plantas de tratamiento municipales que pertenecen a las siguientes categorías: Subutilizadas, Plantas de tratamiento cuyo %UCI es menor al 50%; Excedidas, aquellas en las que su %UCI es mayor al 100% y, en intervalo; plantas cuyo %UCI se encuentre entre el 50% y el 100%.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Ecuación 2.3

Donde

- X: Cualquier valor del %UCI
- μ : La media del %UCI de la población, aproximada a la media de la muestra $\bar{x}=65.73$.
- σ : La desviación estándar de la población, aproximada a la desviación estándar de la muestra $s=27.67$.

Los resultados obtenidos son los siguientes: plantas subutilizadas: 28.43%, Plantas excedidas en su capacidad: 10.75% y las plantas que se encuentran en el

rango de 50% a 100%: 60.82%. En la figura 1.5 se presentan los resultados de forma gráfica.

Los valores anteriores presentan un error debido a que la curva normal contempla probabilidades de que existan plantas con un %UCI de cero o valores negativos, cosa que está demás decir que es incorrecto. El error mencionado es del 0.89%, por lo que no es necesario realizar una corrección de datos o usar otra curva de distribución diferente a la normal debido a que para alcanzar un valor negativo del %UCI se debe tener un desfase de la media de más de dos veces la desviación estándar.