



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE CIENCIAS

**SANEAMIENTO DESCENTRALIZADO: UNA PROPUESTA ANTE LA
PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DEL RÍO MAGDALENA, CDMX, MÉXICO.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIOLÓGA

P R E S E N T A:

CYNTHIA PRISCILLA SÁNCHEZ SANTILLÁN

**DIRECTOR DE TESIS Y
COTUTOR:**

Dra. ALMA CONCEPCIÓN CHÁVEZ MEJÍA

Dr. RAFAEL MAGAÑA LÓPEZ



**FACULTAD DE CIENCIAS
UNAM**

Ciudad Universitaria, CDMX, 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

AGRADECIMIENTOS ACADÉMICOS

Agradezco a mi tutora la Dra. Alma Concepción Chávez Mejía y a mi cotutor el Dr. Rafael Magaña López por su contribución, consejos, apoyo y guía en este camino, así como a todo el equipo conformado por la Dra. Alma del Laboratorio de Ingeniería Ambiental que me asesoraron durante mi estancia y mi proceso de titulación.

Al programa de la SECTEI (Secretaría de Educación, Tecnología, e Innovación de la Ciudad de México), en particular al proyecto con número de convenio 9216c19, y con título: “Mejoramiento de los Procesos de Potabilización y Tratamiento de Agua Residual y Uso de Tecnologías Descentralizadas en los 21 Proyectos de Regulación como Estrategia Auxiliar para el Aseguramiento Hídrico del Río Magdalena”, por su apoyo de beca.

A la Dra. Marisa Mazari Hiriart, al Dr. Eduardo Cejudo Espinosa y al Mtro. M. Antonio Tapia Palacios por su ayuda y apoyo para este proyecto.

DEDICATORIAS

Quiero dedicar este trabajo a mi mamá, Lourdes, una mujer admirable y que amo, hoy ya no estás presente físicamente, pero sé que lo estás en alma. Gracias por creer en mí y ayudarme a perseguir mis sueños, por nunca soltarme y estar conmigo en todos mis momentos.

A mi papá Ricardo, mi gran guía y amigo que me acompaña en este viaje, gracias por tus apapachos y consejos, por creer en mí y estar orgulloso de lo que soy y seré. Te amo papá.

A mi hermano Octavio por compartirme de su enorme luz, consejos y apoyo. Por estar conmigo cuando menos me sentí capaz.

A mis amigos y compañeros de vida, Melisa, Alpha, Erick, Vanessa y Daniel por acompañarme en esta vida y no dejarme sola. Los quiero mucho, espero seguir compartiendo con ustedes gratos momentos e infinitos recuerdos.

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
1.INTRODUCCIÓN.....	3
2. MARCO CONCEPTUAL.....	11
2.1 Definición de saneamiento.....	11
2.2. Saneamiento de agua residual descentralizado.....	12
2.3. Saneamiento de agua residual centralizado.....	15
2.4. Comparación entre sistemas centralizados vs descentralizados.....	18
2.4.1. Perspectiva nacional del saneamiento de agua residual.....	23
2.4.2. Proceso de saneamiento de aguas residuales municipales en zonas urbanas y rurales de México.....	26
2.4.3. Saneamiento de aguas residuales municipales en la Ciudad de México.....	29
2.4.4. Saneamiento de aguas residuales en la Alcaldía La Magdalena Contreras.....	35
2.5. Descripción de la zona de estudio en términos socio-económicos y su relevancia en el saneamiento.....	35
2.5.1. Actividades económicas y tasa de empleo.....	35
2.5.2. Grado de desarrollo social en la zona y saneamiento.....	37
3. Procesos de saneamiento de aguas residuales municipales, ventajas y desventajas.....	39
4. Humedales Artificiales.....	56
4.1. Definición de Humedales Artificiales.....	56
4.2. La Sostenibilidad y los Humedales Artificiales.....	58
4.3. Humedales artificiales para tratamiento de agua residual doméstica.....	59
4.3.1. Humedales Artificiales de flujo superficial.....	59
4.3.2. Humedales Artificiales de flujo sub-superficial.....	61

4.3.2.1. Humedal Artificial de flujo sub-superficial horizontal.....	61
4.3.2.2. Humedal Artificial de flujo sub-superficial vertical.....	62
4.4. Mecanismos de remoción de nutrientes en humedales artificiales para tratar agua residual doméstica.....	64
4.5. Principales ventajas y desventajas de los humedales artificiales en comparación con las lagunas de estabilización.....	70
5. Descripción de la zona de estudio para implementar el humedal artificial.....	72
5.1. Clima.....	74
5.2. Hidrología.....	74
5.3. Edafología.....	75
5.4. Vegetación.....	77
6. OBJETIVOS.....	78
6.1. Objetivo General.....	78
6.2. Objetivos Particulares.....	78
7. ALCANCES.....	79
8. MÉTODO.....	79
8.1. Etapa I. Caracterización del agua residual.....	81
8.1.2. Obtención de información y datos de calidad del agua residual.....	83
8.2. Etapa II. Identificación del uso potencial en la zona.....	89
8.3. Selección de la tecnología descentralizada.....	90
8.4. Etapa III. Diseño conceptual del Humedal Artificial.....	92
8.4.1. Selección del sitio.....	92
8.4.2. Diseño del Humedal Artificial.....	94
8.4.2.1 Modelos de diseño.....	95
8.4.2.2. Parámetros de diseño	98
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	101
9.1. Caracterización del agua residual. Relación DBO ₅ /DQO.....	109

9.1.2. Obtención de información y datos de calidad de agua residual.....	104
9.1.2.1. Evaluación estadística de la calidad del agua.....	104
9.2. Identificación del uso potencial del agua residual tratada en la Alcaldía La Magdalena Contreras.....	121
9.3. Selección de la tecnología descentralizada.....	124
9.4. Diseño conceptual del Humedal Artificial.....	132
9.4.1. Selección del sitio.....	132
9.4.2. Diseño Hidráulico.....	139
10. CONCLUSIONES.....	143
REFERENCIAS.....	145
ANEXO I.....	163
ANEXO II.....	166

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Antecedentes del análisis de calidad del agua en la Cuenca del Río Magdalena.....	5
Tabla 2. Antecedentes del empleo de humedales artificiales para tratar agua residual doméstica en México.....	9
Tabla 3. Ventajas y desventajas del saneamiento centralizado vs descentralizado (CONAGUA, 2019).....	20
Tabla 4. Caudal de aguas residuales municipales tratadas por entidad federativa hasta el 2019 (CONAGUA, 2021).....	27
Tabla 5. Plantas de Tratamiento de Agua Residual municipal en la CDMX (CONAGUA, 2021).....	31
Tabla 6. Índice de Desarrollo Social. Programa Provisional de Gobierno 2019-2020 (Alcaldía La Magdalena Contreras, 2020).....	38
Tabla 7. Principales ventajas y desventajas de las lagunas de estabilización. (CONAGUA, 2019).....	43
Tabla 8. Principales ventajas y desventajas del RAFA (Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente). (Romero-Rojas, 2004; Tilley <i>et al.</i> , 2018; CONAGUA, 2019).....	46

Tabla 9. Principales ventajas y desventajas de las lagunas de estabilización. (Rosales-Escalante, 2005; OPS/CEPIS, 2005; Adegoke y Stenström, 2019).....	49
Tabla 10. Principales ventajas y desventajas de los Tanques Imhoff (Lazcano-Carreño, 2016).....	51
Tabla 11. Ventajas y desventajas de filtros biológicos. (Lazcano-Carreño, 2016; CONAGUA, 2019).....	53
Tabla 12. Principales ventajas y desventajas de los discos biológicos. (CONAGUA, 2019).....	55
Tabla 13. Servicios Ecosistémicos que brindan los humedales artificiales.....	59
Tabla 14. Principales mecanismos de remoción de nutrientes en humedales artificiales (Vymazal, 2008; Stefanakis <i>et al.</i> , 2014).....	64
Tabla 15. Ventajas y limitaciones de humedales artificiales para tratar agua residual doméstica.....	71
Tabla 16. Definición de DBO ₅ y DQO (Von Sperling, 2014, citado en TECNAL, 2022).....	82
Tabla 17. Parámetros asociados a agua residual doméstica (Metcalf y Eddy, 2004).....	87
Tabla 18. Eficiencia de remoción en dos humedales plantados con <i>Phragmites australis</i> con medio filtrante a base de grava. (Cooper, 1999; Stefanakis <i>et al.</i> , 2014; Abdelhakeem <i>et al.</i> , 2016 y López <i>et al.</i> , 2016).....	95
Tabla 19. Parámetros y criterios de diseño (USEPA, 2000).....	100
Tabla 20. Promedio de la relación DBO ₅ /DQO para los años 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019.....	101
Tabla 21. Metales pesados analizados de la PTAR Magdalena Contreras.....	103
Tabla 22. Minerales asociados a fuentes del ramo industrial y LMP dispuesto en la NOM-127-SSA1-1994 (DOF,1995) (Metcalf y Eddy, 2004).....	108
Tabla 23. Clasificación de las actividades económicas siguiendo ambas referencias. (INEGI, 2019; SEDEMA,2016).....	124
Tabla 24. Criterios seleccionados para la tecnología de saneamiento descentralizado.....	125
Tabla 25. Matriz para selección del sitio de implementación.....	137
Tabla 26. Parámetros físico-químicos del 2014-2019.....	163

Tabla 27. Dimensionamiento de humedal artificial a partir del cálculo obtenido de las ecuaciones presentadas.....170

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Saneamiento centralizado en el ciclo de agua urbano. Modificado de Marsalek <i>et al.</i> , 2008.....	Error! Bookmark not defined.
Figura 2. Porcentaje de muertes atribuidas a un saneamiento inseguro a nivel mundial. Un saneamiento seguro es aquel que está libre de contaminación química o microbiológica; además de ser accesible (Ritchie y Rose, 2021).....	17
Figura 3. Cobertura nacional alcanzada por el servicio de saneamiento y tratamiento de agua residual en el periodo de 1990-2020. URB-urbano, RUR-rural, TAR- Tratamiento de agua residual (CONAGUA, 2021).....	24
Figura 4. Agua residual que se trata y se genera a nivel nacional (Mazari-Hiriart y Noyola-Robles, 2018).....	25
Figura 5. Número Total Nacional de Tecnologías descentralizadas instaladas. (CONAGUA, 2021).....	29
Figura 6. Proceso convencional de lodos activados en una PTAR (CONAGUA, 2019; Tilley <i>et al.</i> , 2018).....	40
Figura 7. Esquema de los tres tipos de laguna de estabilización: 1. Anaeróbica, 2. Facultativa y 3. Aeróbica o de Maduración (Tilley <i>et al.</i> , 2018).....	41
Figura 8. Procesos que se llevan a cabo en un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA) (CONAGUA, 2019).....	45
Figura 9. Partes que conforman a un tanque séptico (Tilley <i>et al.</i> , 2018).....	48
Figura 10. Partes que conforman un Tanque Imhoff (Tilley <i>et al.</i> , 2018).....	50
Figura 11. Partes que conforman un filtro biológico (Tilley <i>et al.</i> , 2018).....	52
Figura 12. Esquema de un sistema de discos biológicos con sedimentador secundario (Menéndez-Gutiérrez y Dueñas-Moreno, 2020).....	54
Figura 13. Clasificación de los distintos tipos de humedales. (Brix, 1993; Brix, 2003; Nikolić <i>et al.</i> , 2009; Vymazal, 2008a; Vymazal 2008b; Vymazal, 2008c; Vymazal, 2010; Vymazal, 2018; Kumar y Dutta, 2019).....	57
Figura 14. Ilustración de un humedal artificial de flujo superficial (Stefanakis, 2014).....	62

Figura 15. Ilustración de un humedal artificial de flujo sub-superficial horizontal (Stefanakis, 2014).....	63
Figura 16. Ilustración de un humedal artificial de flujo sub-superficial vertical (Stefanakis, 2014).....	63
Figura 17. Transformación clásica del nitrógeno en los humedales artificiales (Saeed y Sun, 2012).....	67
Figura 18. Ubicación de la Alcaldía La Magdalena Contreras, CDMX. Elaboración propia.....	73
Figura 19. Esquema de la estrategia del trabajo.....	80
Figura 20. Mapa de la planta de tratamiento Magdalena Contreras, CDMX. Elaboración propia.....	93
Figura 21. Tratamiento primario; eliminación de grasas y aceites y otros residuos (Fotografías: Álvarez-Marmolejo; Molina-Valencia y Ruiz-Velázquez).....	106
Figura 22. Tratamiento secundario; proceso biológico a través de lodos activados y sedimentadores (Fotografías: Álvarez-Marmolejo; Molina-Valencia y Ruiz-Velázquez).....	107
Figura 23. Tratamiento terciario, desinfección por rayos UV (Fotografías: Álvarez-Marmolejo; Molina-Valencia y Ruiz-Velázquez).....	107
Figura 24. a) Media de los valores de Grasas y aceites, la línea roja indica el Límite Máximo Permisible (LPM) de la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997) y el Límite Máximo Permisible (LMP) de la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1998) (Contacto Directo= CD; Contacto Indirecto= CI); b) Valores máximos y mínimos de Grasas y aceites.....	110
Figura 25. a) Media de los valores de DBO ₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno), la línea roja indica el Límite Máximo Permisible (LPM) de la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997), la línea azul claro y azul marino el Límite Máximo Permisible (LMP) de la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1998) (Contacto Indirecto= CI; Contacto Directo= CD), respectivamente; b) Valores máximos y mínimos de la DBO ₅	112
Figura 26. a) Media de los valores de Sólidos Suspendidos Totales (SST), la línea roja indica el Límite Máximo Permisible (LPM) de la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997), la línea azul caro y azul marino indican el Límite Máximo Permisible (LMP) de la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1998) (Contacto Indirecto= CI; Contacto Directo= CD), respectivamente; b) Valores máximos y mínimos de Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	113
Figura 27. a) Media de los valores de Sólidos sedimentables, la línea roja indica el Límite Máximo Permisible (LPM) de la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997); b) Valores máximos y mínimos de Sólidos sedimentables (Ssed).....	115

Figura 28. a) Media de los valores de Nitrógeno Total (N total), la línea roja indica el Límite Máximo Permisible de la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997); b) Valores máximos y mínimos de Nitrógeno Total (N total); c) Valores máximos y mínimos de Nitritos (NO_2^-); d) Valores máximos y mínimos de Nitratos (NO_3^-).....117

Figura 29. a) Media de los valores de Fósforo Total (P total), la línea roja indica el Límite Máximo Permisible de la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997); b) Valores máximos y mínimos de Fósforo Total (P total).....118

Figura 30. a) Media de los valores de Coliformes fecales, la línea azul claro y azul marino indican el Límite Máximo Permisible (LPM) de la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1998) (Contacto Indirecto= CD; Contacto Directo= CI); b) Media de los valores de Coliformes totales.....120

Figura 31. Unidades Económicas por sector en la Alcaldía La Magdalena Contreras (Fuente: INEGI, 2019).....123

Figura 32. a) Laguna de estabilización en Florida, EEU.UU., b) Humedal artificial en Xochimilco, México.....131

Figura 33. Ubicación de las Propuestas; A) Alimentación del Río Magdalena en la segunda sección de los Dinamos en diferentes puntos; B) Alimentación proveniente de una vivienda ubicada en el Segundo Dinamo; C) Alimentación proveniente de una vivienda correspondiente a alguna de las zonas comprendidas por el proyecto de zonas no consolidadas (Cazulco (C1), Oxoyuca (C2), o Tierra Colorada (C3); D) Alimentación proveniente de la PTAR Magdalena Contreras.....133

Figura 34. Ubicación del sitio propuesto para implementar el Humedal Artificial.....138

Figura 35. Diseño del Humedal de Flujo Sub-superficial Horizontal.....141

Figura 36. Saneamiento descentralizado a base de un HAFSS con uso potencial en sanitarios y descarga al Río Magdalena.142

RESUMEN

El Río Magdalena es considerado el último “río vivo” de la Ciudad de México, es uno de los cuerpos de agua superficiales que dota agua de primer uso a los habitantes, además de proveer diversos servicios ecosistémicos tales como, la infiltración de agua al subsuelo, espacio recreativo, regulación de clima, por mencionar algunos. No obstante, a pesar de los esfuerzos del gobierno de la Ciudad de México y grupos académicos, su preservación aún se encuentra amenazada. Es por eso que, en este trabajo se realizó una propuesta conceptual saneamiento descentralizado a nivel terciario. Lo anterior, considerando la potencialidad e impacto positivo que este tipo de sistemas pueden brindar a la comunidad de la Alcaldía La Magdalena Contreras, entre ellos, mejoramiento del espacio urbano y calidad de agua, uso potencial en riego de áreas verdes y uso en sanitarios. Se consideraron tres etapas para llevar a cabo este estudio. En la primera, se caracterizó el agua residual de la Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) Magdalena Contreras mediante una serie de parámetros expuestos en Metcalf y Eddy (2004) tales como aniones y cationes. Los datos de la calidad de agua fueron obtenidos de una base de datos histórica del año 2014-2019 obtenida de la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México (SECTEI). Se utilizó con el fin de determinar las características que prevalecen en el sitio en el cual se desea implementar la tecnología. En la segunda etapa, se identificó el uso potencial de agua residual tratada en la zona mediante la búsqueda de información del último censo económico del INEGI (2020) para identificar qué sector económico prevalece en la zona y su relación con el flujo de agua residual. Con base en lo expuesto por la SEDEMA (2016), se asignaron cuatro atributos de acuerdo al flujo de agua residual (L/s) producida por el sector económico revisado; se asignó el uso potencial con base en lo siguiente: a) Requerimiento bajo (0.02-1.60 L/s), Requerimiento medio-bajo (1.01-7.50), Requerimiento medio (7.51-25.00 L/s) y Requerimiento alto (25.01-71.76 L/s). El

sector “Servicios” fue el que presentó mayor flujo de agua residual en la zona. Se propone entonces, que el uso potencial sea en sanitarios, riego de áreas verdes o descarga del agua tratada al río Magdalena. Finalmente, en la tercera, se designó el 1) sitio y 2) la tecnología descentralizada que mejor se acopla a la zona de estudio con base en una matriz de beneficios fundada en cinco características: 1) Filosofía del lugar, 2) Mejoramiento del espacio urbano, 3) Seguridad del sistema, 4) Racionalidad ambiental y 5) Cercanía con la comunidad; para el segundo fueron tres criterios: 1) Factibilidad económica, 2) Factibilidad ecológica y 3) Factibilidad social. El sitio que se propone para implementación del sistema es el “Foro Cultural Magdalena Contreras y el humedal de flujo subsuperficial horizontal fue el sistema descentralizado que se acopla al sitio. Con la presente propuesta se busca que las ecotecnias a base de humedales artificiales sean una alternativa sostenible a la tecnología convencional para el saneamiento del Río Magdalena.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el 55% de la población vive en las ciudades. Para el 2050, se estima que la población urbana actual se duplicará, es decir, siete de cada diez personas habitarán en una ciudad (Banco Mundial, 2020a). La creciente demanda de la densidad poblacional en zonas urbanas aumenta la presión sobre los recursos naturales causando la degradación ambiental de los ecosistemas, en particular, de los ríos y lagos (Marsalek *et al.*, 2014). Los ríos forman parte del ciclo hidrológico urbano porque funcionan como abastecimiento de agua para la población, regulan el clima, la erosión, sirven como refugio de animales y captan agua proveniente de otras fuentes (Marsalek *et al.*, 2014; Mazari *et al.*, 2014). La problemática ambiental prevalente se relaciona con la explotación y a la contaminación principalmente con descargas directas de aguas residuales sin tratamiento previo (Shukla *et al.*, 2013; Marsalek *et al.*, 2014; Vammen, 2015; McGrane, 2016). En Latinoamérica, dichos hechos, se deben a: 1) Las actividades antropogénicas, principalmente de la actividad agrícola y minera; en el caso de México, el 77% volumen del agua disponible es concesionada a la actividad agrícola, de los cuales el 40% proviene de los ríos, mientras que el 17.7% se destina a la minería (CONAGUA, 2018; Observatorio Económico Latinoamericano [OBELA], 2021) y 2) Falta de infraestructura para tratar aguas residuales; en Latinoamérica se estima que, solo entre el 30-40% del agua residual es captada a una red de tratamiento (Banco Mundial, 2020b).

En la Ciudad de México (CDMX), hay cuerpos de agua superficial que se encuentran contaminados, el Río Magdalena es uno de ellos. Se le reconoce como el “último río vivo de la CDMX” porque parte de su cauce no se encuentra entubado. Su importancia radica en los tres tipos de servicios ecosistémicos que lo caracterizan, provisión, regulación y culturales, tales como la dotación de agua para abastecimiento público, calidad de agua, hábitat para las especies, belleza escénica, herencia cultura y ecoturismo. Además, es percibido como un

patrimonio natural que se tiene que conservar (Jujnovsky, 2006; Perló-Cohen y Zamora-Sáenz, 2017). Asimismo, junto con otros cuerpos de agua superficial, conforma el 2% de agua para abastecimiento público de la ciudad (Mazari *et al.*, 2014).

Desde el 2003 se han realizado diversos estudios para evaluar la calidad del agua en el río con base en parámetros fisicoquímicos y biológicos, el más importante fue ejecutado por el Gobierno de la CDMX (en ese entonces Distrito Federal o D.F.) de los cuales derivaron a su vez otros proyectos (los más recientes se resumen en la Tabla 1. En los dos estudios más recientes elaborados por Caro-Borrero *et al.*, (2015) y (2017) se reportó que, en las partes altas de la cuenca, definida como área natural y delimitada a los sitios con poca actividad antropogénica y presencia de ganado (bovino, porcino y ovino) la calidad del agua cumple con los Límites Máximos Permisibles (LMP) de la norma de agua para uso y consumo humano NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000), mientras que, en la parte media y baja, limitada al área urbana, excede los LMP de contaminantes en las descargas de agua residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997) consecuencia de los asentamientos humanos irregulares, descargas de agua residual directa, desechos de humanos y ganado en forma de heces, residuos sólidos urbanos y el crecimiento de la mancha urbana (Flores-Pichardo, 2008; Monges-Morán, 2009; Velázquez-Pedroza, 2009 y Morales-Luque, 2010). En el río se estima que existen sesenta descargas de aguas residuales, aunque permanecen activas, provienen de drenaje, colectores marginales, municipales y de la planta potabilizadora I de la alcaldía (Flores-Pichardo, 2008; Monges-Morán, 2009; Velázquez-Pedroza, 2009 y Morales-Luque, 2010).

Tabla 1. Antecedentes del análisis de calidad del agua en la Cuenca del Río Magdalena.

Título del proyecto o reporte	Parámetros medidos	Referencia
Plan Maestro de Manejo Integral y Aprovechamiento Sustentable de la Cuenca del Río Magdalena	Fisicoquímicos y biológicos (bacteriológicos)	Gobierno del Distrito Federal (2008)
Servicios ecosistémicos hidrológicos: calidad y cantidad del agua en el río Magdalena, Ciudad de México	Parámetros fisicoquímicos (pH, temperatura, CE ¹ , turbiedad, COT ² , SDT ³ , OD ⁴ , P ⁵ total, N ⁶ total, ortofosfatos, NH ₃ ⁻⁷ y NO ₃ ⁻⁸). Biológicos (CF ⁹ , EF ¹⁰ , Streptococci/enterococci)	Jujnovsky <i>et al.</i> , (2010)
<i>Final Opportunity to rehabilitate an urban river as a water source for Mexico City</i>	Parámetros fisicoquímicos (pH, temperatura, CE, turbiedad, SDT ¹¹ , OD, P total, N total, ortofosfatos, NH ₃ y NO ₃). Biológicos (Enterovirus, CF, EF, CT ¹² , <i>Cryptosporidium parvum</i> , <i>Giardia lamblia</i>)	Mazari <i>et al.</i> , (2014)
Evaluación de la calidad del agua en el río Magdalena	Parámetros físico-químicos (N total, NO ₃ ⁻ , P total, NH ₃ , ortofosfatos). Biológicos (CF, EF, macroinvertebrados bentónicos y algas)	Caro-Borrero <i>et al.</i> , (2015)
<i>Evaluation of ecological quality in peri-urban rivers in Mexico City: a proposal for identifying and validating reference sites using benthic macroinvertebrates as indicators</i>	Parámetros fisicoquímicos (N total, NO ₃ ⁻ , P total, NH ₃ , ortofosfatos). Biológicos (CF, EF, macroinvertebrados bentónicos y algas)	Caro-Borrero <i>et al.</i> , (2016)

Tabla 1. Continua...

The last peri-urban rivers of the Mexico Basin: establishment of potential reference conditions through the evaluation of ecological quality and biological indicators

Parámetros fisicoquímicos (NO₃⁻, NO₂⁻, nitrógeno inorgánico disuelto, ortofosfatos, temperatura, pH, saturación de oxígeno). Biológicos (macroinvertebrados)

Carmona-Jiménez y Caro-Borrero (2017)

¹conductividad eléctrica, ²carbono orgánico total, ³sólidos disueltos totales, ⁴oxígeno disuelto, ⁵fósforo, ⁶nitrógeno, ⁷amoníaco, ⁸nitratos, ⁹coliformes fecales, ¹⁰enterococos fecales, ¹¹sólidos disueltos totales, ¹²coliformes totales

Dada la problemática en torno al Río Magdalena se han desarrollado diversas propuestas para su rehabilitación y saneamiento. Entre ellas destaca el “Programa de Rescate del Río Magdalena y Eslava”, en el cual se propuso la implementación de cuatro PTAR (en donde sólo una se construyó, la PTAR Magdalena Contreras) y la rehabilitación de colectores marginales. A pesar de la implementación de los colectores y la planta de tratamiento, el río sigue contaminado, sobre todo en el área urbana (Mazari *et al.*, 2014, Caro-Borrero, 2015, 2016 y 2017). Ante esta problemática, Monsiváis (2014) propone una solución mediante el establecimiento de PTAR (en este estudio aún no se establecía la PTAR (Magdalena Contreras) y sistema de humedales, los segundos construidos prioritariamente para regulación de inundaciones. En su trabajo discute que los colectores marginales no son la opción ante eventos de lluvia ya que son propensos a desbordarse, vertiendo el agua residual circundante en el río, por lo tanto, estos humedales pueden ser amortiguadores de esta agua y funcionarían como un tratamiento previo del agua residual descargada en el río hacia la planta potabilizadora I. Cabe destacar que en el estudio de Monsiváis (2014), el diseño del humedal no fue abordado, solamente se propuso como una solución.

Tomando como base lo anterior, este trabajo está enfocado en la elaboración de una propuesta de saneamiento descentralizada con humedales artificiales. Dichos sistemas son considerados un tipo de “tecnología verde”, llamados formalmente como “ecotecnologías o ecotecnias”. Son construcciones hechas por el hombre con ciertas finalidades, una de ellas es el tratamiento de

aguas residuales (Vymazal, 2008; Vymazal, 2010; Stefanakis *et al.*, 2014). Los humedales artificiales son atractivos en el aspecto económico, ecológico y social. En el ecológico, existe evidencia de los procesos que se llevan a cabo en los ciclos biogeoquímicos tales como retención de nutrientes (fósforo y nitrógeno), acumulación de materia orgánica y sumideros de gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄, N₂O); hay interacciones ecológicas, se utilizan como un medio de hábitat para especies en peligro de extinción (Gauss, 2008; de la Cruz, 2015; Valera, 2016). En el económico los HA son costeables en zonas que no requieren complejas tecnologías, específicamente las zonas rurales y periurbanas, ya que ahí es donde se concentra la mayor parte de las descargas de agua residual y no existe alcantarillado, el recurso se puede destinar a plantas de tratamiento a pequeña escala debido al bajo número de habitantes (100-2500 habitantes), además de instalarse en los sitios cercanos de la descarga (Gauss, 2008; Antequera-Durán, *et al.*, 2010; Zurita-Martínez *et al.*, 2011). Desde la perspectiva social, son importantes como belleza escénica, mejoran el paisaje, promueven actividades recreativas en el sitio e incitan a la sociedad a participar en su cuidado aprovechando el recurso para actividades económicas como emplear el agua para el riego y cultivo de plantas ornamentales (Gauss, 2008; Delgadillo *et al.*, 2010; Zitácuaro-Contreras *et al.*, 2021). En México, hay antecedentes de estos sistemas para tratar agua residual doméstica e industrial, en la Tabla 2 se mencionan aquellos estudios sobre la importancia de establecer estos sistemas en el país y el uso potencial de los mismos, por ejemplo, para control de eutrofización de un lago, remoción de contaminantes orgánicos en

un estanque acuícola, reúso de agua tratada para riego de cultivos, áreas verdes, sanitario y control de pH en zonas lacustres (Martínez-Cruz *et al.*, 2006; Ramírez-Carrillo, 2009; Zurita-Martínez *et al.*, 2011; Luna-Pabello y Aburto-Castañeda, 2014; Marín-Muñiz, 2017).

Tabla 2. Antecedentes del empleo de humedales artificiales para tratar agua residual doméstica en México.

Estudio	Autor
Empleo de humedales artificiales para el tratamiento de aguas de un canal experimental de Xochimilco, México.	Martínez-Cruz <i>et al.</i> , (2006)
Evaluación de un humedal artificial de flujo vertical intermitente, para obtener agua de buena calidad para la acuicultura.	Ramírez-Carrillo <i>et al.</i> , (2009)
Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón.	Luna-Pabello y Aburto-Castañeda (2014)
Evaluación de un sistema de tratamiento doméstico para reúso de agua residual.	Garzón-Zúñiga, <i>et al.</i> , (2016)
Humedales ornamentales con participación comunitaria para el saneamiento de aguas municipales en México.	Hernández-Alarcón (2016)
Tratamiento de aguas residuales por humedales artificiales tropicales en Tabasco, México.	Marín-Acosta <i>et al.</i> , (2016)

Es por ello que en esta investigación se realiza una propuesta de saneamiento descentralizado a nivel terciario de tipo conceptual empleando el

efluente de la planta de tratamiento de agua residual municipal “Río Magdalena”. Lo anterior, considerando la potencialidad e impacto positivo que este tipo de sistemas pueden brindar a la comunidad de la Alcaldía La Magdalena Contreras, entre ellos, mejoramiento del espacio urbano y calidad de agua, uso potencial en cultivo de hortalizas, riego de áreas verdes y uso en sanitarios del foro cultural Magdalena Contreras.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1. Definición de saneamiento

El saneamiento surge en las civilizaciones antiguas, pero se renueva a mitades del siglo XIX a partir del reconocimiento de las enfermedades en la población causados por el contacto directo de los desechos presentes en el agua que circulaba en las calles. Bajo un enfoque antropocéntrico, el saneamiento, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) (2019) es “el acceso y uso de instalaciones y servicios para la eliminación segura de la orina y heces humanas”. Esta es “segura” cuando se cuenta con la contención de los desechos hasta su tratamiento y disposición final. Debe existir un mantenimiento comunitario de higiene gracias a los servicios de tratamiento de aguas residuales o separación de residuos sólidos que puedan tener un impacto negativo en la salud, con el fin de garantizar una buena calidad de vida a la población (Maya-Rodríguez y Pineda-Pablos, 2018). El saneamiento presenta retos, tales como el costo, mantenimiento, y esfuerzo en su gestión, pues deben ser encaminados hacia la sustentabilidad y no solo como solución a la salud humana sino también hacia la recuperación de los ecosistemas (Maya-Rodríguez y Pineda-Pablos, 2018). A partir del 2010, la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció al saneamiento del agua como un derecho humano y actualmente se encuentra descrito entre los Objetivos para el Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), específicamente en el Objetivo 6 (Agua y Saneamiento), se resalta el acceso a este servicio para toda la población, pero, además, se enfatiza su aplicación para la recuperación de los ecosistemas (ONU, 2015). Hoy en día se distinguen dos tipos de saneamiento para el tratamiento de aguas residuales, el descentralizado y el centralizado.

2.2. Saneamiento de agua residual descentralizado

Históricamente el saneamiento descentralizado se desarrolló antes que el saneamiento centralizado. En las zonas rurales era común que las personas defecaran al aire libre, había espacios conocidos como “estercoleros” (lugares parecidos a las granjas donde desechan los animales) y era común la colocación de tanques con desechos, que finalmente se usaban como fertilizantes. Debido a las enfermedades, esta práctica fue abandonada sustituyéndola por los primeros contenedores de heces que fueron las letrinas, las cuales tenían una capacidad de hasta 45 litros (Roccaro *et al.*, 2014).

Los sistemas en el siglo XIX se dividían en dos tipos: estáticos y alcantarillado; los estáticos los componían, las letrinas y pozos negros, donde el suelo era aprovechado para la absorción del agua residual y los de alcantarillado lo conformaban lo que hoy en día utilizamos, las tuberías y el alcantarillado, aquí se ocupaban mangueras para recolectar el agua residual y tanques metálicos para almacenar el agua (Roccaro *et al.*, 2014). Así la primera forma de tratar agua residual consistió en la degradación química y biológica a través del suelo, éste era aireado intermitente, y tenía que tener algunas características tales como, ser poroso y situarse lejos de las casas. El agua era recolectada en un tanque conformado por dos piezas; el primero funcionaba como un sedimentador y el segundo era la tubería de salida, actualmente a esto se le denomina fosa séptica (Roccaro *et al.*, 2014). Sin embargo, la problemática continuó debido a que el suelo perdía su capacidad de retención generando olores y putrefacción. Sin embargo, el saneamiento centralizado fue una alternativa ante la creciente demanda de los servicios en la población (Roccaro *et al.*, 2014).

No obstante, en 1999 resurgió el concepto de saneamiento descentralizado bajo el enfoque de la sustentabilidad. El Ministerio Ambiental de los Estados Unidos, adoptó una política denominada “Política de Productos

Integrada” (*Integrated Product Policy*, por sus siglas en inglés). Esta iniciativa trata de minimizar la degradación ambiental que causa un producto o servicio a través de políticas públicas y herramientas tales como instrumentos económicos, estrategias de mercado y acuerdos voluntarios, para lograr un desempeño ambiental efectivo, que incluya minimizar el flujo de materia y por lo tanto el flujo de residuos, asimismo reconoce la recuperación de estos residuos para que sean reutilizados en un futuro. En el tratamiento de agua residual, el saneamiento descentralizado cumple dichas características. Éste se define como un sistema que trata agua residual cerca de donde se genera (Wilderer, 2001). Capodaglio *et al.*, (2017) argumentan que los sistemas descentralizados no deben superar los 3 km a la redonda de donde se instalen.

El enfoque de un saneamiento sustentable incluye los siguientes criterios (Wilderer, 2001):

- Tratar agua residual evitando el uso de agua potable tales como ríos, lagos, acuíferos y minimización del uso de combustible como medio de energía.
- Maximizar el reusó de agua residual tratada y sus derivados, por ejemplo, en recuperación de suelos o irrigación agrícola.
- Aplicación eficiente de un sistema de recolección y transporte que trate diferentes tipos de agua residual tales como industrial y doméstica.

Por su parte, la Alianza de Saneamiento Sustentable (Sustainable Sanitation Alliance (SuSanA), 2008), incluye otros aspectos:

- Debe disminuir el grado de exposición a patógenos y sustancias peligrosas, así como estar vinculado con la nutrición, higiene y mejoramiento del estilo de vida en la población.
- Debe de ser socio-económicamente evaluado e involucrar a las comunidades en su operación y mantenimiento. A su vez debe de realizarse un análisis de

costo-beneficio; productividad agrícola, mejoramiento de la salud pública y disminuir al máximo el riesgo ambiental.

- Considera aspectos socioculturales; conveniencia, aceptación del sistema y cuestiones de género. Participación de instituciones estables y eficientes y cumplimiento del marco legal.
- Considera emisiones potenciales que se deriven al ambiente (por ejemplo, gases de efecto invernadero).

2.3. Saneamiento de agua residual centralizado

La era del saneamiento centralizado tiene su origen en las civilizaciones antiguas, como por ejemplo, la mesopotámica (3500-2100 a.C.) la cual redireccionaba el agua de los lagos para sus cultivos a través de canales, sin embargo, es hasta la época industrial (a mediados del s. XVIII) cuando se innovan estos sistemas, se reconoció que los padecimientos, en particular el cólera y la tifoidea, eran transmitidos por el contacto directo con las heces (Wilderer y Schreff, 2000; Wilderer, 2001; Roccaro *et al.*, 2014). Los países europeos fueron los primeros en adoptar sistemas de drenaje para separar las aguas grises de los canales de abastecimiento público (Wilderer, 2001; Roccaro *et al.*, 2014). Así comienza la instalación de los primeros drenajes que recolectaban el agua residual en áreas urbanas cerca de la zona industrial, se transportaba a una distancia lejana de las ciudades y se reutilizaba en tierras de cultivo (Wilderer, 2001; Roccaro *et al.*, 2014). A pesar de iniciar con diseños de drenaje, no se consideraba el tratamiento, esto ocurre hasta el siglo XX, cuando emergen problemas derivados de la presencia de agua residual en el ambiente (Maya-Rodríguez y Pineda-Pablos, 2018). En 1972 se expidió Ley de Agua Limpia en los Estados Unidos y otras normas en Europa que obligaron a los gobiernos a dar pie al tratamiento de aguas residuales, para evitar la contaminación generalizada y asegurar la calidad del agua (Maya-Rodríguez y Pineda-Pablos, 2018)

De esta manera, históricamente el saneamiento centralizado se define como un sistema en el que las aguas residuales son recolectadas a través de una red de alcantarillado, a partir de diferentes sitios donde se originan, ya sea, casas, instituciones, industria o escorrentía de aguas pluviales y son tratadas lejos de donde se generan (Wilderer, 2001; Capodaglio *et al.*, 2017). No obstante, con el crecimiento de la mancha urbana esos lugares lejanos ahora son los nuevos centros de tratamiento. En la Figura 1 se esquematiza el ciclo del agua urbano, desde la recolección del agua residual en el sistema de drenaje, transporte a una

planta de tratamiento y descarga de agua tratada hacia una fuente receptora o reúso (Marsalek *et al.*, 2008). Lo que se busca es la prevención de inundaciones, enfermedades y descarga de los residuos a los cuerpos de agua (Marsalek *et al.*, 2008).

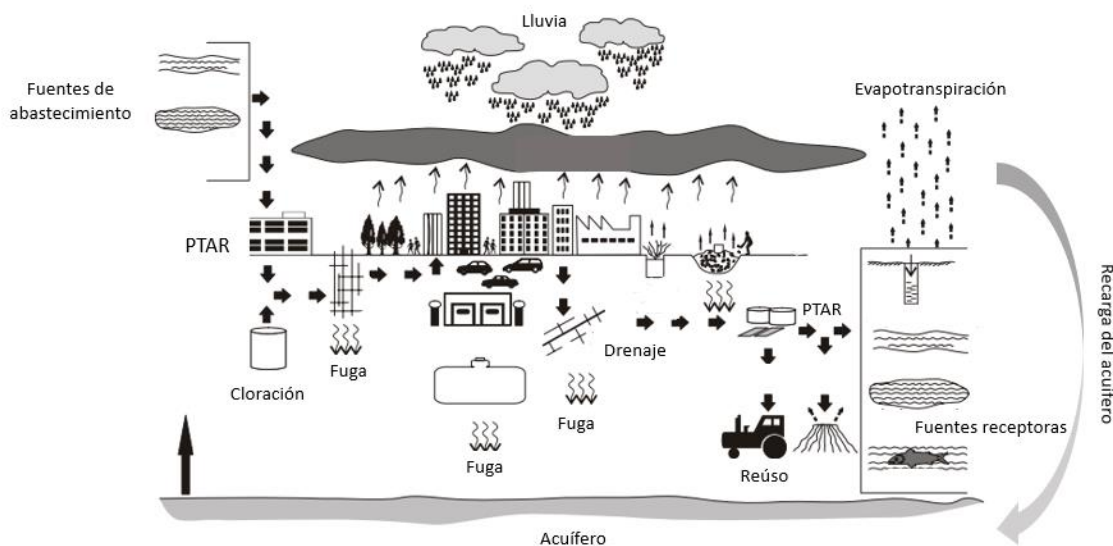
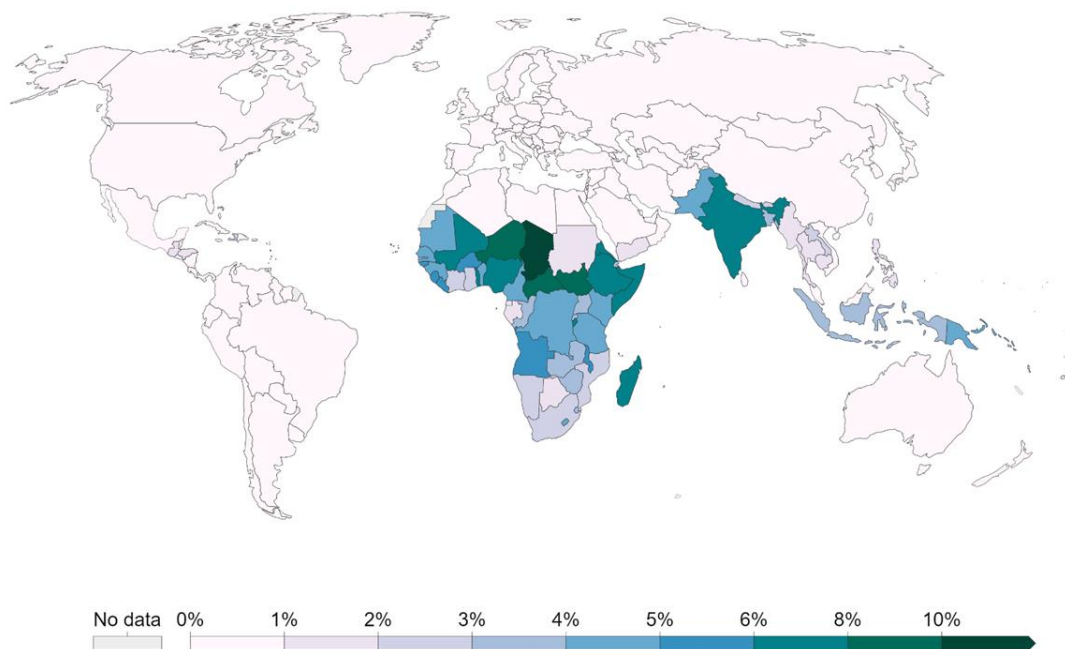


Figura 1. Saneamiento centralizado en el ciclo de agua urbano (Modificado de Marsalek *et al.*, 2008).

Wilderer (2001) argumenta que el saneamiento centralizado es un sistema lineal, donde existe un consumo irracional de agua, ocupa agua limpia (proveniente de ríos u otras fuentes similares) para poder transportar los residuos y para tratarlos se requiere el uso de compleja tecnología que consume alta energía, genera otro tipo de desechos que no se pueden reutilizar o que utilicen compuestos químicos (como el cloro) para su disposición final.

El saneamiento debe ser accesible a toda la población. No obstante, en el 2017, a nivel mundial se estimó que 4,200 millones de personas no tenían acceso a un saneamiento seguro alcanzando el 1.4% de muertes a nivel mundial por padecimientos gastrointestinales; el 5% en países emergentes (Ritchie y Rose,

2021). En la Figura 2 se muestra el porcentaje de muertes atribuidas a un saneamiento inseguro, entre las causas se incluyen al cólera, disentería, hepatitis A, poliomielitis y tifoidea. Cabe destacar que este tipo de afecciones son transmitidas vía fecal-oral y el agua es el medio de transmisión (Ritchie y Rose, 2021; Pinto y Matos (s.f.).



Source: IHME, Global Burden of Disease

OurWorldInData.org/water-access • CC BY

Figura 2. Porcentaje de muertes atribuidas a un saneamiento inseguro a nivel mundial. Un saneamiento seguro es aquel que está libre de contaminación química o microbiológica; además de ser accesible (Ritchie y Rose, 2021).

2.4. Comparación entre sistemas centralizados vs descentralizados

Los sistemas descentralizados advierten diversos componentes que no se logran considerar en las PTAR de gran escala. En la Tabla 3 se describen las ventajas y desventajas de los sistemas descentralizados y centralizados y a continuación, se realiza una descripción detallada de estos:

- a) Manejo y tratamiento de agua residual.** En los sistemas centralizados las distancias para recoger y tratar agua son largas, mayores a 3 km, el riesgo de que ocurra un desbordamiento es a gran escala ya que, si existe un evento natural extremo, los recolectores de agua se desbordan provocando infiltración en el subsuelo (Servín-Jungdorf *et al.*, 2004; Heredia-Deiters, 2013; CONAGUA, 2019). Adicional a esto se requieren de tubos y colectores que se coloquen de manera subterránea. En cambio, para los sistemas descentralizados se recurre a materiales menos costosos como el PVC o estanques de cemento, no es necesaria la excavación subterránea profunda; aunque pueden ser menos vulnerables que los sistemas centralizados ante eventos naturales extremos, el riesgo de desbordamiento es local y no generalizado (CONAGUA, 2019). Por otra parte, los sistemas descentralizados, se pueden distribuir de manera local ya que no ocupan grandes extensiones de tierra. En los sistemas centralizados no hay uniformidad de las aguas residuales porque llegan mezcladas y de diversas fuentes, en cambio, en los sistemas descentralizados éstas son uniformes ya que provienen de fuentes específicas tal como una escuela, vivienda, u hotel (Servín-Jungdorf *et al.*, 2004; Heredia-Deiters, 2013; CONAGUA, 2019).
- b) Económicos.** En los sistemas centralizados se requiere personal altamente capacitado, además de contar con equipos auxiliares en caso de una emergencia (Servín-Jungdorf *et al.*, 2004; Heredia-Deiters, 2013; CONAGUA, 2019). Debido a los residuos generados es competencia obligatoria de contar con su reúso, lo cual se dificulta, ya que se generan en grandes cantidades (en

el caso de residuos sólidos son toneladas). Es difícil que el agua residual tratada se reutilice debido a la no uniformidad de las aguas, además se requiere de rebombado para llevarlo a las instalaciones pertinentes; se puede llegar a acuerdos con personas de otras comunidades y no hay control de quien recibe esa agua. En cambio, en los sistemas descentralizados, el agua es ocupada localmente y hay un mayor control al estar distribuidas, esto también disminuye costos de traslado (Heredia-Deiters, 2013; Servín-Jungdorf *et al.*, 2004; CONAGUA 2019). En cuanto a la inversión inicial, en un sistema centralizado siempre va a ser mayor, pero para ambos sistemas, debe tomarse en cuenta una inversión equivalente, es decir, pagar menos en menos tiempo que pagar más en más tiempo (mejor ocho pagos de un millón anual que cuatro pagos de dos millones cada dos años), esto permite tener un valor equivalente menor, en términos de valor presente (Servín-Jungdorf *et al.*, 2004). Respecto a los costos administrativos para ambos casos es igual, aunque en los descentralizados al contar con varias plantas distribuidas se requiere personal para poder atenderlas (Servín-Jungdorf *et al.*, 2004). Por otra parte, si se requiere de la rehabilitación del sistema es poco factible que ocurra en los centralizados ya que se diseñan con características particulares y un proceso puede afectar al otro, en comparación con los descentralizados, son más susceptibles ya que su modificación no afecta a los otros tratamientos siempre y cuando sean unidades independientes (Servín-Jungdorf *et al.*, 2004; Heredia-Deiters, 2013; CONAGUA, 2019).

- c) Impacto social y ambiental.** En ambos casos habrá un impacto en el paisaje natural, y en cuanto a los aspectos sociales, se desencadenan inconformidades con los habitantes de la zona donde se construyen. Sin embargo, en los sistemas descentralizados hay opciones estéticas, es el caso de los humedales artificiales, de igual manera inciden en la participación comunitaria tales como el cultivo de plantas ornamentales. La desventaja es la generación de olores.

En la Tabla 3 se describen los criterios de selección (manejo de agua residual, tratamiento de agua residual, económico, impacto social y ambiental) con los que se pueden evaluar las ventajas y desventajas de los dos tipos de sistemas de saneamiento (centralizado vs descentralizado).

Tabla 3. Ventajas y desventajas del saneamiento centralizado vs descentralizado (CONAGUA, 2019).

Criterios	Sistema centralizado (PTAR que utiliza lodos activados a nivel secundario)	Sistema descentralizado (humedal artificial)
Manejo de agua residual		
Sistema de recolección, conducción y bombeo	Red de drenaje larga (mayor a 3 km). Es necesaria la excavación profunda para instalación de la red de recolección y conducción. Mayor probabilidad de averías. El requerimiento de energía es mayor, entre el 1%-3% de la energía eléctrica de una ciudad es usada para la operación de una planta convencional	Red de drenaje corta (menor a 3 km). No se requiere excavación profunda, por ejemplo, para humedales artificiales la profundidad promedio es de aprox. 1 metro y hasta 3 metros para lagunas de estabilización. Se reduce costos en sistemas de recolección, se adoptan zanjas o estanques para colectar el agua. Generalmente se ocupa la gravedad para conducir el agua
Tratamiento de agua residual		
Tecnologías de tratamiento	PTAR con diseños complejos	Diferentes opciones (tanques Imhoff, fosas sépticas, discos biológicos, humedales artificiales, lagunas de estabilización)
Espacio requerido	Grandes extensiones en un solo lugar (> a 1 hectárea)	Pequeñas áreas si se distribuyen en varios sitios (< a 1 hectárea)
Operación y mantenimiento	Equipo técnico tiempo completo. Se requiere de un equipo técnico auxiliar para en caso de una emergencia	Equipo técnico distribuido y no especializado (por ejemplo, en los humedales se harían trabajos de poda y filtrar agua de los estanques)

Tabla 3. Continua...

Uniformidad de la calidad de las aguas	Mezcla de varios tipos de agua residual (ej. hospitales, talleres, viviendas). Tratamientos complejos	Mayor uniformidad, efluentes específicos (por ejemplo, agua residual doméstica proveniente de un vecindario o industrial proveniente de una fábrica de textiles)
Social y Ambiental		
Control social	El problema ambiental no es percibido por los usuarios	Mayor concientización, hay mayor responsabilidad por parte de los usuarios.
Riesgo ambiental	Vulnerables a eventos naturales (por ejemplo, terremotos o inundaciones). El daño es proporcional al tamaño de la planta.	El riesgo se halla distribuido, es localizado.
Mitigación del cambio climático	La captura de metano es costoso y riesgoso, indispensable producir energía para mitigar impacto.	Uso de bio-reactores anaerobios, el metano se captura fácilmente.
Potencial reutilización del agua tratada	Poca reutilización de agua tratada debido a la mezcla de diferentes fuentes. Bombeo a actividades que lo requieran (parques, autolavados, sanitarios), Negociación con poblaciones cercanas a entrega de agua tratada por otros beneficios.	El agua tratada se usa localmente, mejora la calidad de efluente para reutilizarse, menor pérdida de tiempo y costo de traslado.
Social	En zonas urbanas debido a la ocupación, se requieren considerar ubicaciones fuera de ella. La construcción de una PTAR genera resistencia social. Impacto en el paisaje a gran escala	También existe resistencia social por olores y transporte de lodos, pero a menor escala. Impacto en el paisaje, pero se pueden utilizar opciones que sean estéticos visualmente
Económico		
Facilidad de expansión	Alta inversión debido a que se tienen que considerar el traslado de lo previamente construido y diseñado.	Poca inversión porque hay distribución de nuevas unidades independientes.

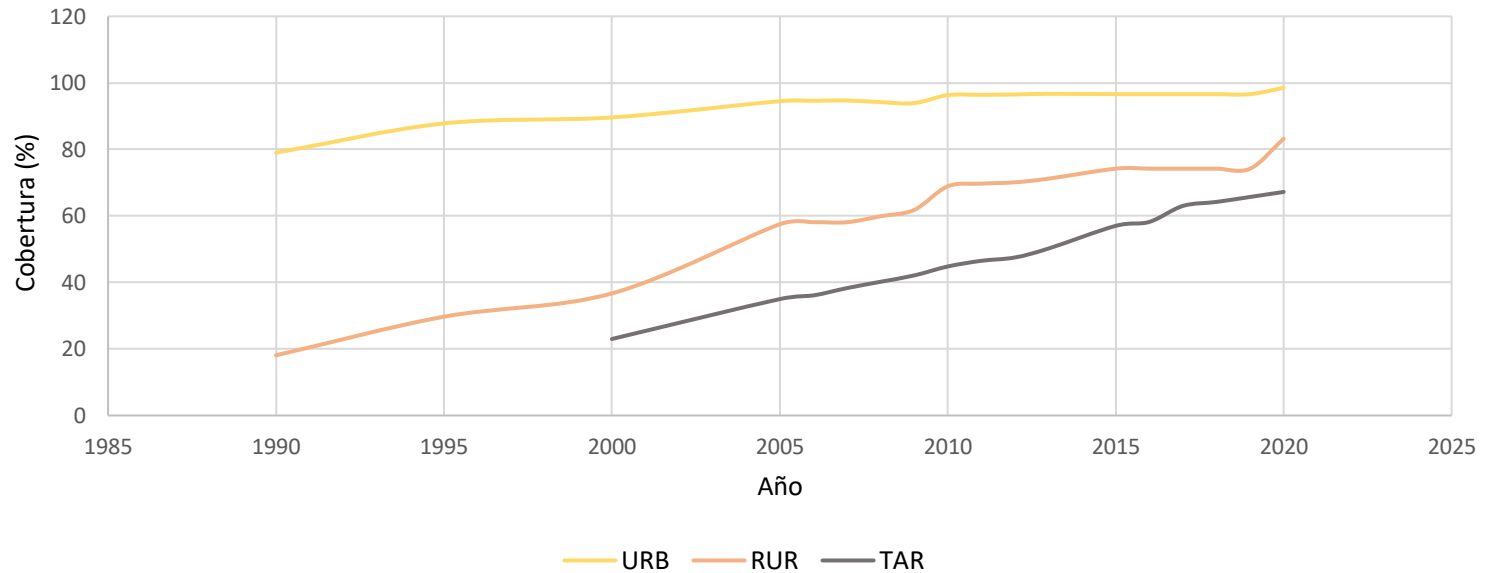
Tabla 3. Continua...

Efectividad para zonas de expansión urbana	Las zonas en proceso de expansión tienen pocas posibilidades de conectarse a corto plazo a los sistemas centralizados	Mayor probabilidad de conectarse a un sistema descentralizado a corto plazo
Inversión	En macroplantas se requiere desembolsar mayores cantidades en menos ocasiones y a largo plazo	Mayor frecuencia, pero a corto plazo y de menor inversión inicial
Costos administrativos	Igual	Igual a menos de requerir personal para varias PTAR
Rehabilitación	No existe un reemplazo del método si se requiere la rehabilitación de una PTAR	Más flexible, porque se distribuyen las unidades de manera independiente

2.4.1. Perspectiva nacional del saneamiento de agua residual

Las descargas de aguas residuales se clasifican en municipales y no municipales. Las municipales corresponden a las que son manejadas en los sistemas de alcantarillado urbanos y rurales, en tanto que las segundas son aquellas generadas por otros usos, como el de la industria autoabastecida (CONAGUA, 2019). A través de los programas nacionales adoptados tales como APAZU Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento en Zonas Urbanas y PROSAPPYS, Programa para la Construcción y Rehabilitación de Agua Potable y Saneamiento en Zonas Rurales (actualmente denominados bajo el nombre de PROAGUA, Programa de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento), la cobertura de agua potable y saneamiento ha progresado de manera relevante. Hasta el 2015 se generó una cobertura mayor al 90% a nivel nacional (CONAGUA, 2016). Sin embargo, aún existen deficiencias en torno al saneamiento en las zonas rurales. Cabe destacar que México concentra el 80% de la población en las ciudades, mientras que el 20% habita en las zonas rurales (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2020). Lo anterior se puede visualizar en la Figura 3, de 1990 hasta el 2015 ha aumentado la cobertura de drenaje y alcantarillado tanto en las zonas urbanas como en las zonas rurales, no obstante, en éstas últimas, el porcentaje no se acerca al de las primeras. Por otro parte, en la misma Figura 3 se visualiza que la cobertura de tratamiento de agua residual a nivel nacional hasta el 2020 solo ha alcanzado el 67.2%, un porcentaje menor al de drenaje y alcantarillado. El tema de saneamiento e instalación de plantas de tratamiento de agua residual son temas que deben seguir siendo abordados y analizados.

COBERTURA DE SANEAMIENTO EN ZONA URBANA Y RURAL Y TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL (1990-2020)



URB-urbano, RUR-rural, TAR- Tratamiento de agua residual

Figura 3. Cobertura nacional alcanzada por el servicio de saneamiento y tratamiento de agua residual en el periodo de 1990-2020. URB-urbano, RUR-rural, TAR- Tratamiento de agua residual (CONAGUA, 2021).

No obstante, se debe seguir prestando mayor atención al tratamiento de agua residual, tan solo aproximadamente el 61% del agua residual que es recolectada se trata, en la Figura 4, se observa que de los 212 m³/s de aguas residuales que se generan al año, solo se tratan 129 m³/s, esto conlleva a un daño ambiental que rebasa la resiliencia de los ecosistemas (Mazari-Hiriart y Noyola-Robles, 2018).

Agua residual tratada y generada

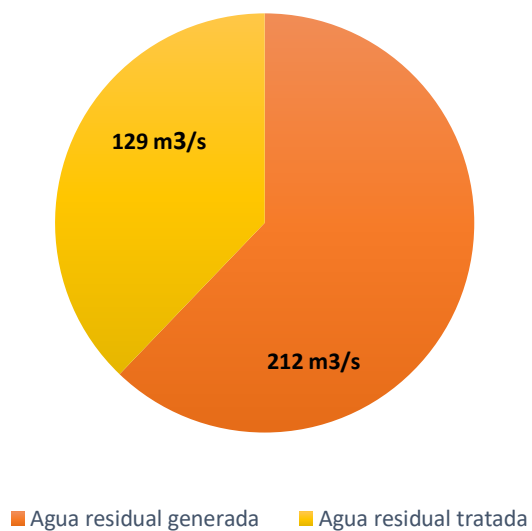


Figura 4. Agua residual que se trata y se genera a nivel nacional (Mazari-Hiriart y Noyola-Robles, 2018)

2.4.2. Proceso de saneamiento de aguas residuales municipales en zonas urbanas y rurales de México

En cuanto a las plantas de tratamiento de agua residual, en la Tabla 4 se resume el número total a nivel nacional, el gasto de diseño y el gasto operativo. El país cuenta con 2786 plantas (CONAGUA, 2021). El estado que presenta mayor cobertura es Aguascalientes (98.3%) trata un caudal de 3.19 m³/s, seguido de Durango que trata 4.1 m³/s, también Nayarit trata un caudal de 2.51 m³/s (96.7), Guerrero (95.6%) que trata 3.77 m³/s, Nuevo León trata 12.15 m³/s (93.8%), Baja California (90.1%) trata 5.88 m³/s y finalmente la CDMX (90%) trata 19.68 m³/s. Los otros estados del país no se mencionan ya que la cobertura es menos del 90%. Por otra parte, los estados que presentan una cobertura menor a 30% son: Campeche (9.5%) con un caudal tratado de 0.134 m³/s, Yucatán (12.5%) con un caudal tratado de 0.57 m³/s, Hidalgo (20.1%) que trata 0.49 m³/s y Morelos (22.2%) trata 1.43 m³/s. No obstante, el estado que presenta mayor caudal tratado es la CDMX en comparación con Nuevo León, precedido del estado de México que trata 17.65 m³/s que corresponde a tan solo una cobertura del 56.5%, el tamaño del caudal tratado de ambos, es porque una parte se destina a la PTAR “Atotonilco”, la cual trabaja con un caudal de 17.24 m³/s y 11.5 m³/s, respectivamente. En la mayoría de las localidades rurales (población menor de 2500 habitantes) predomina el establecimiento de lagunas de estabilización y en las localidades urbanas (población mayor a 2500 habitantes) los lodos activados (INEGI, 2020; CONAGUA 2021). Cabe resaltar que el EDOMEX es el primer estado mayormente poblado mientras que la CDMX es el segundo (INEGI, 2020).

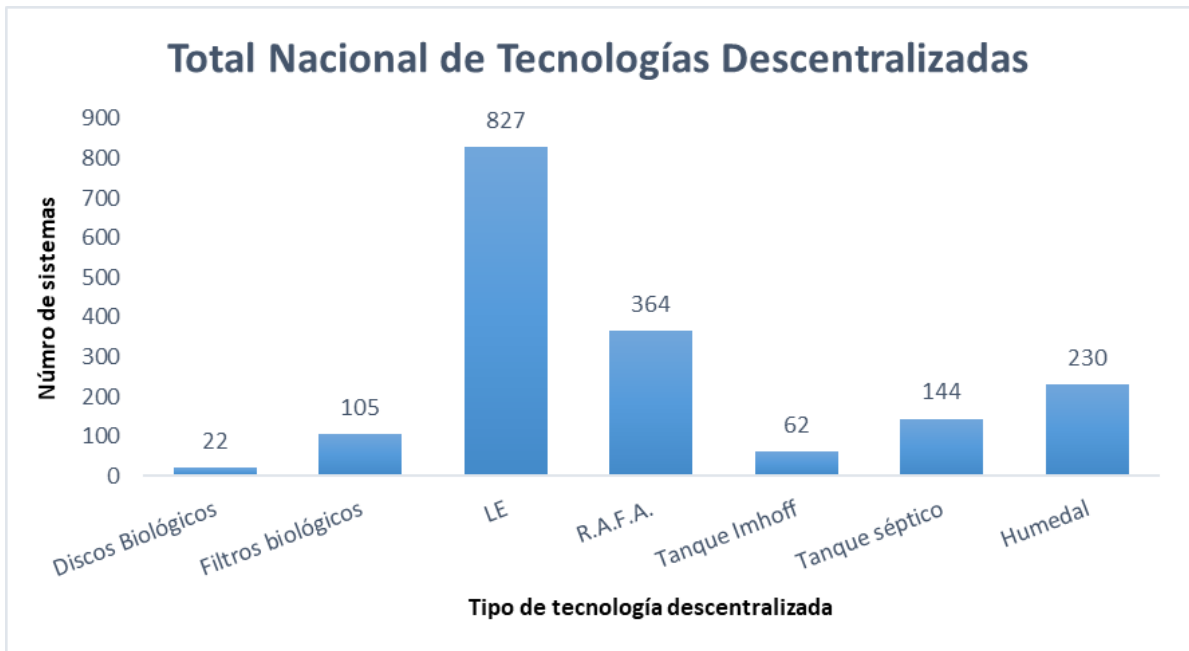
Tabla 4. Caudal de aguas residuales municipales tratadas por entidad federativa hasta el 2019 (CONAGUA, 2021).

Estado	No. de Plantas	Gasto de diseño L/s	Gasto operativo L/s
Aguascalientes	135	4840	3192
Baja California	46	7680	5880
Baja California Sur	32	2071	1636
Campeche	27	170	134
Chiapas	99	2003	1447
Chihuahua	194	10254	7091
CDMX	29	5578	19638
Coahuila de Zaragoza	27	5737	4682
Colima	56	2245	1606
Durango	240	6070	4107
Guanajuato	66	7664	5150
Guerrero	70	4444	3770
Hidalgo	71	36058	499
Jalisco	123	15195	10664
México	133	9666	17627
Michoacán de Ocampo	45	4125	3252
Morelos	57	2941	1427
Nayarit	70	3494	2510
Nuevo León	55	16157	12150
Oaxaca	77	1820	1294
Puebla	142	3952	3934
Querétaro de Arteaga	63	2372	1615
Querétaro de Arteaga	63	2372	1615
Quintana Roo	29	3047	2089

Tabla 4. Continua...

San Luis Potosí	76	2792	2169
Sinaloa	301	6612	5867
Sonora	106	6902	4481
Tabasco	84	2966	2169
Tamaulipas	59	8175	5007
Tlaxcala	77	1650	1229
Veracruz	109	6902	4481
Yucatán	36	747	557
Zacatecas	52	1946	1440
Total Nacional	2786	196750	144710

Gracias a la responsabilidad política, a través del programa PROCAPTAR (Programa Nacional para Captación de Agua de Lluvia y Ecotecnias en Zonas Rurales) aumentó el uso de ecotecnias en las zonas marginadas del país, por ejemplo, en Tabasco y Chiapas el uso de humedales y otros sistemas, tales como filtros biológicos, discos biológicos, tanques Imhoff, predominan como tecnologías descentralizadas (CONAGUA, 2021). No obstante, en el centro y norte del país hay mayor uso de ecotecnias descentralizadas que en el sur (CONAGUA, 2021). En la Figura 5 se puede visualizar el número total nacional de tecnologías descentralizadas usadas en el país, donde predominan las lagunas de estabilización.



LE (Lagunas de estabilización), R.A.F.A. (Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente)

Figura 5. Número Total Nacional de Tecnologías descentralizadas instaladas. (CONAGUA, 2021).

2.4.3. Saneamiento de aguas residuales municipales en la Ciudad de México

La CDMX tiene una cobertura de tratamiento de agua residual hasta el 2020 del 90% el cual aumentó un 5% respecto al 2019 y trata un caudal de 19.68 m³/s. Hasta el 2020 se registraron 29 PTAR, el principal proceso de saneamiento es el de lodos activados. Tienen un gasto total de diseño de 5.6 m³/s, no obstante, el gasto operativo es de 2.4 m³/s (~ 50%), los otros 17.24 m³/s se tratan en la PTAR “Atotonilco” en Hidalgo (CONAGUA, 2021). En la Tabla 5 se muestra el número total de plantas, el gasto de diseño y operativo, el nivel de tratamiento al que operan y la actividad de reúso a la que es destinada. Solo una planta opera con el mismo gasto a la que fue diseñada (Campo Militar No. 1, ubicada en la Alcaldía Miguel Hidalgo), las demás operan por debajo de su capacidad de diseño

(CONAGUA, 2021). Por otra parte, el nivel al que se trabaja mayormente es el secundario, seguido del terciario (INEGI, 2017,) según la SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México) (2016) en la CDMX el nivel terciario se usa un 8% debido a los altos costos que genera. En cuanto al reúso de agua residual tratada, predomina el riego de áreas verdes, seguido del riego agrícola. Desde el 2008 el reúso es un tema socio-político en el país, desde su manejo en alcantarillado hasta la recarga de acuíferos (De la Peña *et. al.*, 2013). Actualmente en el Plan Nacional Hídrico 2019-2024 el uso de agua residual tratada se enfatiza como principal razón para aprovecharla en riegos de cultivo agrícolas para proveer la seguridad alimentaria en el país (SEMARNAT, 2019).

Tabla 5. Plantas de Tratamiento de Agua Residual municipal en la CDMX (CONAGUA, 2021).

Alcaldía	PTAR	Gasto de diseño (L/s)	Gasto operativo (L/s)	Proceso	Tipo de tratamiento	Reúso
Álvaro Obregón	Santa Fe	280	54.2	Lodos activados	Terciario	Riego de áreas verdes de la ZEDEC y saneamiento de la barranca Tlapizahuaya
Azcapotzalco	El Rosario	25	11.3	Lodos activados	Terciario	Lago Tezozomoc y parque
Coyoacán	Coyoacán	250	126.9	Lodos activados	Secundario	Riego de áreas verdes, abasto a zonas comerciales
Coyoacán	Ciudad Universitaria	40	25	Lodos activados	Terciario	Riego de áreas verdes
Coyoacán	Ciudad Universitaria FCPYS	7.5	3	Lodos activados	Secundario	Inodoros y mingitorios del Instituto de Ingeniería
Cuauhtémoc	Tlatelolco	22	12.1	Lodos Activados	Secundario	Riego de áreas verdes
Gustavo A. Madero	Acueducto Guadalupe	110	59.3	Lodos activados	Secundario	Procesos industriales y riego de áreas verdes

Tabla 5. Continua...

Gustavo A. Madero	San Juan de Aragón	500	150.1	Lodos activados	Secundario	Lago de San Juan de Aragón y riego de áreas verdes
Iztacalco	Ciudad deportiva	230	94.6	Lodos activados	Secundario	Riego de áreas verdes y uso industrial
Iztacalco	Iztacalco	13	6.7	Lodos activados	Terciario	Riego de áreas verdes
Iztapalapa	Cerro de la estrella	3000	1496	Lodos activados	Terciario	Canales de Xochimilco y Tláhuac, riego agrícola, industria y comercios, y áreas verdes
Iztapalapa	Santa Martha Acatitla	14	9.2	Lodos activados	Terciario	Riego de áreas verdes del reclusorio y servicios sanitarios
La Magdalena Contreras	Magdalena Contreras	50	19.9	Lodos activados	Secundario	Río Magdalena y Eslava
Miguel Hidalgo	Bosque de las Lomas	25	23.3	Lodos activados	Secundario	Riego de áreas verdes

Tabla 5. Continua...

Miguel Hidalgo	Campo Militar No.1-A	30	30	Lodos activados	Secundario	Riego de áreas verdes
Miguel Hidalgo	Chapultepec	160	42.8	Lodos activados	Secundario	Llenado de lagos de Chapultepec y riego de áreas verdes
Milpa Alta	San Pedro Actopan	60	19	Lodos activados	Terciario	Riego agrícola y llenado de canales
Tláhuac	San Andrés Mixquic	30	18.2	Lodos activados	Terciario	Riego agrícola
Tláhuac	El Llano	250	64.1	Lodos activados	Secundario	Riego agrícola
Tláhuac	San Juan Ixtayopan (La Lupita)	15	12.2	Lodos activados	Secundario	Riego agrícola y llenado de canales
Tláhuac	Tetelco	15	12.3	Lodos activados	Secundario	Riego agrícola y llenado de canales
Tláhuac	San Lorenzo	225	51.1	Otro	Terciario	Riego agrícola y llenado de canales

Tabla 5. Continua...

Tlalpan	Parres	7.5	3	Lodos activados	Secundario	Riego de áreas verdes
Tlalpan	Abasolo	15	3.8	Lodos activados	Secundario	Riego agrícola
Tlalpan	Honorable Colegio Militar	30	26	Lodos activados	Secundario	Riego de áreas verdes
Tlalpan	San Miguel Xicalco	7.5	4.8	Lodos activados	Secundario	Riego de áreas verdes y llenado de canales
Tlalpan	Unidad habitacional Pemex Picacho	13	8.9	Lodos activados	Secundario	Riego de áreas verdes
Xochimilco	Reclusorio Sur	30	14.3	Lodos activados	Secundario	Riego de áreas verdes y Río Santiago
Xochimilco	San Luis Tlaxialtemalco	150	52.3	Lodos activados	Terciario	Canales de Xochimilco
Total		29				

Las plantas de tratamiento operan a una capacidad menor a la del diseño porque: 1) se diseñan a partir de un gasto máximo, aunque lo ideal es que trabajen por lo menos a la mitad de su capacidad y 2) el agua residual generada es conducida a través de colectores marginales hacia el sistema central del drenaje profundo. El agua residual del Valle de México no tratada y tratada se conduce a través de la red secundaria del sistema principal y son descargadas por cuatro salidas artificiales localizadas en el extremo norte de la cuenca (Tajo de Nochistongo, El Gran Canal del desagüe, Emisor Central y Túnel Emisor Oriente).

2.4.4. Saneamiento de aguas residuales en la Alcaldía La Magdalena Contreras, Ciudad de México

Hasta el 2016 se tiene un registro de flujo de agua residual de 5 L/s en la alcaldía, esto representa el 5% del total en la ciudad (SEDEMA, 2016). En la alcaldía, opera una PTAR municipal, denominada Magdalena Contreras, fue diseñada para tratar 50 L/s, pero hasta el 2019 opera por debajo de la mitad de su capacidad, con 19.9 L/s, el proceso bajo el cual se lleva a cabo el tratamiento es el sistema de lodos activados (CONAGUA, 2020). Las aguas residuales que se recolectan provienen de un colector marginal, y de la planta potabilizadora I Río Magdalena I. Por otra parte, en el sector privado hay dos PTAR, una planta pertenece a un centro deportivo, que trabaja a un nivel primario (Remover materiales orgánicos coloidales y disueltos) y la segunda a un hospital, que lo hace a un nivel secundario (ajustar el pH y remover materiales orgánicos y/o inorgánicos en suspensión con tamaño igual o mayor a 0.1 mm) (CONAGUA, 2020). En conjunto tienen un gasto de diseño de 2.66 L/s y 0.34 L/s de gasto operativo, respectivamente. El principal reúso que se le da en la PTAR municipal es la descarga a los ríos Eslava y Magdalena mientras que las privadas es el de riego de áreas verdes y uso en sanitarios públicos (SEDEMA, 2016; CONAGUA, 2020). En cuanto al drenaje, es de tipo combinado, es decir, encauza tanto aguas

residuales como pluviales a través de una red primaria y una secundaria integrada por 8,000 pozos y 600 coladeras pluviales (PAOT, 2005).

2.5. Descripción de la zona de estudio en términos socio-económicos y su relevancia en el saneamiento

2.5.1. Actividades económicas y tasa de empleo

De acuerdo con INEGI (2015) la población de la Alcaldía La Magdalena Contreras (MC) se compone de 243,886 habitantes (48% hombres y 52% mujeres). La población económicamente activa equivale a un 53% (INEGI, 2015). La principal actividad económica es la terciaria, predominan el comercio al por menor y de servicios. La actividad primaria es escasa, pero existe potencial debido a las características que ofrece el suelo en la zona. Por ejemplo, la producción de maíz, si bien es el más cultivado, hay otros cultivos potenciales, entre ellos, hongos, setas y champiñones, esto atribuye una potencial actividad económica para cultivos. Sin embargo, a pesar de la existencia de estas actividades remuneradas, se estima que hasta el 2017, existe una tasa de desempleo del 3.2%, esto se traduce en que, por cada cien personas empleadas, tres se encuentran desocupadas, pero buscando empleo activamente (Programa Provisional del Gobierno, 2020).

2.5.2. Grado de desarrollo social en la zona y saneamiento

En el Programa Provisional de Gobierno de la Alcaldía La Magdalena Contreras, se destaca al Índice de Desarrollo Social, el cual mide el grado de desarrollo social en la alcaldía. El desarrollo social, de acuerdo con lo citado en el programa, es:

“Un proceso que tiene como finalidad mejorar las condiciones de vida de la población en distintos ámbitos como: salud, educación, alimentación, vivienda, vulnerabilidad, seguridad social, empleo, salarios, entre otros”.

Este índice se basa en seis indicadores, los cuales son: el indicador de calidad y espacio disponible en la vivienda, adecuación energética, de bienes durables, adecuación sanitaria, de acceso a seguridad social y/o a servicio médico y de rezago educativo. A partir de esto se agrupa a las colonias, manzanas o alcaldías en diferentes unidades territoriales, que, de acuerdo con los indicadores antes mencionados, el grado de desarrollo social se clasifica como, “Muy alto” (0.875 a 1), “Alto” (0.750 a 0.874), “Medio” (0.625 a 0.749), “Bajo” (0.500 a 0.624) y “Muy bajo” (< 0.5). En la Tabla 6 se destaca el grado de desarrollo social de la alcaldía del año 2010. En cuanto a la adecuación sanitaria, 21% de las colonias presentan un índice bajo. Aunado a lo anterior, en el 2015, se estimó que el 97.55% de las viviendas están conectadas a la red de drenaje, el 2.17% a fosas sépticas, 0.29% a una grieta o barranca y 0.20% no cuentan con el servicio. El drenaje es relevante en el saneamiento de agua residual porque funge como una red de conducción de las mismas. Si el agua residual no es transportada a través de la red, como ocurre en las barrancas o grietas, lo más probable es que sean descargadas directamente con consecuente deterioro ecológico, y convirtiéndose en focos de infección para la población. Además de lo anterior, no se cumplen las expectativas de calidad de servicios tanto de drenaje y alcantarillado en la comunidad, esto de acuerdo a la Encuesta Nacional

de Calidad e Impacto Gubernamental 2017, la cual evalúa el desempeño de municipal con el suministro de servicios públicos. Adicionalmente el INEGI (2016) reafirma la ineficiencia del servicio de drenaje y alcantarillado, ya que, el 20% de los habitantes de la alcaldía no cuenta con ello (Alcaldía La Magdalena Contreras, 2020).

Tabla 6. Índice de Desarrollo Social. Programa Provisional de Gobierno 2019-2020 (Alcaldía La Magdalena Contreras, 2020).

Índice de Desarrollo Social 2010							
Grado de desarrollo Social	Colonias (%)	Calidad y espacio de vivienda	Acceso a salud y seguridad social	Rezago educativo	Bienes durables	Adecuación sanitaria	Adecuación energética
Alto	3	0.92	0.63	0.94	0.96	0.99	1
Medio	31	0.71	0.64	0.96	0.94	0.94	1
Bajo	46	0.57	0.59	0.93	0.92	0.85	1
Muy bajo	21	0.51	0.54	0.89	0.88	0.75	1

3. Procesos de saneamiento de aguas residuales municipales, ventajas y desventajas

Se emplean diferentes tecnologías con el objeto de tratar aguas residuales, encontrando las siguientes: a) lodos activados b) lagunas de estabilización (aerobias, facultativas y anaerobias), c) Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (R.A.F.A.), d) tanques sépticos, e) tanque Imhoff, f) filtros biológicos, g) discos biológicos y h) humedales artificiales. Respecto a los procesos de saneamiento para tratar aguas residuales municipales, en México hay 14 procesos de los cuales sobresalen las lagunas de estabilización (792 plantas instaladas), seguido de lodos activados (761 plantas instaladas), R.A.F.A. (140 plantas instaladas), tanque séptico (100 plantas instaladas) y humedales artificiales (77 plantas instaladas) (CONAGUA, 2021). No obstante, los lodos activados representan el mayor caudal tratado en el país ($69.3 \text{ m}^3/\text{s}$) que corresponde al 49% de caudal tratado a nivel nacional, mientras que las lagunas tratan $14.06 \text{ m}^3/\text{s}$ que corresponde al 10%. En cuanto a los otros tratamientos le siguen los filtros biológicos que tratan $4.73 \text{ m}^3/\text{s}$, el RAFA $3.26 \text{ m}^3/\text{s}$, los humedales artificiales $1.23 \text{ m}^3/\text{s}$, los discos biológicos $0.86 \text{ m}^3/\text{s}$, el tanque Imhoff $0.37 \text{ m}^3/\text{s}$ y los tanques sépticos $0.24 \text{ m}^3/\text{s}$ (CONAGUA, 2021). En esta sección se plantea una descripción de cada proceso, señalando las ventajas y desventajas correspondientes. Los humedales artificiales se tratan en el Capítulo 4.

a) Lodos activados

Los lodos activados representan el proceso que trata mayor caudal en el país, se considera el principal elemento de los sistemas centralizados. Consisten en procesos biológicos unitarios, la actividad metabólica de los microorganismos y el contacto con el agua residual crean una masa suspendida, se forman

flóculos los cuales se tratan mediante sedimentadores, una parte se retira y otra entra de nuevo al sistema para que la masa biológica permanezca. Los microorganismos permanecen suspendidos gracias a la aireación (transferencia de oxígeno). Lo que se pretende es remover la materia orgánica en términos de DBO_5 . Existen variantes de estos procesos tales como las lagunas aireadas, la diferencia es que en ellas el control de microorganismos es menor, aunque hay mayor tiempo de retención hidráulico que en los lodos (proceso extendido), en la Figura 6 se presenta el diagrama de flujo típico del proceso de lodos activados. La principal desventaja frente a cualquier sistema descentralizado es el consumo de energía en el proceso de aireación, la complejidad de recuperación de lodos para reciclarse y costos operativos en la automatización del equipo si existe, equipos de bombeo e insumos químicos.

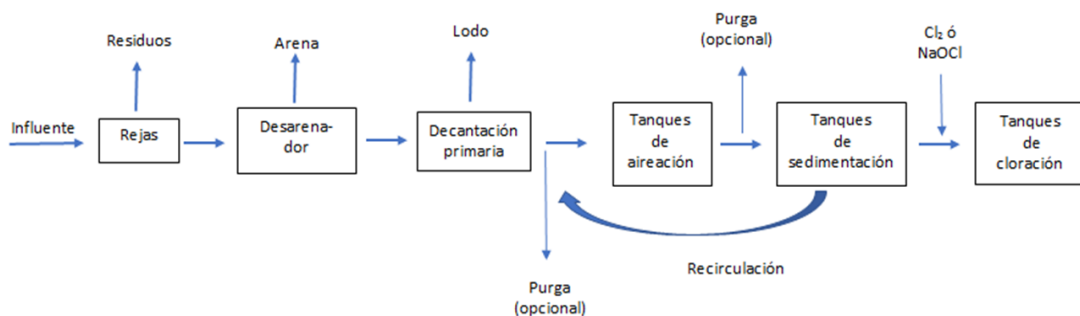


Figura 6. Proceso convencional de lodos activados en una PTAR (CONAGUA, 2019; Tilley *et al.*, 2018).

b) Lagunas de estabilización

Son estanques de agua contruidos por el hombre, se clasifican en función de procesos biológicos (Metcalf y Eddy, 2004) y son: aerobias (también conocidas como de maduración), anaerobias y facultativas (sólo se tomará en cuenta esta clasificación debido a que otras variantes, como las lagunas aireadas utilizan energía para la transferencia de oxígeno). En la Figura 7 se esquematizan

las lagunas aerobias, anaerobias y facultativas. La diferencia entre los tres tipos es la profundidad a la que se construyen, las lagunas aerobias son menos profundas (≈ 1 metro) que las lagunas anaerobias ($\approx 3 - 4$ metros), mientras que las facultativas se encuentran en el rango medio ($\approx 1.5 - 2$ metros) (Tilley *et al.*, 2018).

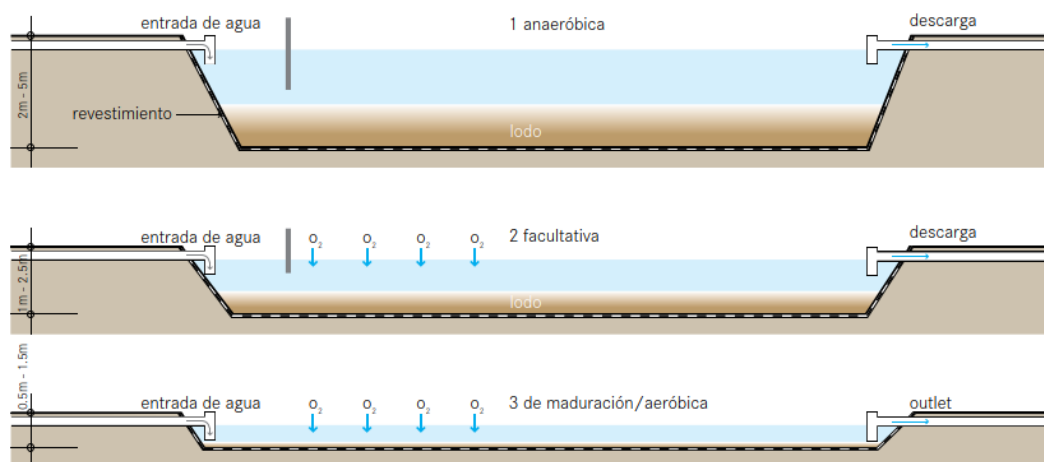


Figura 7. Esquema de los tres tipos de laguna de estabilización: 1. Anaeróbica, 2. Facultativa y 3. Aeróbica o de Maduración (Tilley *et al.*, 2018).

Por su parte, las lagunas anaerobias se diseñan para reducir, materia orgánica biodegradable, las lagunas aeróbicas principalmente para remover patógenos, mientras que las facultativas cumplen para ambos procesos. Gracias al alto tiempo de retención hidráulica (hasta 30 días), la eliminación de materia orgánica es mayor, principalmente se utilizan para remover sólidos sedimentables y DBO_5 , así como patógenos causantes de enfermedades tal como *E. coli*, del grupo de coliformes fecales (Massoud *et al.*, 2009). Son utilizadas en riego de cultivos debido al contenido de nutrientes principalmente en forma de nitrógeno y fósforo, igualmente se aprovechan para acuicultura (dependiendo de la concentración de materia orgánica) que además de

emplearse como actividad económica, los peces controlan el crecimiento algal y de otros microorganismos (Ellis y Mara, 1983; Pescod, 1996). Es recomendable instalarlas en zonas con temperaturas superiores a los 15°C ya que no se puede lograr la eficiencia de remoción a una temperatura menor y por tanto deben diseñarse con áreas de mayor tamaño. Los sitios con viento son convenientes para evitar zonas de estratificación en el estanque y aumentar la transferencia oxígeno, con el objetivo de no usar procesos mecánicos que utilicen energía (aireadores) (Ellis y Mara, 1983). Por otra parte, se requieren grandes extensiones de terreno para su construcción, debido a que su diseño está basado en tasas de carga volumétrica y superficial (DBO_5 y sólidos suspendidos) y generalmente se tienen que instalar en serie (Mburu *et al.*, 2013).

En la Tabla 7 se comparan las ventajas y desventajas de estos sistemas. Entre las ventajas se encuentran el uso restrictivo de energía para su operación y tiempo de retención hidráulico de 7 a 30 días, otros usos, tal como en la acuicultura, y no solo para remover materia orgánica y patógenos. Entre las desventajas, el área que ocupan, la producción de olores y menor eficiencia en zonas no tropicales.

Tabla 7. Principales ventajas y desventajas de las lagunas de estabilización. (CONAGUA, 2019).

Unidad	Ventajas	Desventajas
Lagunas de estabilización	<ul style="list-style-type: none"> • No requiere de energía, con excepción de adaptaciones, por ejemplo, mezcladores de aire • Reducción de sólidos sedimentables, y patógenos (coliformes fecales y totales, huevos de helminto) y NH_4^+ • Los estanques se utilizan en acuicultura, riego de cultivos, colectores pluviales • Tiempos de retención hidráulico de 7 a 30 días 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor eficiencia en zonas frías con temperaturas $< 15^\circ\text{C}$ • Se requieren extensas áreas de terreno. Alto costo de inversión, esto depende del terreno y calidad del efluente • Producción de olores y mosquitos. Los olores se controlan con circuladores de aire o compuestos químicos (nitrato de sodio) para equilibrar el pH, pero se tiene que considerar en el costo

c) Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA)

Fue desarrollado en Holanda por Lettinga y colaboradores en 1980 con el fin de tratar agua residual con alto contenido orgánico, específicamente del tipo agrícola (Romero-Rojas, 2004; CONAGUA, 2019). Es considerado, junto con el tanque séptico e Imhoff, un sistema anaerobio. El agua es filtrada mediante dos procesos, 1) el descenso y 2) el ascenso del agua. En la Figura 8 a manera de ilustración se muestra el proceso general que ocurre en un RAFA. El agua residual es recolectada en la parte superior del reactor, la cual, desciende a través de una serie de orificios hasta llegar al fondo. Posteriormente el agua asciende a la parte superior a partir de la floculación de lodos en el reactor y la presencia de gas metano; el líquido y el lodo son separados mediante deflectores dispuestos de forma inclinada, mientras que el biogás es capturado a

través de una campana dispuesta en la parte superior del reactor (Romero-Rojas, 2004; Tilley *et al.*, 2018; CONAGUA, 2019). El líquido filtrado es recolectado en la parte superior del reactor (Romero-Rojas, 2004; Tilley *et al.*, 2018; CONAGUA, 2019). Los lodos lo conforman bacterias anaerobias, que llevan a cabo la degradación de compuestos a través de tres procesos, hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis (Romero-Rojas, 2004; Tilley *et al.*, 2018; CONAGUA, 2019). El RAFA se diferencia de un tanque de sedimentación por la existencia de un consorcio microbiano que modifica las características de los sólidos (CONAGUA, 2019). Lo que caracteriza un RAFA es el separador de fases, compuesto por 1) la zona de digestión (inferior) y 2) la zona de sedimentación (parte superior). El agua se introduce en la parte inferior de este separador. Debido a la inclinación de las paredes (deflectores), el área disponible del flujo aumenta a medida que se acerca a la superficie, por tanto, la velocidad del flujo ascendente disminuye en la zona de sedimentación permitiendo la formación de flóculos que sedimentan por gravedad (Romero-Rojas, 2004; Tilley *et al.*, 2018; CONAGUA, 2019). La estabilización del proceso está regulada por la cantidad de metano producida en el reactor (Romero-Rojas, 2004; Tilley *et al.*, 2018; CONAGUA, 2019).

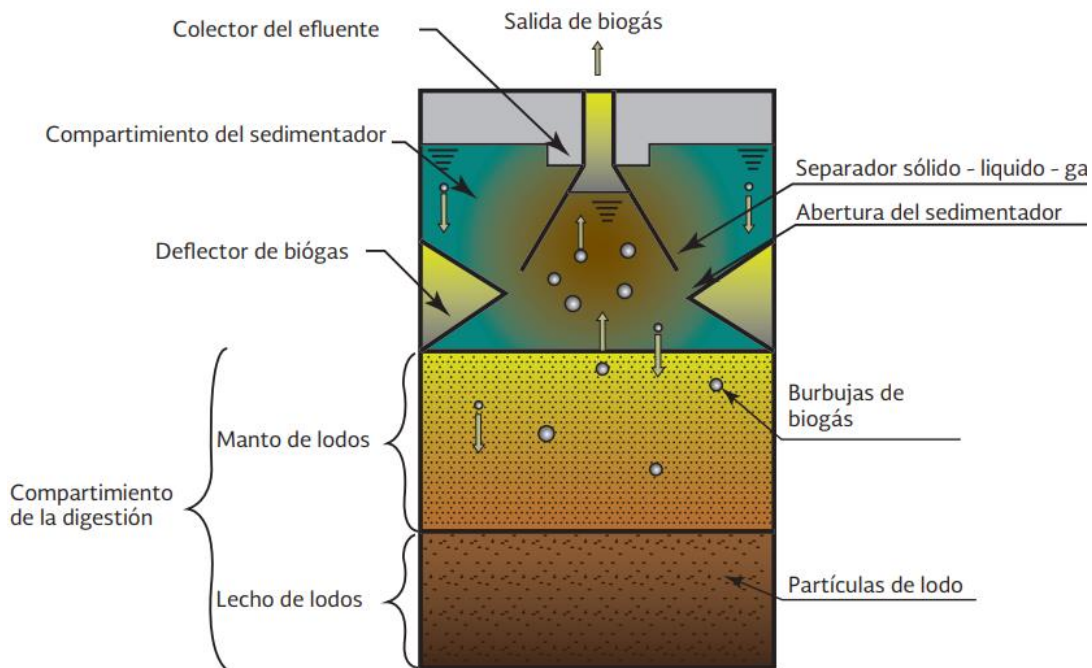


Figura 8. Procesos que se llevan a cabo en un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA) (CONAGUA, 2019).

En la Tabla 8 se mencionan las ventajas y desventajas de dicho sistema. Entre las ventajas se encuentra su uso predominante en afluentes que contienen una concentración alta de nutrientes, usualmente los de tipo agrícola. A su vez se requiere de un tiempo de retención hidráulico de pocos días, generalmente de tres a cuatro días en comparación con otros sistemas como humedales o lagunas de estabilización. Por su parte, en las desventajas se distinguen, el arranque inicial. Este proceso es el más importante ya que todo el procedimiento está basado en la biomasa producida. Ordinariamente se necesita de un tiempo prolongado, ya que, se requiere de la presencia de una alta cantidad de nutrientes que lo promuevan, así como de condiciones óptimas de temperatura, pH y del tipo de agua residual que se introduzca, los afluentes

con alta cantidad orgánica son los ideales para este sistema. El periodo inicial puede tener una duración de 6 a 12 semanas o hasta 6 meses. Lo cual conlleva a otra desventaja que es la presencia de personal capacitado ya que se requiere propiamente la experiencia del diseñador. A su vez, la revisión tanto de los sistemas de distribución como los vertederos deben ser evaluados diariamente. Las grasas deben ser eliminadas en su totalidad ya que provocan espuma y esto interfiere en el proceso. Asimismo, el gas y el lodo deben ser evaluados constantemente, para conocer si el proceso es estable.

Tabla 8. Principales ventajas y desventajas del RAFA (Reactor Anaerobio de Flujo Anaerobio Ascendente) (Romero-Rojas, 2004; Tilley *et al.*, 2018; CONAGUA, 2019).

Unidad	Ventajas	Desventajas
RAFA	<ul style="list-style-type: none"> • No requiere sistemas mecánicos para que el líquido ascienda. • Esencial para tratar efluentes de tipo agrícola debido a la alta cantidad de nutrientes generada en ellos. • Alta reducción de DBO₅ > 90% • Retención de lodos por tiempo prolongado • TRH cortos de 3 a 4 días 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta producción de lodos, se debe realiza un perfil de lodos mensualmente para evitar sobrecargar el reactor • Fase inicial (o de arranque) prolongada • Su funcionamiento requiere de personal capacitado • Eliminación total de grasas • Requiere experiencia en cuanto a diseño y construcción • Los vertedores del flujo de agua tienen que ser limpiados diariamente • Temperatura óptima para el proceso debe ser entre 30° C a 35° C • Eliminación de compuestos tóxicos tales como metales pesados que inhiban el crecimiento de la biomasa • Revisión diaria del sistema de distribución • Elevado costo de mantenimiento debido al material de importación.

d) Tanques sépticos (fosas sépticas)

Se emplean en comunidades rurales o pequeñas edificaciones (hoteles o escuelas) de máximo 350 habitantes y que no cuentan con alcantarillado, tratan principalmente aguas residuales domésticas mediante procesos físicos y biológicos unitarios, principalmente a través de la sedimentación y de metabolismo anaerobio (Tchobanoglous y Burton, 1995; Rosales-Escalante, 2005). Dichos sistemas consisten en tres etapas. En la Figura 9 se representan las dos primeras etapas de un tanque séptico, las cuales consisten en, la primera etapa se basa en un depósito hecho de concreto, fibra de vidrio, PVC o plástico en donde el material sedimentable se decanta, mientras que en la segunda etapa, ocurre la remoción de micronutrientes (fósforo y nitrógeno) y patógenos, cuando el líquido sobrante se infiltra al subsuelo a través de pozos de percolación o zanjas de infiltración, esto depende de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (conductividad hidráulica, digestión anaerobia, porosidad, intercambio catiónico, entre otros) (Rosales-Escalante, 2005; OPS/CEPIS, 2005; Adegoke y Stenström, 2019). En el fondo del tanque persiste material particulado sedimentable, pero solo el 50% es tratado, siendo esta la razón por la cual se efectúa una tercera etapa, la cual se refiere a la remoción, tratamiento y disposición de lodos (OPS/CEPIS, 2005; Adegoke y Stenström, 2019).

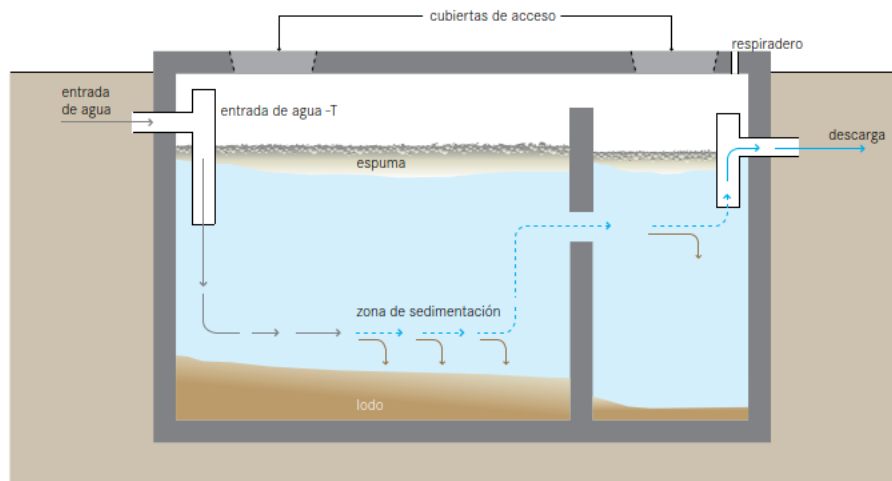


Figura 9. Partes que conforman a un tanque séptico (Tilley *et al.*, 2018).

La principal desventaja de las fosas sépticas es la infiltración, debido a que, si no existen estudios de suelo en la zona, las fosas pueden contaminar acuíferos u otros cuerpos de agua cercanos. Por otra parte, en la superficie del tanque permanecen grasas, aceites y material ligero (poseen menor densidad que el agua). Por ello, es necesario la instalación de trampas de grasa para evitar taponamiento de las entradas y salidas del tanque y acumulación de gases estables como el dióxido de carbono, metano y sulfuro de hidrógeno. Estas fosas se tienen que inspeccionar cada año o cada seis meses si se instalan en escuelas o patios ya que pueden ocasionar explosiones si no se ventila (OPS/CEPIS, 2005; Adegoke y Stenström, 2019). En la Tabla 9 se destacan las principales ventajas y desventajas, entre sus ventajas están el utilizarse como pretratamientos, útiles en zonas rurales que no cuenten con alcantarillado, y tiempo de retención hidráulicos de tres días. Entre sus desventajas, la supervisión debe ser frecuente, su instalación depende de las propiedades del suelo y debe considerarse la presencia de cuerpos de agua para evitar infiltración.

Tabla 9. Principales ventajas y desventajas de las lagunas de estabilización. (Rosales-Escalante, 2005; OPS/CEPIS, 2005; Adegoke y Stenström, 2019)

Unidad	Ventajas	Desventajas
Tanques sépticos	<ul style="list-style-type: none"> • No requiere de energía • Útiles como pretratamiento • Reducción de sólidos sedimentables, DBO₅, patógenos (coliformes fecales y totales, helmintos, norovirus), NH₄⁺ y P • Tiempos de retención hidráulico de hasta tres días 	<ul style="list-style-type: none"> • Supervisión máxima de un año y 6 meses si se instala en escuelas o casas • Necesaria instalación de trampas de grasa • Depende de las propiedades del suelo • Considerar presencia de mantos acuíferos u otros cuerpos de agua

e) Tanque Imhoff

También conocido como tanque de doble cámara consiste en dos compartimentos, en la Figura 10 se observan dichos compartimentos, el primer compartimento se trata de un sedimentador en forma de “V” y el otro en un digestor de lodos con ventiladores para gas, se busca remover sólidos suspendidos (Lazcano-Carreño, 2016; Tilley *et al.*, 2018). Al igual que en las fosas sépticas, los sedimentos precipitan hacia la zona de lodos. La diferencia consiste en que entre un compartimento y otro existe un traslape que impide que los gases y sólidos no sedimentables interfieran con el proceso de digestión y a medida que ascienden son desviados en forma de espuma a los ventiladores (Lazcano-Carreño, 2016; Tilley *et al.*, 2018).

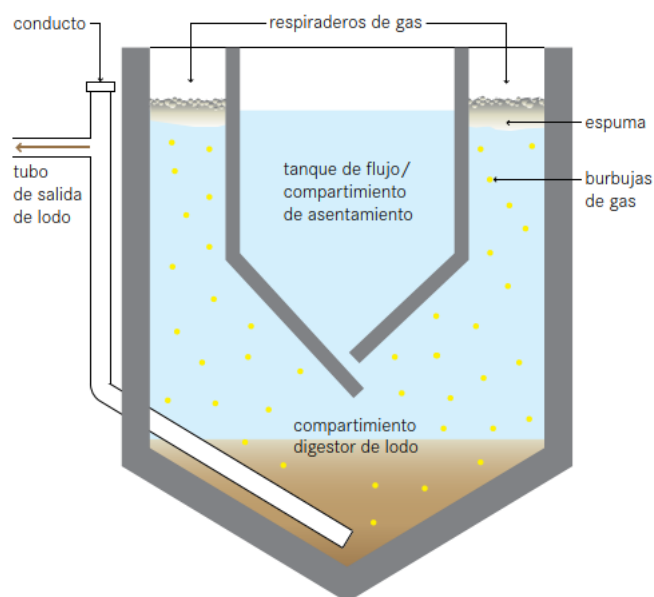


Figura 10. Partes que conforman un Tanque Imhoff (Tilley *et al.*, 2018).

En la Tabla 10 se distinguen las ventajas y desventajas de estos sistemas. Entre las ventajas, el lodo producido se lleva a lecho de secado para su uso posterior en los suelos, esto es gracias a que se mantiene húmedo entre un 90-95%. Otra ventaja es la reducción de sólidos suspendidos hasta un 50-70%. Por otra parte, entre las desventajas, presenta mala

calidad de efluente en términos de carga orgánica, trata sólo entre un 20-30% de la DBO₅, tampoco hay reducción de patógenos debido a la baja actividad aerobia (Lazcano-Carreño, 2016; Tilley *et al.*, 2018). En términos de altura debe considerarse en un sitio no propenso a inundaciones donde el manto freático sea bajo, ya que al aumentar el volumen de agua incrementa la presión en el tanque ocasionando colapso de la estructura (Lazcano-Carreño, 2016; Tilley *et al.*, 2018).

Tabla 10. Principales ventajas y desventajas de los Tanques Imhoff (Lazcano-Carreño, 2016).

Unidad	Ventajas	Desventajas
Tanques Imhoff	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de diseñar, no ocupa grandes áreas (< 1 m²) • Remoción de sólidos suspendidos y sedimentables • Uso de los lodos para suelo • No requiere trampas de grasa • Tiempo de retención hidráulico de 2-4 horas 	<ul style="list-style-type: none"> • Mala calidad de efluente en términos de materia orgánica y reducción de patógenos • Requieren de un postratamiento a base de humedales o lagunas de estabilización • Estructura profunda (> 6 m) • Construcción difícil, considerar zonas con bajo nivel freático y no propenso a inundaciones • Mantenimiento diario de los ventiladores de gas y revisión periódica de lodos (4 a 12 meses) • Necesario rejillas y desarenadores para tratar partículas grandes en el sistema

f) Filtros biológicos

En ellos se asumen procesos físicos y biológicos unitarios. Esencialmente, a través de la adherencia en un material de empaque y actividad metabólica aerobia. Los filtros biológicos tienen por objeto reducir carga orgánica. En la Figura 11 se muestra como están conformados los filtros biológicos, los cuales consisten en lechos filtrantes, los lechos pueden conformarse de grava, PVC, granito, conchas, por mencionar algunos, los cuales se distinguen por su capacidad permeable, generalmente tienen forma circular con sistemas rotarios superficiales de agua (Lazcano-Carreño, 2016; Tilley *et al.*, 2018; CONAGUA 2019). El agua residual se distribuye por este sistema (de ahí el nombre de filtros percoladores o rociadores) hasta llegar al lecho filtrante. En este último comienza a crecer, conforme aumenta la entrada de materia orgánica, una biopelícula de microorganismos generalmente compuesta de bacterias facultativas, promoviendo con ello reacciones bioquímicas (Lazcano-Carreño, 2016; Tilley *et al.*, 2018; CONAGUA 2019).

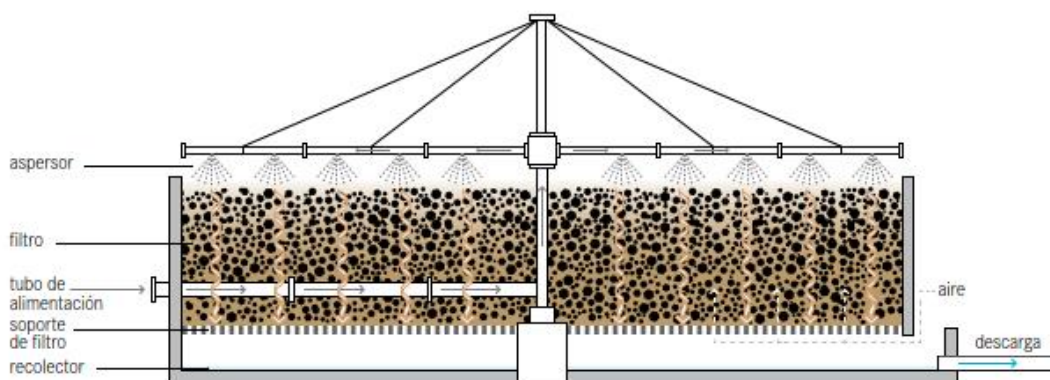


Figura 11. Partes que conforman un filtro biológico (Tilley *et al.*, 2018).

Existen diferentes clasificaciones, y varían de acuerdo a la carga orgánica o hidráulica, y son de baja o alta tasa. Para los primeros, la carga hidráulica permanece constante, y producen efluentes nitrificados y reducidos de DBO₅, no obstante, la masa de la biopelícula aumenta en cuanto a grosor y debe retirarse, mientras que, en los segundos, hay recirculación del oxígeno mediante ventilas de aire, lo cual incrementa la reducción de carga orgánica y retorno de organismos vivos, esto disminuye la acumulación de la biopelícula (Lazcano-Carreño, 2016; Tilley *et al.*, 2018; CONAGUA 2019). En la Tabla 11 se describen las ventajas y desventajas de los filtros biológicos. Entre las ventajas se encuentra el costo del material, éste es asequible y hay diversas variantes, la producción de lodos es menor en comparación con discos biológicos, por otro lado, la principal desventaja es que se requiere energía para el bombeo de agua, la carga de bombeo es igual a la altura del filtro.

Tabla 11. Ventajas y desventajas de filtros biológicos. (Lazcano-Carreño, 2016; CONAGUA, 2019).

Unidad	Ventajas	Desventajas
Filtros biológicos	<ul style="list-style-type: none"> • Apto para zonas rurales • Diversos materiales pueden usarse como lecho filtrante siempre y cuando cumplan ser de bajo costo, permitir circulación del aire y buena relación superficie volumen • Área de construcción son pequeñas, menores que un humedal artificial • Efectivos en alta tasa orgánica pero bajos en remoción de patógenos • Efluentes nitrificantes (alta remoción de nitrógeno) • Baja producción de lodos en comparación con otros procesos 	<ul style="list-style-type: none"> • Atención en la acumulación de carga orgánica puede conllevar a una rápida acumulación de lodos • En los filtros de baja tasa pueden provocar olores y acumulación de mosquitos y caracoles debido a la falta de recirculación • Requieren de energía para promover la recirculación del aire • Requieren de un pretratamiento para evitar taponamiento • Tiempo de retención hidráulico varía desde 15 minutos hasta 5 días

g) Discos biológicos (biodiscos o reactor biológico de discos rotatorios)

Los discos biológicos, siguen el mismo principio que un filtro biológico, en donde el agua residual tiene contacto con una superficie y forma una biopelícula, la diferencia es que el medio de empaque no es estático (Martínez-Deloya, 2001; Menéndez-Gutiérrez y Dueñas-Moreno, 2020). Los biodiscos son estructuras sintéticas de polietileno o polipropileno, y cada uno está sumergido parcialmente en el agua residual y se componen de cuatro secciones, en la Figura 12 se representan dichas secciones. la primera consiste en la entrada de agua que avanza entre cada sección, ésta se mezcla hasta formar una masa, la cual promueve el crecimiento de la biopelícula y la materia orgánica se trata de forma aerobia. En cada sección, el agua se va clarificando, aunque no se debe descartar el uso de un sedimentador (Martínez-Deloya, 2001; CONAGUA, 2019; Menéndez-Gutiérrez y Dueñas-Moreno, 2020).

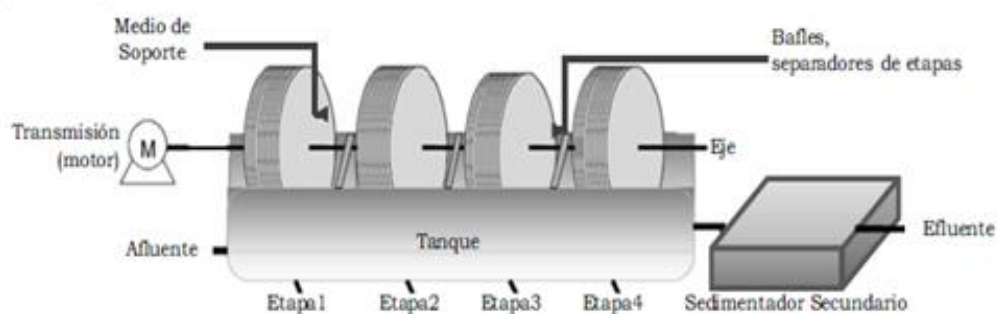


Figura 12. Esquema de un sistema de discos biológicos con sedimentador secundario (Menéndez-Gutiérrez y Dueñas-Moreno, 2020).

Una de las ventajas respecto a los filtros biológicos es que en los biodiscos hay recirculación de aire sin usar ventilas, debido al sistema rotatorio, lo que aumenta la superficie de contacto (principio explicado anteriormente con los filtros biológicos de alta tasa). Otra ventaja es que no hay generación de espuma debido a la formación de gases como en los tanques sépticos ya que hay recirculación de oxígeno. Además, se instalan en soportes de cemento compactos lo que reduce el área de terreno (Martínez-Deloya, 2001;

Menéndez-Gutiérrez y Dueñas-Moreno, 2020). Un problema de este sistema es respecto al costo de inversión, ya que el material es importado, otra es que no existen modelos matemáticos simples que puedan explicar la cinética de remoción y al ser tecnologías relativamente nuevas (en 1960 Alemania fue el primer país en usarlos) no hay parámetros de diseño específicos y varían de acuerdo al autor (Martínez-Deloya, 2001; Menéndez-Gutiérrez y Dueñas-Moreno, 2020). En la Tabla 12 se distinguen las principales ventajas y desventajas. Entre las ventajas se describen que son ideales para tratamiento secundario y efluentes nitrificados, el área de superficie de contacto es alta en comparación con los filtros biológicos, baja producción de lodos y constante formación de biopelícula. Mientras que las desventajas, se considera que el costo de inversión es elevado.

Tabla 12. Principales ventajas y desventajas de los discos biológicos (CONAGUA, 2019).

Unidad	Ventajas	Desventajas
Discos biológicos	<ul style="list-style-type: none"> • No hay formación de espuma • Tratan materia orgánica soluble y coloidal, carbono y nitrógeno • Ideales para tratamiento secundario y efluentes nitrificados • Operación periódica, no requiere retirar el lodo de forma frecuente • Menor área de tratamiento, mayor superficie de contacto • Efectivos en remoción de alta carga orgánica e hidráulica • Baja producción de lodos en comparación con filtros biológicos de baja tasa 	<ul style="list-style-type: none"> • No hay parámetros de diseño efectivos • En cuanto a la cinética de remoción es difícil definirlo ya que en el proceso se presenta tres fases: sólida, líquida y gaseosa • Usa energía para hacer rotar los discos, mayor potencia de electricidad si se requiere aumentar la disponibilidad de oxígeno • Elevado costo de inversión debido al material de importación • Uso de techos en climas fríos • Disminución en la eficiencia de remoción a temperaturas < a 13°C

4. Humedales artificiales

En la Ciudad de México solamente se han implementado dos humedales. Uno se ubica en la Alcaldía Gustavo A. Madero, el cual trata agua residual de una planta de tratamiento que descarga en el lago del Bosque de San Juan de Aragón y el segundo en la Alcaldía Xochimilco, el cual está dirigido al mejoramiento de la calidad de agua de los canales (Martínez-Cruz *et al.*, 2006; Luna-Pabello y Aburto-Castañeda, 2014). Dada la importancia de los humedales artificiales, en este capítulo se aborda su definición para tratamiento de agua residual doméstica (municipal), la clasificación encontrada en la literatura, los mecanismos de remoción y las principales ventajas y desventajas que podrían limitar su uso.

4.1. Definición de Humedales Artificiales

Los humedales artificiales (HA), son sistemas diseñados por el hombre, el concepto está basado en las características físicas, químicas y biológicas de un humedal natural (Stefanakis *et al.*, 2014). Los HA constan de los siguientes elementos: agua, sustrato, vegetación (plantas vasculares y no vasculares) y microorganismos. Entre estos elementos se llevan a cabo la mayor parte de los procesos de remoción de componentes orgánicos. Existe una clasificación general de HA que se basa en el hábito de la planta. Los hábitos de las plantas utilizadas en los HA están se presentan en la Figura 13 y son: macrófitas de libre flotación, con hojas flotantes, emergentes, y sub-emergentes. A partir de esta clasificación se derivan otros tipos. De acuerdo con la entrada del flujo de agua, se denomina Humedal Artificial de Flujo Superficial (HAFS), si el agua fluye por debajo del mismo se le conoce como Humedal Artificial de Flujo Sub-superficial (HAFSS), éste último, de acuerdo a la dirección del flujo, puede ser horizontal o vertical (Brix, 1993; Brix, 2003; Nikolić *et al.*, 2009; Vymazal, 2008a; Vymazal 2008b; Vymazal, 2008c; Vymazal, 2010; Vymazal, 2018; Kumar y Dutta, 2019).

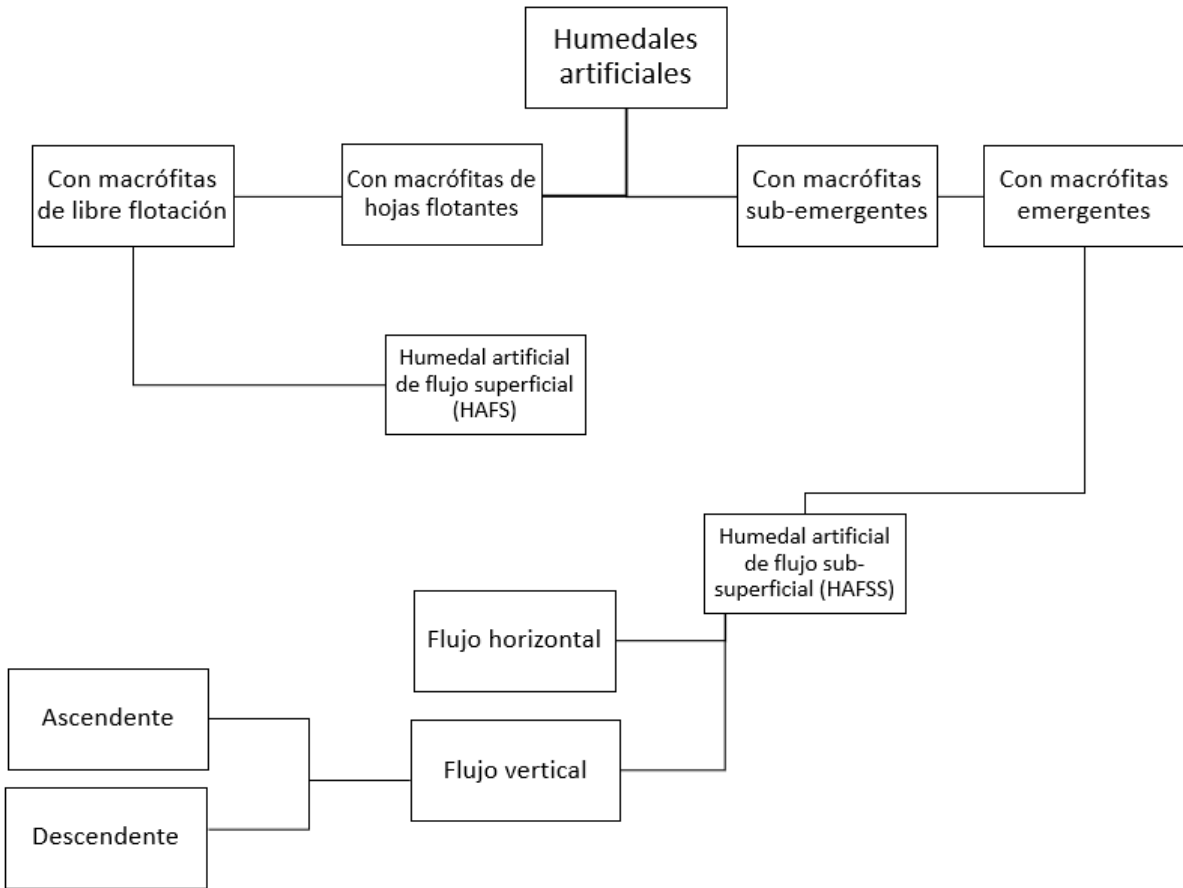


Figura 13. Clasificación de los distintos tipos de humedales. (Brix, 1993; Brix, 2003; Nikolić *et al.*, 2009; Vymazal, 2008a; Vymazal 2008b; Vymazal, 2008c; Vymazal, 2010; Vymazal, 2018; Kumar y Dutta, 2019).

4.2. La Sostenibilidad y los Humedales Artificiales

La escases y contaminación del agua son dos desafíos que se enfrentan las grandes urbes como los es la CDMX, encontrar tecnologías que fomenten una mejora de la calidad del agua para beneficio de la población y mejoramiento de sitios de valor ambiental es necesario. Los HA son tecnologías que son valoradas para el saneamiento sustentable, ya que no solo mejoran la calidad del agua si no a su vez brindan otra serie de beneficios ambientales. Los servicios ecosistémicos se refieren a los beneficios que obtiene la población de los ecosistemas, gracias a la dinámica que en ellos se lleva a cabo. Estos se clasifican en cuatro categorías (Ruskule *et. al.*, 2018):

- 1) Provisión: se obtiene cualquier tipo de alimento, materiales y energía.
- 2) Regulación: aquellos que regulan los procesos en el ambiente, tal como, almacenamiento de carbono, calidad de aire, calidad de agua, moderación de fenómenos naturales, fertilidad del suelo, por mencionar algunos.
- 3) Culturales: se relacionan con la espiritualidad tal como la identidad cultura o la inspiración estética.
- 4) Soporte: se refiere aquellos servicios intangibles que permiten que los otros tipos de servicio se sustenten tal como el hábitat para especies de flora y fauna, ciclo de agua, ciclos biogeoquímicos, producción de oxígeno, entre otros.

Los beneficios ambientales que brindan los HA de acuerdo con esta clasificación se describen en la Tabla 13. En este trabajo se especifica el servicio de depuración de agua residual con los HA para el mejoramiento de la calidad del agua en una ciudad.

Tabla 13. Servicios Ecosistémicos que brindan los humedales artificiales (Moges et. al., 2022).

Provisión	Cultivo de hortalizas, agua para ganado
Regulación	Control de inundaciones, retención de nutrientes, sumidero de carbono, depuración de agua residual
Culturales	Fomento de la educación ambiental, recreación y participación social, centros de investigación
Soporte	Hábitat para la vida silvestre, infiltración de agua al subsuelo

4.3. Humedales artificiales para tratamiento de agua residual doméstica

Tratar agua residual doméstica es un desafío para los países emergentes, no solamente se reconoce obtener agua con una calidad dada o el reúso que de ella se pueda derivar, sino del alcance que puedan tener los tratamientos de bajo costo, fácil mantenimiento y operación. Los HA cumplen con tales características. En esta sección se describirán los humedales para tratamiento de agua residual doméstica y los mecanismos de remoción que intervienen para el nitrógeno, fósforo, materia orgánica suspendida y patógenos tales como virus, bacterias, protozoarios y hongos. En la literatura se destacan solo dos tipos de humedales considerados para tratamiento de agua residual, el HAFS y HAFSS. Sin embargo, dada la clasificación en la literatura, se mencionarán las características de los HA usados para agua residual doméstica.

4.3.1. Humedales Artificiales de flujo superficial

Los humedales de flujo superficial, son una modificación de una laguna convencional, la vegetación y la profundidad son la principal diferencia entre éstos, generalmente entre 0.1 m hasta no más de 0.61 m (Vymazal, 2008c; Delgadillo et al.,

2010; Stefanakis *et al.*, 2014). En la Figura 14, se representa este tipo. El agua está en contacto directo con la atmósfera, la luz UV proveniente de la luz solar contribuye a la eliminación de algunos microorganismos patógenos, tales como, *E coli*, *Salmonella spp* y *Shigella spp* (Shingare *et al.*, 2019). En términos de estética se recomiendan ya que pueden albergar a otros seres vivos como anfibios, peces o aves (Delgadillo *et al.*, 2010). La profundidad del sustrato, varía entre 20-40 cm incluso hasta 80 cm, el tipo de vegetación que se utiliza son las macrófitas subemergentes, emergentes, libres flotadoras y con hojas flotantes (Vymazal, 2008c; Vymazal, 2018).

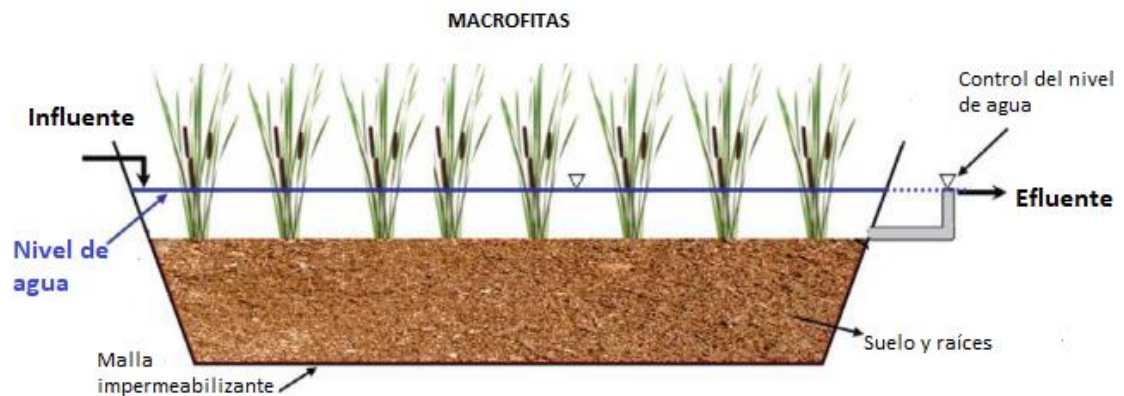


Figura 14. Ilustración de un humedal artificial de flujo superficial (Modificado de Stefanakis, 2014).

4.3.2. Humedales de flujo sub-superficial

En los humedales de flujo sub-superficial agua circula por debajo del sustrato, donde se llevan a cabo la mayor parte de los procesos físicos, químicos y biológicos (Vymazal, 2008b; Vymazal, 2010; Stefanakis *et al.*, 2014; Vymazal, 2018). La vegetación se planta en el medio granular y se incluyen macrófitas emergentes. Se clasifican a su vez, con base en la dirección del flujo, en humedal subsuperficial horizontal y vertical (Vymazal, 2008b; Vymazal, 2010; Stefanakis *et al.*, 2014; Vymazal, 2018).

4.3.2.1. Humedal sub-superficial de flujo horizontal

Los humedales de flujo sub-superficial horizontal tienen forma rectangular, el sustrato que lo conforma generalmente es tierra, arena o grava. En la Figura 15, se representa este tipo. Se utiliza una membrana impermeable la cual impide la infiltración del medio al subsuelo (Vymazal, 2008b; Delgadillo *et al.*, 2010). El agua ingresa permanentemente en la parte superior, y es recogida por un tubo de drenaje en la parte inferior (Delgadillo *et al.*, 2010). En él, hay zonas aeróbicas, anóxicas y anaeróbicas. Las zonas aeróbicas son aquellas compuestas por los rizomas y raíces de las plantas, la zona anaeróbica se encuentra en la zona del sustrato, los procesos son llevados a cabo por microorganismos anaerobios obligados o facultativos (Vymazal, 2008b).

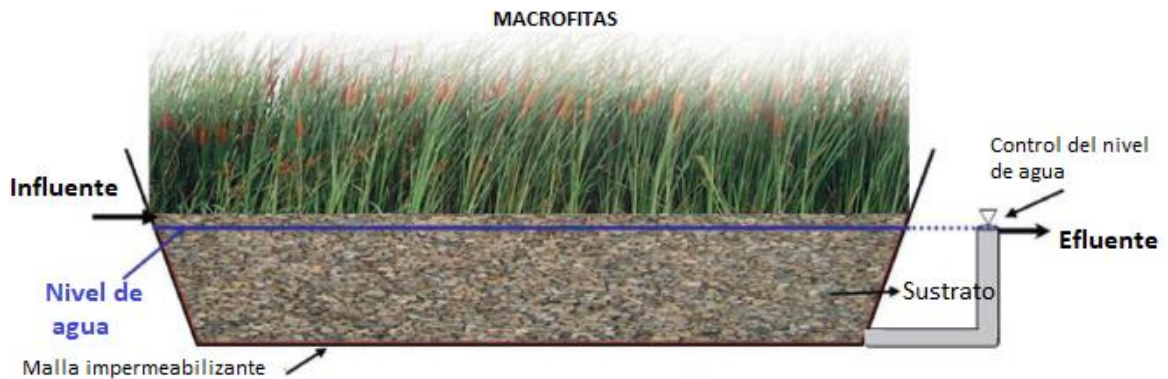


Figura 15. Ilustración de un humedal artificial de flujo sub-superficial horizontal (Modificado de Stefanakis, 2014).

4.3.2.2. Humedal sub-superficial de flujo vertical

Los humedales de flujo sub-superficial de flujo vertical se diferencia de los de flujo horizontal; en la Figura 16, se representa este tipo. El agua ingresa en la parte superior donde es recogida en el fondo de éste, debido a esta forma de distribución del flujo de agua, hay un aumento en la concentración de oxígeno, es decir el medio está saturado, esta característica se le conoce como capacidad de transferencia de oxígeno y permite que la materia orgánica sea oxidada mayormente que en los otros tipos de humedales (Delgadillo et al., 2010; Stefanakis, 2019). Al igual que un humedal horizontal, el sustrato se compone de arena o grava, generalmente se coloca de mayor a menor tamaño de partícula (Delgadillo *et al.*, 2010; Stefanakis, 2019).

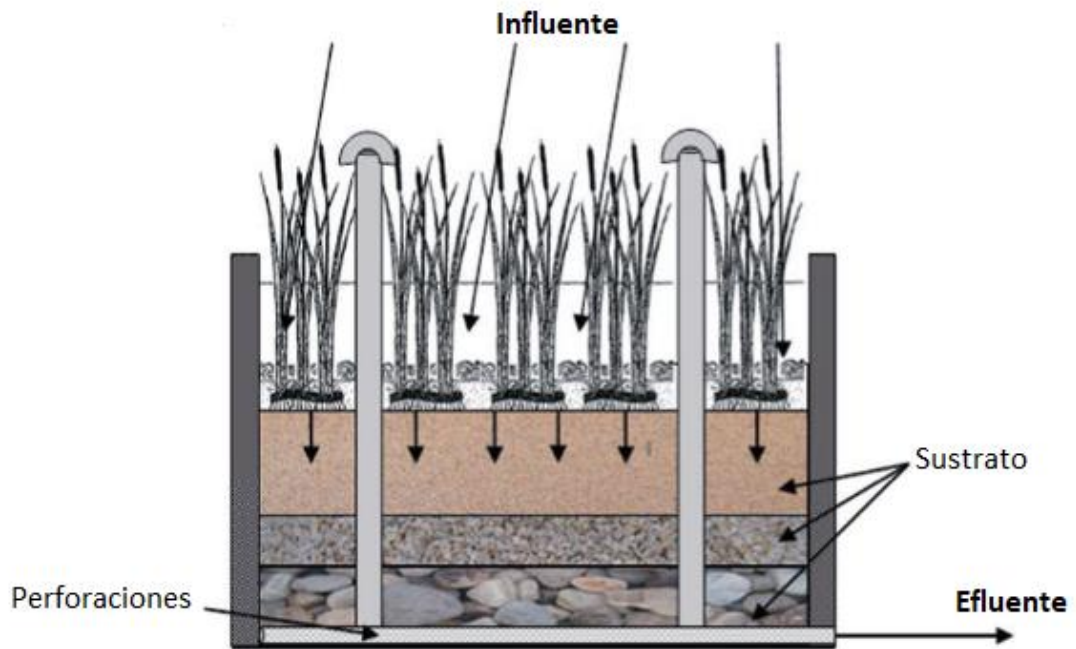


Figura 16. Ilustración de un humedal artificial de flujo sub-superficial vertical (Modificado de Stefanakis, 2014).

4.4. Mecanismos de remoción de nutrientes en humedales artificiales para tratar agua residual doméstica

La interacción entre los diversos componentes bióticos (bacterias, plantas) y abióticos (sustrato, luz, agua) determinan los mecanismos en el tratamiento de los constituyentes del agua residual doméstica. En la Tabla 14 se representan los componentes y sus mecanismos de remoción: 1) físicos, 2) químicos y 3) biológicos.

Tabla 14. Principales mecanismos de remoción de nutrientes en humedales artificiales (Vymazal, 2008; Stefanakis *et al.*, 2014).

Componente	Mecanismo		
	Físico	Químico	Biológico
Sólidos suspendidos	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentación • Filtración 	-	-
DBO₅	<ul style="list-style-type: none"> • Filtración • Sedimentación 	<ul style="list-style-type: none"> • Oxidación 	<ul style="list-style-type: none"> • Metabolismo bacteriano
Fósforo	<ul style="list-style-type: none"> • Filtración 	<ul style="list-style-type: none"> • Precipitación • Adsorción 	<ul style="list-style-type: none"> • Incorporado a la biomasa de macrófitas
Nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> • Volatilización 	<ul style="list-style-type: none"> • Intercambio iónico 	<ul style="list-style-type: none"> • Metabolismo de bacterias • Biomasa de macrófitas • Incorporado a la biomasa de macrófitas
Patógenos	<ul style="list-style-type: none"> • Filtración • Sedimentación 	<ul style="list-style-type: none"> • Radiación UV 	<ul style="list-style-type: none"> • Muerte, depredación • Exposición a biocidas producidas por plantas • Exposición a antibióticos • Internalización entre rizomas y raíces

De cada componente que se presentan en la Tabla 14, a continuación, se describen de manera más detallada los diferentes mecanismos de remoción que se llevan a cabo en los humedales:

1) Sólidos suspendidos (SS): existen dos mecanismos físicos de remoción de los SS, 1) sedimentación y 2) filtración. La sedimentación ocurre de dos maneras, a) independiente y b) por flóculos. Ambas formas dependen de la gravedad, tamaño y forma de la partícula (USEPA, 1999; Norton, 2007; Stefanakis *et al.*, 2014).

a) Sedimentación independiente: se refiere a que las partículas no interactúan con otras y tiene relación con la tasa de sedimentación derivado a partir de la ley de Newton. Esto es, que la gravedad afectará la velocidad de sedimentación de cualquier partícula dentro de un líquido que tenga mayor densidad que éste. Depende totalmente de las características físicas de las partículas y de la viscosidad del líquido (USEPA, 1999; Norton, 2007)

b) Floculación: es el resultado del crecimiento de la partícula debido a la interacción electrostáticas entre las mismas. La velocidad de sedimentación aumentará conforme el tamaño aumente, la formación de flóculos depende de la concentración de la materia orgánica que entre en el sistema (USEPA, 1999; Metcalf y Eddy, 2004).

Por otro lado, la filtración ocurre en las macrófitas y sustrato tal como la grava por tres mecanismos (USEPA, 1999; Norton, 2007; Kadlec y Wallace, Stefanakis *et al.*, 2014):

1. Impacto inercial: depende de la velocidad de las partículas de tal forma que colisionan con el tallo.

2. Deposito por difusión: procesos aleatorios a microescala (movimiento browniano) y macroescala (bioturbación).

3. Intercepción: está relacionado con la adhesión de la materia particulada en el perifiton, el cual es un consorcio de microorganismos (algas, bacterias, hongos e invertebrados) que forma parte del tallo de las hidrófitas.

2) DBO₅ (Demanda bioquímica de oxígeno): la materia orgánica se mide en términos de DBO₅, este parámetro es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua en un periodo de 5 días en condiciones aeróbicas (Stefanakis, 2014). La materia particulada es removida por dos procesos físicos, la sedimentación y la filtración seguida de la hidrólisis; la materia orgánica es descompuesta de forma aeróbica y anaeróbica, aunque la mayor parte de la reducción de materia orgánica se da, principalmente, por bacterias aeróbicas, quimioheterótrofas y quimioautotrófas (Stefanakis, 2014). La degradación de la materia orgánica ocurre en el biofilm a lo largo de las raíces y tallos de las plantas y en la superficie del medio granular (Stefanakis, 2014).

3) Nitrógeno (N): el nitrógeno se encuentra en dos formas, orgánica (aminoácidos, urea, ácido úrico, por mencionar algunos) o inorgánica (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , N_2 , N_2O , entre otros). Existen dos rutas de transformación del nitrógeno, 1) clásica y 2) metabolismo anaerobio bacteriano. En condiciones aeróbicas ocurre la primera, involucra a la amonificación, nitrificación, amonificación, amonificación de nitrato, desnitrificación, fijación, asimilación, adsorción y volatilización. Mientras que la ruta 2, en condiciones anaerobias, la remoción se da principalmente por la reacción nitrificación-desnitrificación parcial ANNAMOX (oxidación anaeróbica de amonio, por sus siglas en inglés) y procesos de Canon (eliminación de nitrógeno completamente autótrofo sobre nitrito) (Vymazal, 2007; Norton, 2007; Stefanakis, 2014). En la Figura 17 se identifican las diferentes transformaciones del nitrógeno en los HA.

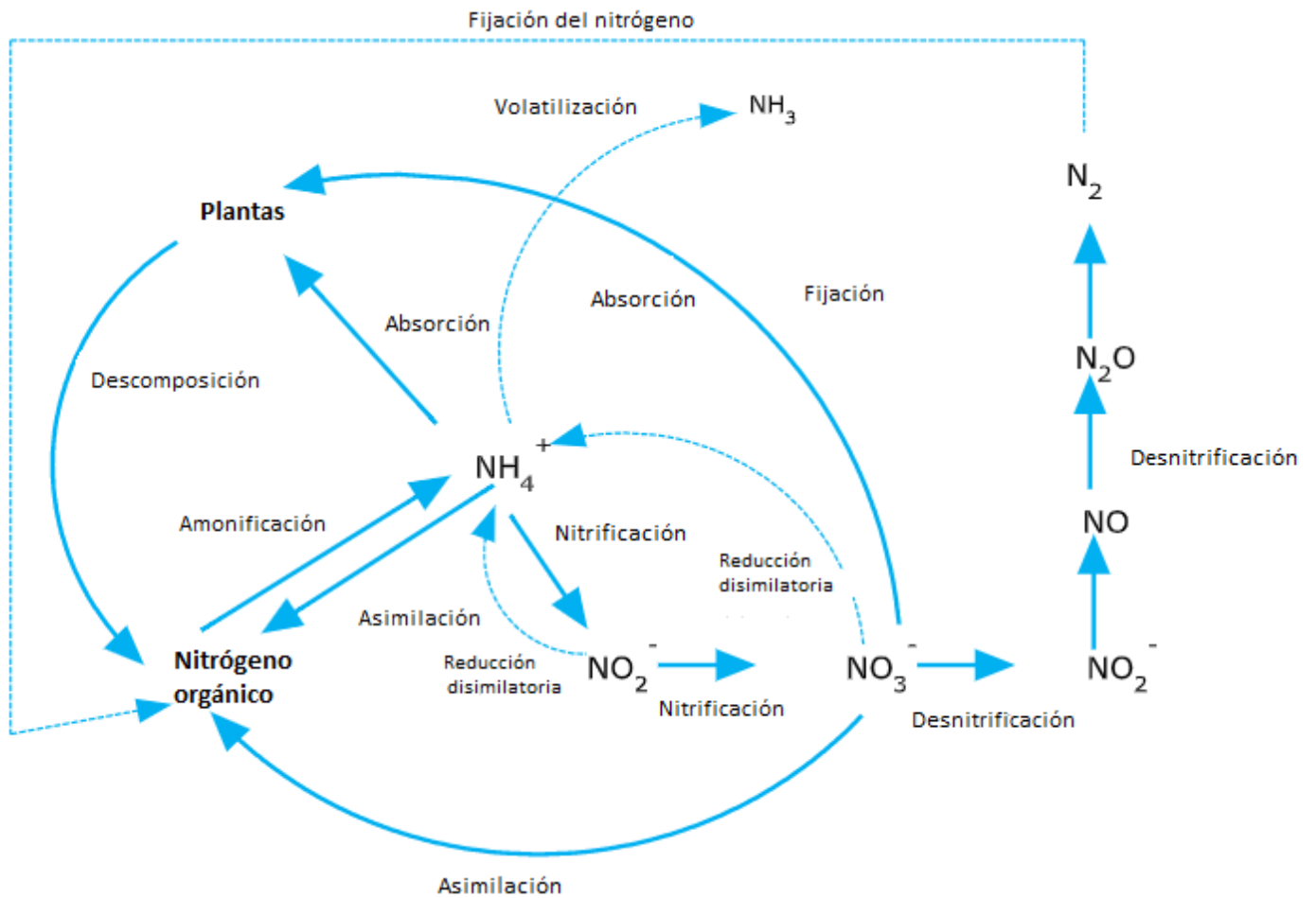


Figura 17. Transformación clásica del nitrógeno en los humedales artificiales (Modificado de Saeed y Sun, 2012).

- 4) Fósforo (P):** el fósforo (P) se encuentra en forma de fosfato (PO_4^{3-}) tanto en su forma orgánica e inorgánica. En la forma orgánica se pueden clasificar en dos tipos, 1) formas que se descomponen fácilmente, se incluyen fosfolípidos, ácidos nucleicos, nucleoproteínas, azúcares fosforilados o polifosfatos orgánicos condensados (coenzimas, ATP, ADP) y 2) formas en las que no se descomponen fácilmente, tales como el inositol fosfato y ácido fítico (Karczmarczyk, 2004; Song *et al.*, 2019). En tanto que la forma inorgánica se encuentra combinado con un metal, ya sea Fe^+ , Mg^+ , Al^+ , por mencionar algunos. Debido a la adsorción y precipitación, la mayor parte del fósforo inorgánico se remueve. La adsorción se refiere al movimiento de P inorgánico en el sustrato hasta acumularse en la superficie, mientras que el segundo es el intercambio iónico entre Fe^+ , Mg^+ , Al^+ y Ca^+ (Karczmarczyk, 2004; Song *et al.*, 2019). Por otro lado, el ortofosfato es incorporado metabólicamente por las algas y macrófitas, lo integran en la fase de crecimiento, éste permanece en los tejidos, hasta que éstas mueren y se reintegra en el ciclo en forma de detritus (Karczmarczyk, 2004; Stefanakis, 2014; Song *et al.*, 2019).
- 5) Patógenos:** el mecanismo físico de la remoción de patógenos principalmente se da a través de la sedimentación, Karim *et al.*, (2004) describieron que la retención de quistes de *Cryptosporidium* spp y *Giardia* spp en el sustrato, se deriva por el tamaño de partícula y tasa de sedimentación; a mayor tamaño de partícula mayor tasa de sedimentación. Aunque también se ha identificado que los virus y bacterias se adhieren al material particulado que existe en el sistema y posteriormente sedimentan. En cuanto al mecanismo químico es debido a la exposición de los rayos UV, Zdragas *et al.*, (2002) demostraron que la radiación solar a una temperatura entre 10°C - 25°C y a una exposición de los rayos UV-B (290-320 nm) y UV-A (320-400 nm) está relacionada con la reducción de coliformes totales y *Salmonella* sp. Respecto al mecanismo biológico, la forma y tamaño de las raíces de las macrófitas son una forma de remoción para los patógenos, ya que son internalizados en las raíces y rizomas. Shingare *et al.*,

(2017) realizaron un estudio comparativo entre *Typha latifolia* y *Cyperus rotundus* -macrófitas utilizadas comúnmente en HA- se encontró que *T. latifolia* es eficiente para remover bacterias enteropatógenas (*E. coli*, *Shigella* spp. y *Salmonella* spp.) mientras que en *Cyperus rotundus*, lo es en parásitos (huevos de *Ascaris lumbricoides*, quistes de *Entamoeba histolytica* y larvas de *Strongyloides stercoralis*). Esto es debido a que presenta raíces adventicias largas, lo cual proporciona una superficie de adhesión de los parásitos en comparación con *T. latifolia*. Ésta última produce saponinas y fenoles, los cuales se asocian a la producción de antimicrobianos. Éstos últimos se han descrito como otra forma de mecanismo biológico, Varghese *et al.*, (2006) demostraron que los compuestos 1-nonaconasol y acetato de lupeol extraídos de las hojas y flores de *Typha angustifolia* -otra macrófita típica en HA- inhiben el crecimiento de *E. coli*. Además de esto, en los HA, se ha identificado la depredación como control de patógenos dado por protozoarios, copépodos y bacteriófagos (Decamp y Warren *et al.*,1998; Stott *et al.*, 2001; Song *et al.*,2008; Stefanakis *et al.*, 2014).

4.5. Principales ventajas y desventajas de los humedales artificiales en comparación con lagunas de estabilización

Es común que ambos sistemas se basen en lo que ocurre en el ambiente natural y poder reproducirlo en el tratamiento de agua residual, ya que lo que se busca es reducir el uso de energía que se traduce en costos, contaminación y reutilización. Las lagunas de estabilización son el tipo de tratamiento más utilizadas en México (CONAGUA, 2021). Tanto en éstas como en los humedales, el agua es tratada en un estanque. Se podría decir que la principal diferencia de las lagunas y los humedales, es que en las primeras hay vegetación, no obstante, esta particularidad no los diferencia ya que en las primeras también se pueden incluir (CONAGUA, 2019a). La principal diferencia entre ambos es el uso del área, de hecho, el área es uno de los determinantes para llevar a cabo la inversión de cualquier tecnología basada en tratamiento de agua residual, se estima que el 90% de la inversión se basa en el área ocupada (Mburu *et al.*, 2013). Mburu *et al.*, (2013) realizaron una comparación entre ambos sistemas, con base en la población, capital de inversión, área usada, operación y mantenimiento. En ambos casos hubo remoción entre 80% y 90% de DBO₅, COD (carbono orgánico disuelto), nitrógeno amoniacal y sólidos suspendidos totales. En cuanto al fósforo total, las lagunas de estabilización fueron las que presentaron mayor remoción (25% a 30%). Sin embargo, se encontró que las lagunas de estabilización requieren tres veces más el área de un humedal artificial, lo cual aumenta el costo de inversión. Aunque en cuanto al costo de mantenimiento en los HA es mayor ya que hay actividad de poda y retiro de lodo (Mburu *et al.*, 2013). En la Tabla 15 se enfatizan las ventajas y limitaciones de éstos en cuanto a su uso. Entre las primeras se encuentran, requerimiento limitado de energía, simplicidad en construcción, remoción en términos de DBO₅ y SST (sólidos suspendidos totales). En tanto las segundas se muestran el área requerida y la baja eficiencia en climas frío.

Tabla 15. Ventajas y limitaciones de humedales artificiales para tratar agua residual doméstica.

Ventajas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none">• Aptos para remover DBO₅ y SST, patógenos biológicos• Simples en construcción y mantenimiento• Requerimiento limitado de energía (luz solar)• Se mantienen procesos naturales para remover nutrientes	<ul style="list-style-type: none">• Eficiencia varía en diferentes tipos de clima. La eficiencia disminuye en sitios con temperaturas < 15°C• Producción potencial de mosquitos• Inversión continua en cuanto al mantenimiento de poda

5. Descripción de la zona de estudio para implementar el humedal artificial

La Alcaldía La Magdalena Contreras (MC), se localiza en la zona sur poniente de la CDMX, colinda al norte y noreste de la Alcaldía Álvaro Obregón; al este y sur colinda con la Alcaldía Tlalpan y al sureste con el Estado de México. La alcaldía es relativamente nueva, ya que apenas se constituyó a partir de 1929, apareció publicada la Ley Orgánica del Distrito y Territorios Federales, la que en su Artículo 12 hace mención de la jurisdicción de La Magdalena Contreras (La Magdalena Contreras, 2020). Se encuentra dentro de las coordenadas, 19.33212 N, -99.21118 O. No obstante, la situación orográfica de la zona despliega un amplio rango de altitudes, las cuales van desde los 3760 msnm en la zona más alta, hasta los 2450 msnm en su punto más bajo en la zona norte de la alcaldía (Figura 18).

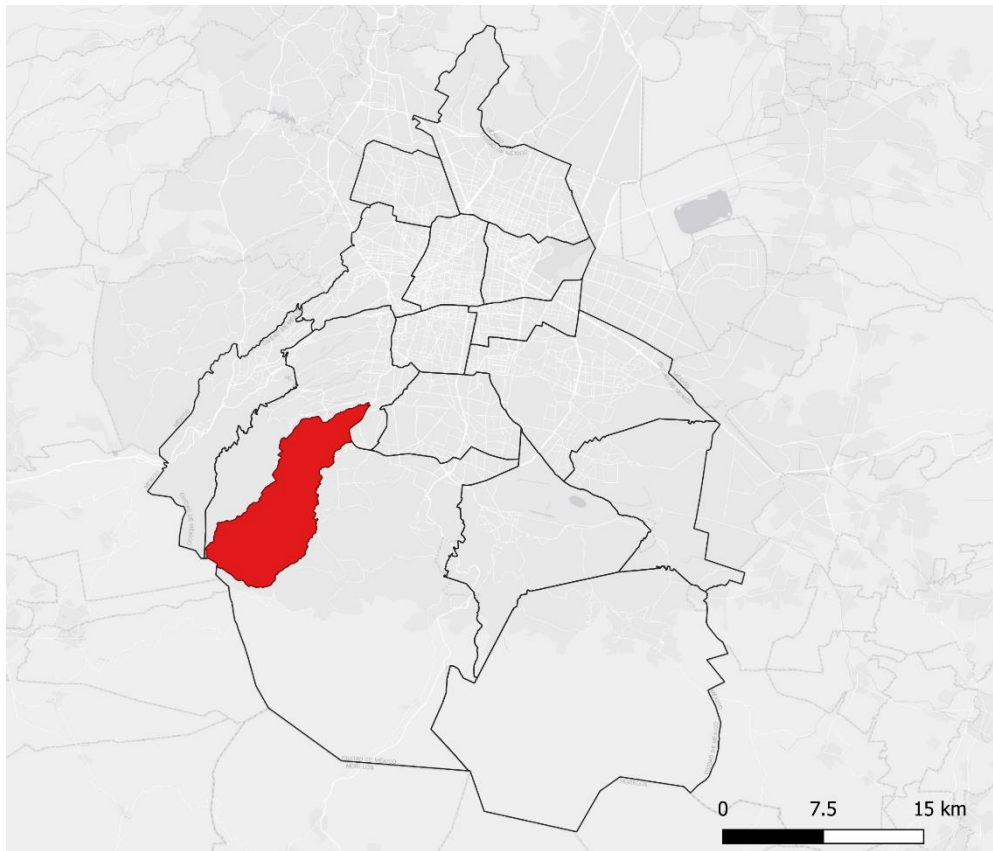


Figura 18. Ubicación de la Alcaldía La Magdalena Contreras, CDMX (Elaboración propia).

La Alcaldía MC posee un suelo mixto, donde conviven zonas habitacionales adaptadas a un entorno de bosque. Debido a las características de cuidado y rescate urbano, se ha determinado que una gran parte de la alcaldía, en particular la parte montañosa, así como la colindante con el Río Magdalena se encuentra catalogada como suelo de conservación de la Ciudad de México, representando alrededor de 5,200 hectáreas de suelo con condiciones naturales y vegetación propia. No obstante, el crecimiento de la mancha urbana ha llevado al desarrollo de asentamientos urbanos (algunos regulados y otros no) a cubrir en la actualidad aproximadamente un 10% de la extensión de la alcaldía (La Magdalena Contreras, 2020).

5.1. Clima

De acuerdo a la clasificación de Köppen, modificado por García (1997), ésta se clasifica como C (E)(w2), siendo así el clima semifrío y frío, el cual prevalece en la mayor parte de la alcaldía, que corresponde aproximadamente al 85% de su territorio (en su parte alta y media), encontrando en la parte más baja un clima templado subhúmedo C(w2) (PAOT, 2005; Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2017). No obstante, de manera general los valores de la temperatura media anual oscilan entre 5 °C y 14 °C (PAOT, 2005; Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2017). El 88% de la superficie ubicada a 2,800 msnm (parte media) presenta temperaturas medias menores a 12 °C, el 12% (parte baja) presenta condiciones templadas y el 5% localizado en la parte alta (3800 msnm) presenta condiciones frías con temperaturas menores a los 5 °C (PAOT, 2005; Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2017). La temperatura máxima se alcanza en la parte baja de hasta 21 °C y 0 °C en la parte alta. La precipitación anual media asociada al clima oscila entre los 1000-1800 mm, entre los meses de mayo a octubre (Hernández-Cerda y Dobler-Morales, 2012).

5.2. Hidrología

La CONAGUA ha definido 757 cuencas hidrológicas, organizadas en 37 Regiones hidrológicas que a su vez se agrupan dentro de las 13 Regiones Hidrológico-Administrativas (CONAGUA, 2019). La Cuenca del Valle de México (CVM) (Región Hidrológica-Administrativa) forma parte de la Región hidrológica del Río Panuco. La CVM, de acuerdo con sus rasgos geomorfológicos, es una cuenca endorreica y se localiza en la parte central del Eje Neovolcánico Transversal, aproximadamente a 2400 msnm, entre las latitudes 19° 03' 14" y 20° 11' 25" norte y las longitudes 98° 11' 42" y 99° 31' 17" oeste (CONAGUA, 2019). Comprende una extensión territorial de 9,689 km² y está delimitada por 105 municipios de tres entidades federativas (México, Hidalgo y Tlaxcala), además de las 16 alcaldías de la CDMX. La CVM agrupa a la microcuenca Magdalena Contreras, la microcuenca se encuentra en la Subregión

Hidrológica del Río Pánuco, dentro de la cuenca del Río Moctezuma, subcuenca de los lagos Texcoco y Zumpango. Los principales cuerpos de agua superficial son: los ríos Magdalena, Eslava y Coyotes (San Jerónimo), además se encuentran arroyos y manantiales que alimentan a los ríos. El Río Magdalena es el principal río de la alcaldía ya que es utilizado para el aprovechamiento de actividades económicas.

El Río Magdalena se localiza al oeste del bosque de Los Dinamos y se origina en la Sierra de Las Cruces, el cauce es mantenido por manantiales, arroyos y escurrimientos superficiales que nacen en la parte alta, tales como La Palma, San Miguel, La Coconetla y Meyuca en su parte oeste, mientras que en la parte este se encuentran los cerros Tarumba, El Aguajito, Piedras Encimadas, Sasacapa y Las Palomas, asimismo en la parte más baja es alimentado por el Río Eslava. El Río Magdalena tiene una longitud de 28.2 km, de los cuales, 14.8 km fluye en la zona boscosa mientras que el restante hacia la zona urbana. Tiene un gasto constante de alrededor de 1 m³/s, su escurrimiento máximo estimado es de 200 m³/s. Parte del caudal del Río Magdalena es captado por la planta potabilizadora I ubicada en el Primer Dinamo. Aproximadamente la quinta parte de su volumen es aprovechado y potabilizado previo a su distribución, el resto atraviesa el área urbana, y funciona como drenaje al recolectar el agua proveniente de colectores marginales hasta llegar a la presa Anzaldo, para después unirse al Río Mixcoac y formar el Río Churubusco.

5.3. Edafología

Dentro de la alcaldía es posible identificar cuatro tipos de suelos: Andosols, Litosols, Feozems y Regosols. La mayor parte del suelo en el cual se desarrolla el área urbana es predominantemente Feozem hálpico en combinación con Litosol (Hh y Hh+I), mientras que en las zonas altas es posible encontrar Andosol húmico, lúvico, ócrico como suelos secundarios (PAOT, 2005). La zona de estudio se encuentra cerca de Los Dinamos. El Parque de los Dinamos, en la actualidad no es reconocido oficialmente por la CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas) como

un Área Natural Protegida (ANP). No obstante, Jujnovsky *et al.*, (2003), indican, que, dadas sus características ambientales, principalmente la de proveer agua limpia a la ciudad, debe considerarse como una ANP. El Parque de los Dinamos, cuenta con una extensión de dos mil 429 hectáreas de bosque. Este sitio se caracteriza mayormente por el suelo de tipo Andosol, los cuales se originan a partir de cenizas volcánicas. Los suelos de tipo Andosol son de color negro (aunque a veces pueden presentar un color claro), suelen ser ligeros, susceptibles a erosionarse y presentan una mediana permeabilidad. En la zona hay otros subtipos de Andosol; mólico, húmico y ócrico. El predominante es el suelo húmico.

5.4. Vegetación

De acuerdo a PAOT (2005) y Jujvnosky *et al.*, (2003), los casi 30 km² de su superficie tienen un uso de suelo predominantemente boscoso. En la zona es posible encontrar bosque mixto y bosque mesófilo de montaña, encontrando *Abies religiosa* “oyamel” (49% del territorio), que poseen una altura entre 20-40 m, los cuales se desarrollan entre los 2,700 y los 3,200 msnm en suelos bien desarrollados (Andosols) y medias pluviales entre 900 y 1500 mm, así como un régimen térmico entre 10° C y 14 °C (clima subhúmedo y semifrío). Dentro de este bosque se encuentra también vegetación primaria de tipo herbácea, tal como zacate, zacatón, navajita y *Arbutus xalapensis* “madrño”, *Alnus firmifolia* “aile”, seguido de otra vegetación arbórea, tal como encino (*Quercus* sp.) y *Juniperus deppeana* “enebro” ocasionalmente.

El bosque de *Pinus hartwegii* “Pino” ocupa el 29% del territorio, los cuales presentan entre 8 y 15 m de altura, aunque también existen otras pináceas, tales como *P.rudis*, *P. leiophyla*, *P montizumae* y *P. teocote*. Se desarrollan en suelos tipo Androsols y también en Litosols, se ubica entre los 3,300-4,100 msnm con condiciones de temperatura promedio 8 °C, heladas nocturnas y suelo poco evolucionado. Finalmente hay presencia de *Quercus* sp. “Encinos”, tales como *Q. texcocana*, *Q. crassipes*, *Q. rugosa*, *Q. mexicana*. El estrato arbustivo de la zona se caracteriza por *Senecio* spp., *Arctostaphylos* spp, *Arbutus* spp. y *Salix* spp.

6. Objetivos

6.1. Objetivo General

1. Elaborar una propuesta de saneamiento descentralizada que atienda la problemática ambiental relacionada con la calidad del agua del Río Magdalena.

6.2. Objetivos particulares

1. Caracterizar la calidad físico-química del efluente de la PTAR Magdalena Contreras mediante una base de datos histórico con la NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997 y NOM-127-SSA1-1994.
2. Identificar los usos potenciales que el efluente de un sistema descentralizado pueda brindar en la Alcaldía La Magdalena Contreras.
3. Diseñar de manera conceptual una propuesta de tratamiento descentralizado por medio de ecotecnias centradas en humedales artificiales a partir de un efluente generado en la PTAR Magdalena Contreras.

7. ALCANCES

El presente trabajo propone una alternativa para dar una solución a la problemática de la calidad y cantidad de contaminantes que se descargan al Río Magdalena. El Río Magdalena es importante por los servicios ambientales que ofrece; dota de agua para abastecimiento público a la CDMX, provee hábitat, fomenta el ecoturismo la dotación de agua para abastecimiento público, calidad de agua, belleza escénica y herencia cultural. Parte del cauce del Río Magdalena hasta la fecha se encuentra amenazado. En este trabajo se busca una alternativa para su saneamiento introduciendo el concepto y concepción de un sistema descentralizado, el cual conjunte elementos tecnológicos, científicos y sociales con un fundamento ambiental, y que otorgue beneficios tangibles e intangibles a la sociedad y al lugar mismo donde se prevé su instalación. Se pretende que cualquier ecotecnia para saneamiento descentralizado sea elegida bajo las tres esferas de la sostenibilidad: ambiental, social y económico.

8. MÉTODO

La metodología del estudio se llevó a cabo en tres etapas, las cuales se esquematizan en la Figura 19. La primera etapa consistió en caracterizar y conocer la calidad del agua residual; la segunda etapa en conocer el uso potencial del agua residual en la zona y la tercera etapa en el diseño la cual se justificó una vez que se conoció qué tipo de tecnología descentralizada se pretende instalar. Cada una de estas etapas son descritas en las secciones siguientes.

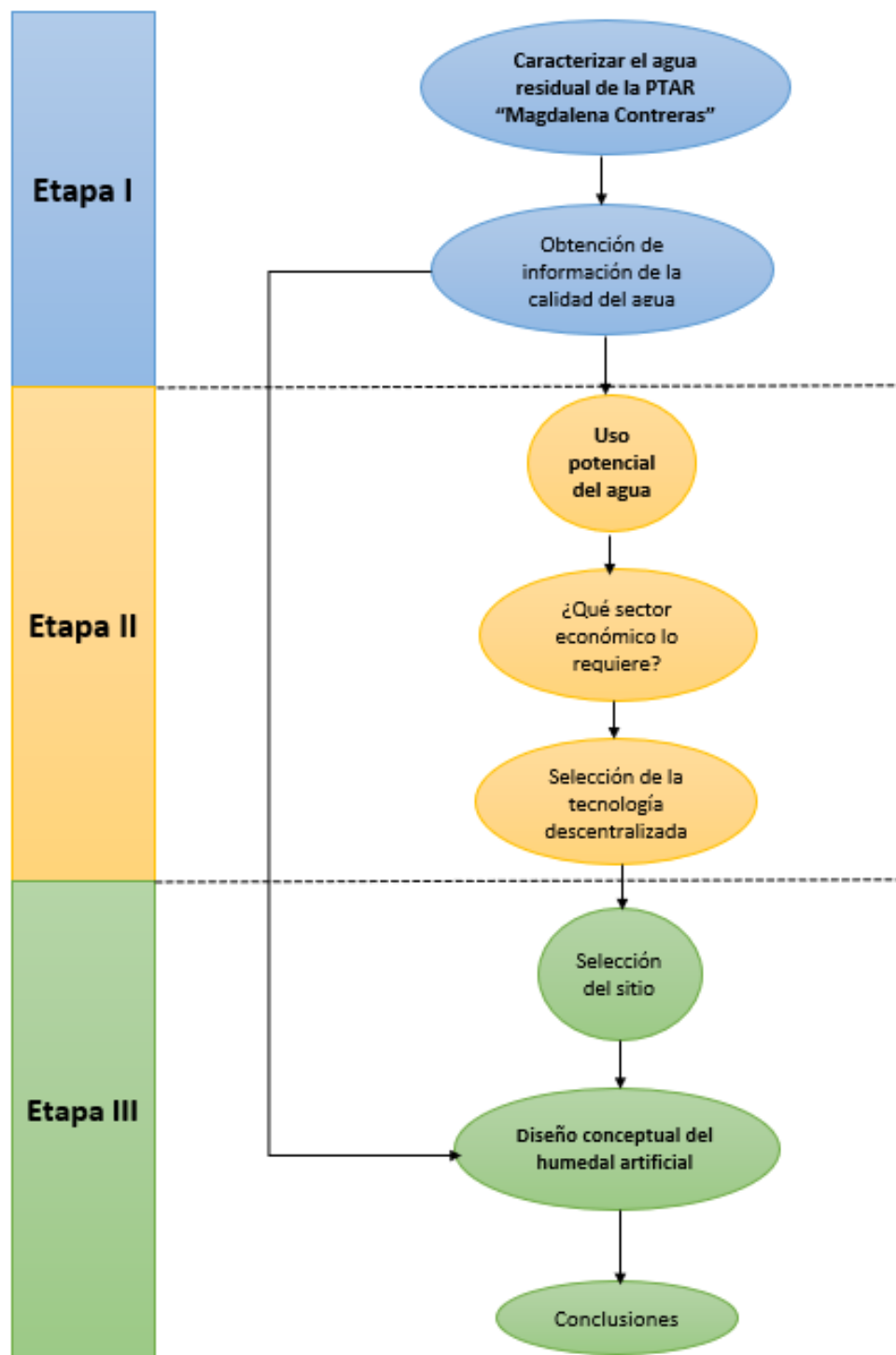


Figura 19. Esquema de la estrategia del trabajo.

8.1. Etapa I. Caracterización del agua residual

En esta etapa se buscó conocer y caracterizar el agua residual, ya que, resulta relevante para definir un sistema de saneamiento descentralizado (USEPA, 2000; Serrano y Corzo, 2008; Kadlec y Wallace, 2009). Las características del agua residual son reguladas por la normatividad ambiental en términos de sus características físicas, químicas y biológicas, los cuales definen sus usos de acuerdo a los límites máximos permisibles (LPM) de calidad en tiempo y condiciones locales (Metcalf y Eddy, 2004). De acuerdo con su composición se determinan los objetivos de tratamiento, es decir, los componentes que se requieren remover y el tipo de reúso que se pretende dar (Metcalf y Eddy, 2004).

Para identificar el tipo de agua residual de la PTAR Magdalena Contreras se procedió a calcular la relación DBO_5/DQO . En la Tabla 16 se muestra la definición de ambos parámetros. Esta relación se utiliza para 1) determinar el nivel de contaminación del agua y sus efluentes; resultando en las condiciones de biodegradabilidad y 2) caracterizar el tipo de agua residual. La relación varía de acuerdo al tipo de efluente de agua residual que se trate, además, es una medida de la calidad de las aguas residuales a medida que pasan por distintas unidades de una PTAR (TECNAL, 2022). A continuación, se muestran los indicadores de la relación DBO_5/DQO :

- 1) Relación DBO_5/DQO baja (<2.5): la fracción biodegradable es elevada, siendo indicado el uso de tratamiento biológico.
- 2) Relación DBO_5/DQO intermedia (2.5-4.0): la fracción biodegradable no es elevada. Se recomienda realizar pruebas de tratamiento para validar el uso del tratamiento biológico.
- 3) Relación DBO_5/DQO elevada (>4.0): la fracción no biodegradable presente en el efluente es elevada. No se recomienda utilizar un sistema biológico sino un tratamiento físico-químico.

Tabla 16. Definición de DBO₅ y DQO (Von Sperling, 2014, citado en TECNAL, 2022).

	DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno)	DQO (Demanda Química de Oxígeno)
Definición	Cantidad de oxígeno consumido por microorganismos durante la descomposición de la materia orgánica en condiciones aeróbicas	Cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación total de la materia orgánica
Descomposición	Proceso de oxidación biológica	Proceso de oxidación química
Capacidad de oxidación	Capaz de degradar detritus y desechos orgánicos del agua	Capaz de degradar residuos industriales

Se trata de agua residual doméstica cuando la relación DBO₅/DQO en agua residual doméstica se encuentra dentro del rango 1.7-2.2; para las aguas residuales industriales la relación varía ampliamente; y para las aguas residuales municipales no tratadas esta relación varía entre 1.2-2 (Metcalf y Eddy, 2004; Von Sperling, 2014, citado en TECNAL, 2022).

8.1.2 Obtención de información y datos de calidad del agua residual

Los datos de la calidad de agua fueron obtenidos de una base de datos histórica del año 2014-2019. La base de datos fue proporcionada por la Secretaría de Ciencia, Tecnología y Educación de la CDMX (SECTEI). Se utilizó con el fin de determinar las características prevalentes en el sitio en el cual se desea implementar la tecnología. Los datos se evaluaron de manera anual, para cada parámetro se calcularon los siguientes valores estadísticos descriptivos: a) media, b) valores mínimos y máximos y c) la desviación estándar. La desviación estándar se calculó para conocer la dispersión de los datos; los valores máximos y mínimos, se calcularon para determinar la capacidad máxima del sistema de tratamiento descentralizado de agua residual aplicado. Lo anterior, ya que la PTAR Magdalena Contreras que pretende ser empleada como fuente de suministro para el sistema basado en una tecnología descentralizada, debe cumplir con dicha calidad en su efluente. Una vez calculados, con el objeto de determinar la calidad prevalente del agua residual se comparó el valor de la media de cada parámetro con los LPM de las normas ambientales mexicanas: la NOM-127-SSA1-1994 1994 (Diario Oficial de la Federación, [DOF], 1995), NOM-001-SEMARNAT-1997 (DOF, 1996) y la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1998).

Debido a que la ecotecnia solo es una propuesta y de ella pueden derivar diversos usos potenciales tales como la descarga de agua residual tratada al Río Magdalena, el uso en cultivos para plantas ornamentales, sanitarios, riego de áreas verdes o para formar parte del tren de tratamiento para su potabilización, los parámetros indicativos propuestos en Metcalf y Eddy (2004) fueron comparados con lo señalado dentro de la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 1995) (esta norma actualmente se encuentra derogada y su actualización se encuentra publicada DOF 2022), que establece los límites máximos permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización, la NOM-001-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de

contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (DOF,1997) (esta norma actualmente se encuentra derogada y su actualización se encuentra publicada en el DOF 2022); debido a que este estudio se llevó a cabo en el periodo de 2020-2021, no se tomaron en cuenta los proyectos de ambas normas previo a su publicación en el DOF 2022. Asimismo, se evaluaron los parámetros de calidad de agua de acuerdo a la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF,1998) que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Los parámetros analizados de cada norma se compararon a través de la media y el LMP, y se presentaron en gráficas indicando si excede o no dicho LMP. En la Tabla 17 se destacan los parámetros descritos por Metcalf y Eddy (2004) así como el LMP de cada norma ambiental. Así entonces, se seleccionaron aquellos parámetros que componen el agua residual identificada que se describen a continuación (Metcalf y Eddy, 2004):

Sólidos totales (ST). - Alude tanto a los sólidos que permanecen en suspensión como a los diluidos.

Sólidos disueltos (SD). - Es el material soluble constituido por materia orgánica e inorgánica que permanece como residuo después de evaporar y secar una muestra previamente filtrada a través de un filtro de fibra de vidrio con poro de $1\ \mu\text{m}$ a una temperatura de $105\text{-}^{\circ}\text{C} \pm 2\text{-}^{\circ}\text{C}$.

Sólidos Fijos (SF). - Cantidad de materia que se forma como residuo a partir de la incineración de los sólidos volátiles (SV).

Sólidos Volátiles (SV). - Cantidad de materia orgánica e inorgánica que se volatiliza por el efecto de la calcinación a $550\text{-}^{\circ}\text{C} \pm 50\text{-}^{\circ}\text{C}$.

Sólidos suspendidos totales (SST). - Es el material constituido por los sólidos sedimentables, los sólidos suspendidos y coloidales que son retenidos por

un filtro de fibra de vidrio con poro de 1,5 μm secado y llevado a masa constante a una temperatura de $105\text{-}^{\circ}\text{C} \pm 2\text{-}^{\circ}\text{C}$.

Sólidos sedimentables. - Cantidad de sólidos que en un tiempo determinado se depositan en el fondo de un recipiente.

Demanda Bioquímica de Oxígeno, 5-d, 20°C (DBO₅). - Es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua en un periodo de 5 días en condiciones aeróbicas.

Los parámetros DBO₅, SST, ST, SDT, sólidos sedimentables, se evaluaron bajo la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF,1997) y la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF,1998). La DBO₅ y los SST, son parámetros relevantes ya que a partir de ellos se puede calcular la carga orgánica para un sistema de tratamiento. Además, son utilizados como línea base para el control de calidad de un proceso de tratamiento (Metcalf y Eddy, 2004).

Demanda Química de Oxígeno (DQO). - Medida del contenido total de la materia orgánica a partir de la cantidad necesaria para su completa oxidación.

Nitrógeno total (N). - Lo componen los compuestos nitrogenados tanto orgánicos (aminoácidos y proteínas) como inorgánicos (NH_4^+ , NH_3^+ , NO_3^- , NO_2^-).

Fósforo total (P). - Lo componen los compuestos tanto orgánicos (polifosfatos) como inorgánicos.

Grasas y aceites. - Son los compuestos orgánicos constituidos principalmente por ácidos grasos de origen animal y vegetal, así como de hidrocarburos de petróleo que son extraídos de la muestra utilizando hexano como solvente

Compuestos orgánicos volátiles (COV). -Son compuestos orgánicos que tienen un punto de ebullición menor o igual a 100- °C o una presión de vapor mayor a 1 mm Hg a 25- °C.

Coliformes totales (CT). - Son bacterias gram negativas, con forma de bacilos, aerobios o anaerobios facultativos capaces de crecer a 35- °C en un medio líquido de lactosa, producen ácido y gas en un periodo de 48 horas. El grupo lo conforman, entre otros, *E. coli*, *Enterobacter spp.*, *Citrobacter spp.*, *Klebsiella spp.*

Coliformes fecales (CF) o coliformes termotolerantes. - Son un subgrupo de los CT. Tienen las mismas propiedades fermentativas que los CT. La diferencia con los CT radica en su capacidad de adaptarse a temperaturas >45-°C y son indol-positivas. El grupo lo conforman en su mayoría *E. coli* y *Klebsiella spp.*

Los datos estadísticos de cada parámetro se representaron en tablas y gráficos para evidenciar la situación del cumplimiento con las normas antes mencionadas Así entonces, se seleccionaron aquellos parámetros que componen el agua residual identificada que se describen a continuación (Metcalf y Eddy, 2004):

Tabla 17. Parámetros asociados a agua residual doméstica (Metcalf y Eddy, 2004).

Componente	Unidad	Límite máximo permisible de acuerdo con la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF,1998) (mg/L)			
		Límite máximo permisible de acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 1995) (mg/L)	Límite máximo permisible NOM 001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997) (mg/L)	Servicios al público con contacto directo	Servicios al público con contacto indirecto u ocasional
Sólidos totales (ST)	g/L	NP	NP	NP	NP
Sólidos disueltos (SD)	g/L	1000	NP	NP	NP
Sólidos Fijos (SF)	g/L	NP	NP	NP	NP
Sólidos Volátiles (SV)	g/L	NP	NP	NP	NP
Sólidos suspendidos totales (SST)	g/L	NP	NP	NP	NP
Sólidos sedimentables	g/L	NP	2	NP	NP
Demanda Bioquímica de Oxígeno, 5-d, 20°C (BDO ₅)	g/L	NP	75	20	30
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	g/L	NP	15	NP	NP
Nitrógeno total (N)	g/L	NP	40	NP	NP
Fósforo total	g/L	NP	NP	NP	NP
Grasas y aceites	g/L	NP	15	NP	NP
Compuestos orgánicos volátiles (COV)	g/L	NP	NP	NP	NP
Coliformes totales (CT)	UFC ó NMP/100 mL	Ausentes o no detectables	NP	240	1000
Coliformes fecales (CF) o coliformes termotolerantes	UFC ó NMP/100 mL	Ausencia o no detectables	NP	NP	NP
Ooquistes de <i>Cryptosporidium</i> sp.	UFC ó NMP/100 mL	NP	NP	NP	NP
Quistes de <i>Giardia lamblia</i>	UFC ó NMP/100 mL	NP	NP	NP	NP

NP: No presentado

Además de los parámetros anteriores, se evaluaron los minerales que pudieran presentarse en el agua residual. Metcalf y Eddy (2004) destacan que, la presencia de minerales en el agua residual tales como bicarbonatos (HCO_3^-), cloruros (Cl^-), Sodio (Na^+), Magnesio (Mg^{2+}), entre otros, procede de la infiltración de agua derivada de los componentes tales como rocas, suelo o detritus, de manantiales existentes, de los acuíferos o bien procesos derivados de la descarga del ramo industrial. Lo anterior fue necesario, ya que a la fecha en la PTAR Magdalena Contreras se tiene un desconocimiento de origen de los aportes que llegan a la planta. A continuación, se presenta una breve descripción de cada parámetro descrito en Metcalf y Eddy (2004):

Bicarbonato y carbonato (HCO_3^- , CO_3^-). - Ambos iones son usados para medir la alcalinidad del agua. La NMX-AA-036-SCFI-2001 define a la alcalinidad como “la presencia de sustancias en el agua que generan como producto de su hidrólisis el ion hidroxilo (OH^-), tal como las bases fuertes y los hidróxidos de los metales alcalinotérreos; carbonatos y fosfatos; boratos y silicatos”. Si bien, no es de importancia a nivel de salud pública, sí lo es en tomas de abastecimiento ya que un exceso provoca precipitados en las tuberías.

Cloruros. - La NMX-AA-073-SCFI-2001 se refiere al ion cloruro como el producto resultante de la lixiviación de rocas y suelos, de procesos industriales y de agua residual doméstica; también se produce por intrusión salina a cuerpos de agua superficiales. La presencia de cloruros llega a disminuir la dureza del agua. Su medición en agua tratada es importante ya que puede dañar las estructuras metálicas del sistema de abastecimiento y si el agua es usada para riego puede causar deterioro en la calidad del suelo.

Ion Sulfato (SO_4^-). – En la NMX-AA-074-SCFI-2014 menciona que este ion se encuentra de manera natural en aguas superficiales y residuales. En el proceso de degradación de las proteínas, el elemento azufre es liberado. Las bacterias

anaerobias lo reducen a sulfuros y sulfuros de hidrógeno (H₂S). En el tratamiento de aguas residuales, los sulfatos son reducidos en el proceso de lodos, pero si excede 200 mg/L puede ser alterado (Metcalf y Eddy, 2004).

Cationes. Calcio (Ca⁺), Magnesio (Mg⁺) y Sodio (Na⁺). - Los iones calcio y magnesio están asociados a una propiedad del agua denominada “dureza”. La NMX-AA-072-SCFI-2001, define a la dureza como la capacidad que tiene el agua para precipitar el jabón.

Aluminio (Al). - La presencia de aluminio en agua residual tratada se debe principalmente a su uso como floculante. Su presencia en altas cantidades es perjudicial para el ambiente y la salud pública (Metcalf y Eddy, 2004).

Fluoruros (F⁻). - La NMX-AA-077-SCFI-2001 establece que estos iones se encuentran de forma natural en el agua, no obstante, se forman complejos con elementos tales como el aluminio, silicio o el boro, los cuales son derivados de la industria del acero, aluminio, fertilizantes, esmaltes y vidrios, por mencionar algunos; son perjudiciales para la salud pública.

Boro (B). - La NMX-AA-063-SCFI-2001 destaca que este elemento se encuentra de forma natural en el agua, sin embargo, su presencia en agua potable puede ser perjudicial para el ser humano si se ingiere en cantidades altas y por un tiempo prolongado. El exceso de boro es producido por descargas industriales.

8.2. Etapa II. Identificación del uso potencial en la zona

Se recurrió a la búsqueda de información en el último censo económico del INEGI (2019) de las principales actividades económicas que se realizan en la Alcaldía La Magdalena Contreras. Además, se utilizó como base al reporte más reciente de la SEDEMA (2016) sobre “descargas de agua residuales” para conocer qué sector económico es el mayor generador de aguas residuales. Cada sector

económico genera un flujo de agua residual. Con base en esa información, se asignaron cuatro atributos de acuerdo al flujo del caudal de agua residual (L/s) producida: a) Requerimiento bajo (0.02-1.60 L/s), Requerimiento medio-bajo (1.01-7.50), Requerimiento medio (7.51-25.00 L/s) y Requerimiento alto (25.01-71.76 L/s). La razón de esta división es de acuerdo al caudal tratado descrito en el reporte de plantas de tratamiento de agua residual por la SEDEMA (2016). Aquella actividad o actividades que se les designe el atributo con mayor flujo de agua residual será o serán consideradas como una actividad o actividades para uso potencial en la alcaldía.

8.3. Selección de la tecnología descentralizada

Se realizó una matriz de beneficios con base en distintos criterios de selección, los cuales se expresan mediante una escala cuantitativa progresiva que va desde una aportación adecuada a una inadecuada, donde se ponderó el mismo concepto para cada caso explorado. Dentro de la escala se propusieron dos valores: 0= Inadecuado, 1= Adecuado, considerando elementos que en cada caso lo ubican dentro de cada rubro. Así entonces el valor individual de cada rubro contribuye en la sumatoria de todos los casos evaluados. Aquel que obtenga el mayor valor numérico resulta en la mejor opción de tecnología descentralizada a implementar en el sitio propuesto. En este caso se evaluaron las siguientes tecnologías descentralizadas, las cuales se han implementado en México (CONAGUA, 2019): a) lagunas de estabilización (aérobicas, facultativas y anaerobias), b) RAFA, c) tanques sépticos, d) tanque Imhoff, e) filtros biológicos, f) discos biológicos y g) humedales artificiales. Se proponen los siguientes criterios de selección. Cada criterio fue evaluado con lo expuesto en la literatura.

1) Factibilidad económica:

- a) **Necesidad-Espacio:** requerimiento de área adecuadas a las necesidades del proyecto.
- b) **Operación y mantenimiento:** actividades del personal tales como las revisiones de rutina o emergentes, eliminación de lodos, uso de reactivos químicos, trabajos de poda, disponibilidad de repuestos y centros de servicio.
- c) **Resiliencia:** capacidad que tiene el sistema de adaptarse a eventos climáticos extremos no predisuestos.

2) Factibilidad ecológica.

- a) **Integración paisajística:** representa la creación de un centro que genere un incremento de calidad visual con respecto a su entorno en comparación de la situación previa a que se ubicará el sistema propuesto.
- b) **Generación de residuos con valor económico:** se refiere a la posibilidad de reutilizar el lodo producido ya sea en suelo o en forma de biogás.
- c) **Vectores de enfermedades y generación de malos olores:** representa aquellos elementos que pueden producir enfermedades por las características intrínsecas del sistema.

3) Factibilidad social:

- a) **Aceptación del sistema:** estética visual perceptible que tiene la comunidad sobre el sistema.
- b) **Participación social:** no requiere personal capacitado para que la tecnología funcione. Beneficios económicos destinados al trabajo de la comunidad a partir del uso del sistema
- c) **Filosofía del lugar:** corresponde a la concordancia de las directrices del lugar.

8.4. Etapa III. Diseño conceptual del Humedal Artificial

Se estableció el diseño conceptual en dos pasos, a) conocer el sitio de implementación y b) el diseño hidráulico del sistema.

8.4.1. Selección del sitio

Se recurrió a la inspección de la zona, se identificaron aquellos lugares potenciales que comprende el área media y baja de las laderas del cauce del Río Magdalena. Una vez inspeccionada la zona, se elaboró una matriz de beneficios, la cual expresa mediante una escala cuantitativa progresiva que va desde una aportación baja, hasta un alta, donde se ponderó el mismo concepto para cada caso explorado. Dentro de la escala se proponen tres valores: 1 = Bajo, 2 = Medio y 3 = Alto. Así entonces, el valor individual de cada rubro contribuye en la sumatoria de todos los evaluados, donde aquel que obtiene el mayor valor numérico resulta en la opción que presenta la mayor alineación con el proyecto propuesto, así como potencial en su relación de beneficios. Los criterios específicos se enuncian a continuación:

1. **Filosofía del lugar:** corresponde a la concordancia de las directrices del lugar.
2. **Mejoramiento del espacio urbano:** representa la creación de un centro que genere un incremento de calidad visual con respecto a su entorno en comparación de la situación previa a la que se ubicará el sistema propuesto.
3. **Seguridad del sistema:** evalúa el cuidado y protección que obtendrá por parte del personal directo e indirecto que interacciona con el sistema.
4. **Racionalidad ambiental:** representa la armonía a la que puede estar sujeta la flora y la fauna del lugar.

5. **Cercanía con la comunidad:** representa la interacción entre los habitantes de la zona y el sistema.

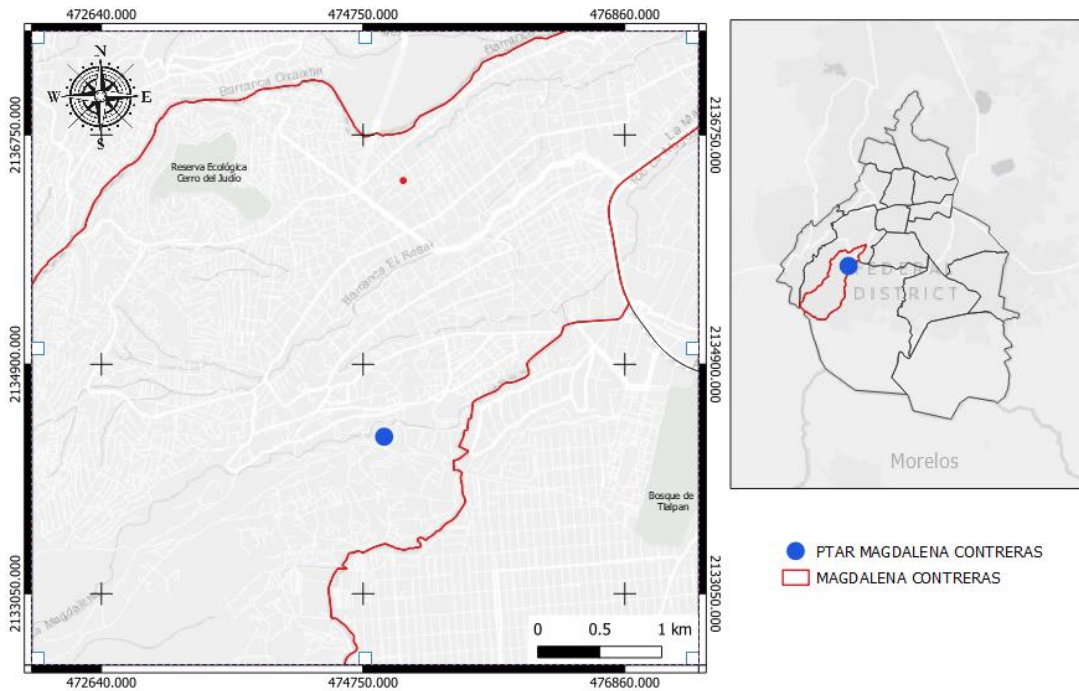


Figura 20. Mapa de la planta de tratamiento Magdalena Contreras, CDMX (Elaboración propia).

8.4.2. Diseño del Humedal Artificial

El humedal artificial fue la tecnología descentralizada a emplear. Entre los distintos tipos de humedales, el HAFSS (Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial) horizontal es propuesto debido a que el agua no es expuesta a las condiciones atmosféricas prevalentes que, en comparación con los humedales de flujo superficial, incide en generación de olores y el crecimiento de vectores de enfermedades como los mosquitos. En México las enfermedades relacionadas con éstos, son frecuentes, tal como el dengue (Delgadillo *et al.*, 2010). Los humedales de flujo superficial se proponen para fines estéticos, mejoramiento del paisaje y con fines de restauración y conservación ya que existe una interacción ecológica estrecha entre el sistema y los organismos tales como anfibios, peces, aves, entre otros (Delgadillo *et al.*, 2010). Debido a ello y para los objetivos del presente trabajo, no se tomarán en cuenta. Por otra parte, el HAFSS vertical son utilizados para la remoción completa de nitrógeno mientras que en los HAFSS horizontales ocurre parcialmente, tal como se expone en la Tabla 18, los humedales plantados con *Phragmites australis* y usando como medio filtrante grava indican un aumento en la eficiencia de remoción (Cooper, 1999; Stefanakis *et al.*, 2014; Abdelhakeem *et al.*, 2016 y López *et al.*, 2016). Al generar una remoción parcial de nitrógeno, el agua tratada en los HFSS horizontales es útil para riego de cultivos o áreas verdes. De tal manera que, si se dentro del uso potencial se selecciona agua para riego o áreas verdes, los humedales verticales quedan descartados.

Tabla 18. Eficiencia de remoción en dos humedales plantados con *Phragmites australis* con medio filtrante a base de grava (Cooper, 1999; Stefanakis *et al.*, 2014; Abdelhakeem *et al.*, 2016 y López *et al.*, 2016).

Característica	HAFSS horizontal	HAFSS vertical
Efecto solar como germicida	No presenta	No presenta
Sólidos suspendidos totales	88-92%	75%
Remoción de nitrógeno total	23-24%	54%
Remoción de Fósforo total	1-4%	22%
DBO₅	95%	84%
Patógenos	<i>Giardia sp.</i> , <i>Cryptosporidium sp.</i> , <i>Salmonella sp.</i> , <i>E. coli</i> , huevos de helminto	Coliformes totales, Estreptococos, <i>E. coli</i>

8.4.2.1. Modelos de diseño

Conforme avanzan los estudios de investigación se plantean diversos modelos, desde lo simple hasta lo más complejo, pues se incluyen diversas variables tales como el clima, tiempo de retención hidráulica, comportamiento de un flujo no lineal o concentración inicial-final. En este apartado no se pretende idealizar un modelo. Hasta la actualidad no existe un modelo ideal que describa el comportamiento de un humedal artificial dada la existencia de las diversas variables que pueden presentarse. No obstante, ningún modelo debe ser descartado y debe ser elegido de acuerdo a la complejidad del proyecto y herramientas que se encuentren disponibles. Los modelos de diseño se dividen en dos, 1) mecanicistas y 2) no mecanicistas (Rosseau *et al.*, 2004; Frazze-Williams, 2010; Dotro *et al.*, 2017; CONAGUA, 2019). Los modelos mecanicistas son complejos ya que consideran las diferentes interacciones presentes en el humedal, tales como el agua, el medio filtrante, balance del nitrógeno y oxígeno, vegetación

o ciclos biogeoquímicos. En tanto que los modelos no mecanicistas no lo hacen y se basan en carga orgánica, concentración inicial y final. La CONAGUA (2019) en su manual para el diseño de un humedal artificial y Dotro *et al.*, (2017), destacan diferentes modelos aplicables a los HA de flujo sub-superficial, pero solo se contemplan a los modelos no mecanicistas y son los que se mencionarán a continuación ya que en este trabajo no se consideran los procesos y transformaciones que ocurren en el humedal:

- a) **Regla empírica:** son modelos propuestos a partir de condiciones específicas dadas en un sitio específico. No consideran coeficientes tales como la concentración inicial-final y clima.
- b) **Ecuaciones de regresión:** toman en cuenta las concentraciones iniciales, finales, carga orgánica y en algunos casos el tiempo de retención hidráulico. Sin embargo, son aplicables si los datos caen dentro del rango propuesto por el(los) autor(es). No indican un área requerida.
- c) **Modelos de primer orden:** consideran concentraciones iniciales y finales del contaminante, temperatura, constantes cinéticas (área (k_A) y volumen (k_V) y tiempo de retención hidráulico. La desventaja de aplicar este modelo es que supone un flujo ideal (mismo flujo de entrada y de salida), las constantes cinéticas varían con el(los) autor(es) y no asumen eventos de riesgo. Una variante de los modelos de primer orden (e) y carga orgánica (d) es el propuesto por Kadlec y Wallace (2009), asume un flujo no ideal, el riesgo, concentración inicial-final y concentración de fondo que se refiere a la concentración orgánica producida que no es consecuencia del influente, sino que proviene del mismo sistema debido al detritus. Dada la complejidad del modelo se integran diversas variables que deben ser previamente estimadas para ajustarlo al modelo tales como la evapotranspiración, infiltración, y precipitación.

d) Modelos basados en carga orgánica: USEPA (2000) Kadlec y Wallace (2006) los proponen. Se basa en concentración del contaminante y carga orgánica. Concretamente, se selecciona una tasa de carga del influente para producir una concentración de efluente objetivo. Kadlec y Wallace (2006), agregan un nivel de riesgo, consideran tres niveles basados en tres percentiles: 50, 70 y 90. Así, un diseño que contemple el percentil 50 indica que un sistema alcanzaría la concentración de efluente deseada el 50% del tiempo. La desventaja de este modelo es que no contempla constantes cinéticas y coeficientes de temperatura. En el caso del modelo establecido por Kadlec y Wallace (2006) los diseños basados en el percentil 70 y 90 demandan grandes áreas (> 50 metros). Pero, son ideales porque están basados en el comportamiento a escala de humedales previamente estudiados y consideran un flujo no ideal (flujo pistón).

8.4.2.2. Parámetros de diseño

Debido a que en el sitio se pretende un espacio de implementación de aproximadamente 30 m² y que se requiere un efluente para utilizarse como reúso indirecto determinado en la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF,1998), el modelo que se presentará en este estudio es el estipulado por la USEPA (2000), en la Tabla 19 se contemplan los criterios de diseño propuestos por la USEPA (2000). Si bien existen otros modelos más robustos, en este trabajo no se tomaron en cuenta por las variables que lo determinan. Se siguieron los parámetros descritos, de acuerdo a las siguientes consideraciones:

- 1. Caudal del agua residual a tratar:** el caudal se refiere al volumen de agua que pasa por una determinada sección transversal en una unidad de tiempo. Debido a las condiciones de contingencia sanitaria no se evaluó el caudal del influente de la PTAR. Debido al área disponible se optó utilizar un caudal de 17.83 m³/d. En conjunto con la caracterización de la calidad del agua residual, permitirán un buen dimensionamiento y predicción del comportamiento del sistema ante variaciones futuras (Kadlec y Wallace, 2008). En la literatura se opta por tener un tipo de pretratamiento con el fin de evitar efectos de azolvatación en el humedal.
- 2. Dimensionamiento:** Serrano y Corzo (2008) definen que para este factor de diseño se consideran dos etapas, la primera es el dimensionamiento biológico, se refiere a la superficie necesaria de tratamiento, para este aspecto se contempla la concentración de DBO₅ o SST y el caudal. La segunda etapa, es el dimensionamiento hidráulico, que consta de las dimensiones geométricas (anchura y longitud), se toma en cuenta la porosidad y conductividad hidráulica (la conductividad hidráulica es la capacidad que puede circular el flujo en el medio granular (Serrano y Corzo, 2008)) del sustrato y el tiempo de retención hidráulica, definido por el Consejo Interestatal de Tecnología y Regulación (ITCR,

por sus siglas en inglés, 2003), como: “una estimación del tiempo promedio que requieren las aguas residuales para fluir completamente a través del humedal”.

- 3. Profundidad:** la profundidad es relevante, ya que en estudios se observa que influye en la actividad del potencial de reducción en la columna de agua (Song *et al.*, 2019). A una profundidad entre 0.3-0.6 metros ocurre mayormente la oxidación de la materia orgánica; mientras que a profundidades mayores no se presenta debido al ambiente anóxico (Delgadillo *et al.*, 2010).
- 4. Tiempo de retención hidráulico:** se define como “una estimación promedio que requiere el agua residual fluir a través del humedal” (ITCR, 2003). Es decir, es el tiempo que se requiere para poder llevar a cabo la mayor efectividad del proceso de tratamiento, el TRH para un humedal de flujo libre y subsuperficial es de 4-15 días. Sin embargo, depende del diseño en términos del área, caudal, tipo de vegetación y requerimientos de las normas ambientales. Tal como el estudio determinado por Sehar *et al.*, (2016), se encontró que la mayor remoción de PO_4^- , NO_3^- , SD, SST, CF y CT en un humedal de flujo subsuperficial a escala de laboratorio plantado con *Veronica-angallis aquatica*, con una carga hidráulica de 75 mm/d ocurrió en un periodo de 20 días. Por otro lado, la USEPA (2000) destaca que el tiempo donde ocurre la mayor remoción (0.7 mg/L) de PO_4^- es de siete días y para el caso de efluente nitrificados se requiere de hasta menos de un día para lograr un requerimiento de 10 mg/L. Por consiguiente, no existe un THR ideal y depende de las condiciones anteriormente mencionadas.

Tabla 19. Parámetros y criterios de diseño (USEPA, 2000).

Parámetro	Criterio de diseño para humedal de flujo subsuperficial horizontal
Calidad del efluente	No específica
Área	Aplicable a la calidad deseada del efluente
Pretratamiento	Tratamiento primario, no aplican lagunas
Carga máxima de DBO₅	1.6 g/m ² -d para 20 mg/L del efluente 6 g/m ² -d para 30 mg/L del efluente
Carga máxima de sólidos suspendidos totales (SST)	20 g/m ² -d para 20 mg/L para 30 mg/L del efluente
Profundidad	Columna de agua: 0.6 m Medio: 0.4-0.5 m
Relación Largo-Ancho	Según lo calculado, para el largo (L) un mín. De 15 m Según lo calculado, para el ancho (W) un máx. De 61 m
Sustrato	Primeros 2 metros: 40-80 mm Tratamiento: 20-30 mm Efluente: 40-80 mm Vegetación: 5-20 mm
Pendiente del fondo (S)	0.5%-1%
Conductividad hidráulica (K)	Zona inicial 30% de la longitud-uso del 1% de K Zona final 70% de la longitud-uso del 10% de K

Dadas estas condiciones, se procedió al cálculo del diseño. En el anexo III, se presenta la memoria de cálculo del dimensionamiento del humedal. Debido a que se propone un uso potencial de uso indirecto se debe cumplir una carga de 30 mg/L aplicada a la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF,1998).

9. Resultados y discusión

9.1. Caracterización del agua residual. Relación DBO₅/DQO

El resultado para la caracterización del agua residual que se evaluó de la PTAR Magdalena Contreras mediante la relación DBO₅/DQO se presenta en la Tabla 20 los resultados de la relación DBO₅/DQO en los diferentes años:

Tabla 20. Promedio de la relación DBO₅/DQO para los años 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019.

	Relación DBO ₅ /DQO
2014	0.21
2015	0.10
2016	0.28
2017	0.15
2018	0.19
2019	0.04

Los resultados indican que en todos los años analizados hay una baja biodegradabilidad proveniente de la PTAR Magdalena Contreras. Se estimó una relación DBO₅/DQO promedio de los años de 0.16, en donde el año 2019 fue el que presentó menor biodegradabilidad en comparación con los otros años. De acuerdo con Metcalf y Eddy (2004) y Von Sperling (2014), los resultados evidencian que el agua residual requiere de un tratamiento biológico, ya que puede haber presencia de componente tóxicos o bien, se requiere la estabilización de los microorganismos de acuerdo al tratamiento biológico que se utilice. La PTAR utiliza como tratamiento

biológico el proceso de lodos activados, no obstante, de acuerdo con los resultados presentados se evidencia que el proceso no es eficaz. Por otro lado, los datos de la relación DBO_5/DQO indican que no se trata de agua residual doméstica. En el caso del agua industrial la variación de la relación DBO_5/DQO varía de acuerdo al tipo de industria que se trate. No obstante, los metales pesados son indicativos de la presencia de agua residual industrial en el agua. De acuerdo con los resultados, en la Tabla 21 se muestra que, en cuanto a los metales arsénico, cadmio, cobre, cromo, níquel, plomo y zinc no excedieron los LMP de la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997). Respecto al cianuro no se encontró información en la base de datos, pero debe ser monitoreado. Para el caso del mercurio, en el año 2014 se obtuvo una media de 0.006 mg/L. La contaminación del agua por este elemento es producida por industrias químicas que producen cloro, fábricas de fungicidas y de pinturas contra hongos, de plásticos, por minas de cinabrio, en la extracción de oro y plata y por las refinerías de petróleo. Sin embargo, no hay evidencia cercana en la zona de dichas actividades. De este análisis se determina que el agua residual caracterizada no es clasificada dentro de ningún grupo (industrial, doméstico o municipal no tratada) y se trata de agua residual tratada. No obstante, se determina que la PTAR no está trabajando de forma eficaz al presentar una baja relación de DBO_5/DQO .

Tabla 21. Metales pesados analizados de la PTAR Magdalena Contreras.

Concentración de metales pesados promedio del efluente de la PTAR Magdalena Contreras (mg/L)							
LMP de la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF,1997) de uso público urbano	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
Arsénico	0.1	0	0	0	.001	0	0
Cadmio	0.1	0.04	.05	.05	.05	.05	.05
Cianuro	1	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
Cobre	4.0	0.05	.09	0.1	0.1	0.1	0.1
Cromo	0.5	0.04	.05	.05	.05	.05	.05
Mercurio	0.005	0.006*	0	0	0	0	0
Níquel	2	0	0	0	0.1	0.1	0.1
Plomo	0.2	0.058	0.091	0.14	0.2	0.2	0.15
Zinc	10	0.13	0.12	0.55	0.15	0.13	00.18

**0.006 valor que excede el límite máximo permisible de la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF. 1997)*

9.1.2. Obtención de información y datos de calidad de agua residual

Los resultados obtenidos para conocer la calidad del agua residual de la PTAR Magdalena Contreras se dividieron en cinco grupos: 1) Minerales, 2) Grasas y aceites, 3) Materia orgánica biodegradable: DBO_5 , SST, ST, SDT, sólidos sedimentables, 4) Nutrientes (Nitrógeno total, fósforo total, Nitritos (NO_2^-) y Nitratos (NO_3^-)) y 5) Biológicos. Esta clasificación de acuerdo con Metcalf y Eddy (2004). Del quinto grupo no se presentaron datos de *Cryptosporidium* sp. y *Giardia lamblia*.

9.1.2.1 Evaluación estadística de la calidad del agua

1) Minerales:

Los resultados se presentan en la Tabla 22, la NOM-127-SSA1-1994 (DOF,1995) es la única que evalúa los minerales y solamente se tomó referencia de esta norma para ello. En el grupo de los cationes, no se especifica al calcio (Ca^+) ni al magnesio (Mg^{2+}) pero sí al sodio (Na^+), el cual cumple con el LMP. En los lineamientos para la calidad de agua potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (2017) se señala que al Mg^{2+} y Ca^+ , los cuales no deben exceder 50 mg/L y 75 mg/L, respectivamente. De acuerdo con los resultados, no exceden estos límites. Por otro lado, el tercer grupo no se especifica al Boro (B) ni a la alcalinidad. El Boro, según la OMS (2017), no debe exceder 2.4 mg/L, mientras que, la alcalinidad engloba a los minerales tales como el bicarbonato y carbonatos. Este último no se considera un parámetro de calidad para agua potable, debido a que su uso es para conocer la eficiencia de un tratamiento que pueda inducir un cambio en el pH. No

obstante, la Junta para el Control de la Contaminación de la India (2012) indica en sus lineamientos de calidad de agua potable que este no debe exceder los 600 mg/L. En los años 2017-2019 el aluminio presentó valores altos en comparación con los LMP de la norma y por la OMS (0.2 mg/L). El aumento de aluminio en el agua tratada deriva principalmente como coagulante para eliminar microorganismos, materia orgánica, color y turbidez. No obstante, de acuerdo con un reporte realizado por Zaragoza-Sánchez y López (2021) la PTAR Magdalena Contreras no utiliza coagulantes derivados de este elemento; los metales pesados que pudieran incidir en la presencia de procesos industriales en este análisis cumplen con el LMP descrito en la norma. Se sugiere que el aluminio sea monitoreado y medido nuevamente.

En las Figuras 21, 22 y 23, se presentan algunas fotografías de cómo opera la PTAR Magdalena Contreras actualmente; consta de tres procesos (primario, secundario y terciario), no se incluye el uso de coagulantes, las grasas, aceites y residuos son bombeados a la zona de cribado, de ahí parte a los desarenadores y microtamices, el proceso continua hacia el tratamiento secundario, el cual se da a través del proceso biológico de lodos activados (tanque aireado) y sedimentadores secundarios, mientras que el tratamiento terciario (desinfección) se da por rayos UV.



Desarenador visto de frente



Microtamices

Figura 21. Tratamiento primario; eliminación de grasas y aceites y otros residuos (Fotografías: Álvarez-Marmolejo; Molina-Valencia y Ruiz-Velázquez).



Lodos activados

Sedimentador secundario

Figura 22. Tratamiento secundario; proceso biológico a través de lodos activados y sedimentadores (Fotografías: Álvarez-Marmolejo; Molina-Valencia y Ruiz-Velázquez).



Desinfección UV

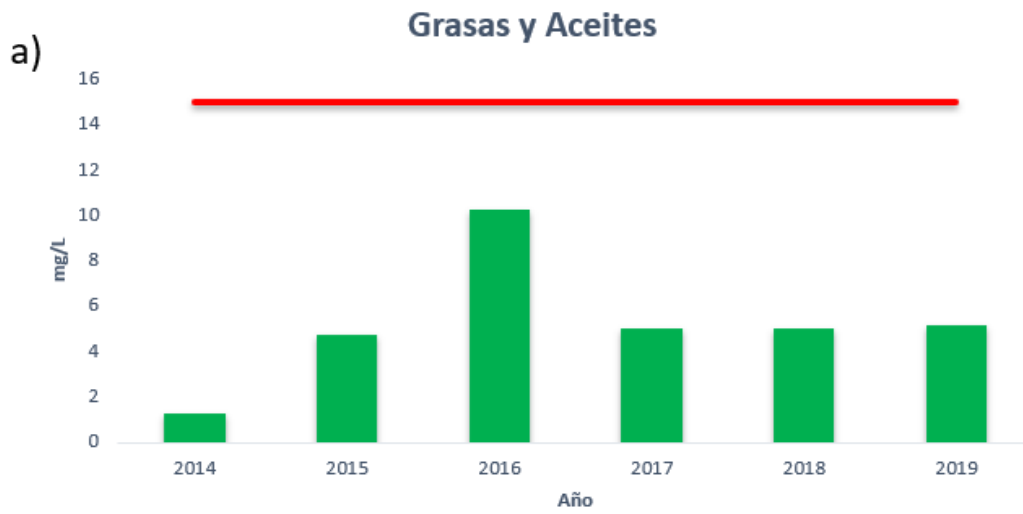
Figura 23. Tratamiento terciario, desinfección por rayos UV (Fotografías: Álvarez-Marmolejo; Molina-Valencia y Ruiz-Velázquez).

Tabla 22. Minerales asociados a fuentes del ramo industrial y LMP dispuesto en la NOM-127-SSA1-1994 (DOF,1995) (Metcalf y Eddy, 2004).

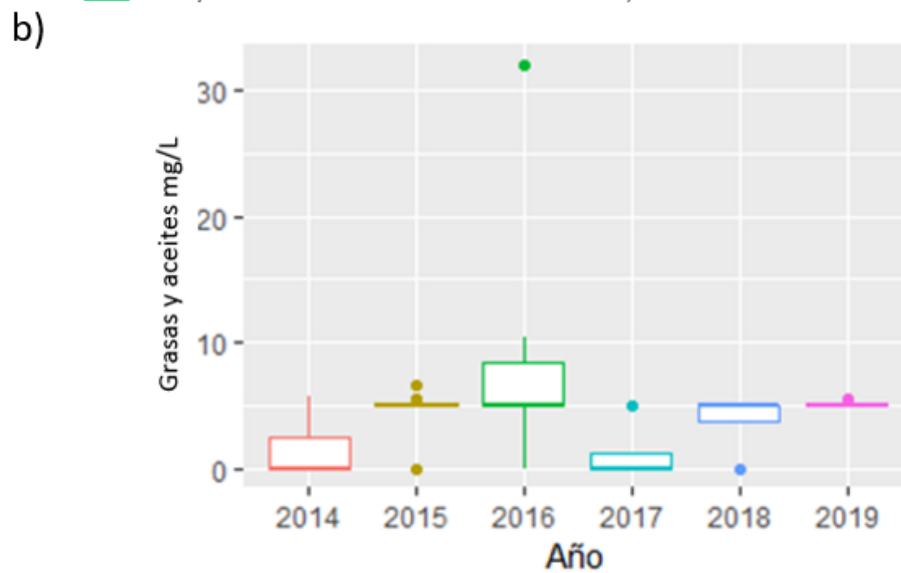
Componente	Límite máximo permisible de acuerdo con la NOM-127 mg/L	Concentración promedio del efluente de la PTAR Magdalena Contreras (mg/L)					
		Año					
Aniones		2014	2015	2016	2017	2018	2019
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	NO ESPECIFICADO	6.66	6.75	8.92	32.36	2.5	8.75
Carbonato (CO ₃ ⁻)	NO ESPECIFICADO	No evaluado					
Cloruros (Cl ⁻)	250	27.84	18.76	23.15	34.81	23.37	23.63
Sulfato (SO ₄ ⁻)	400	.011	5.65	3.34	1.82	38.44	38.57
Cationes							
Calcio (Ca)	NO ESPECIFICADO	5.59	0	0	0	23.47	14.30
Magnesio (Mg ²⁺)	NO ESPECIFICADO	3.02	0	0	0	4	2.8
Sodio (Na ⁺)	200	8.52	0	0	0	5.33	23.70
Otros							
Aluminio (Al)	0.20	0	0	0	1	1	1
Fluoruros (F ⁻)	1.5	-	-	-	0.50	0.55	0.58
Boro (B)	NO ESPECIFICADO	1.23	0.10	0.12	1.10	0.21	-
Manganeso (Mn)	0.15	0.02	0.01	0.09	0.10	0.10	0.10
Alcalinidad (CaCO ₃)	NO ESPECIFICADO	26.66	26.75	38.92	32.36	22.50	38.75
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	1000	71.06	252.55	234.40	425.00	281.50	249.5

2) Grasas y aceites

Los LPM de las grasas y aceites se especifican en la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997) y en la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF,1998). Los resultados observados se muestran en la Figura 24. Se observa que el parámetro cumple con ambas normas ambientales. No se observa mayor dispersión de los datos, a excepción del 2016, el cual obtuvo una desviación estándar de 9.19 en comparación con los otros años. En la Figura 24 b) se observa la dispersión de los datos dado los valores máximos y mínimos. El valor máximo presentado en ese año fue de 32.09 mg/L mientras que el mínimo fue de 5 mg/L.



■ Grasas y aceites — LPM NOM-001-SEMARMAT-1996; LMP NOM-003-SEMARNAT-1996 CI y CD

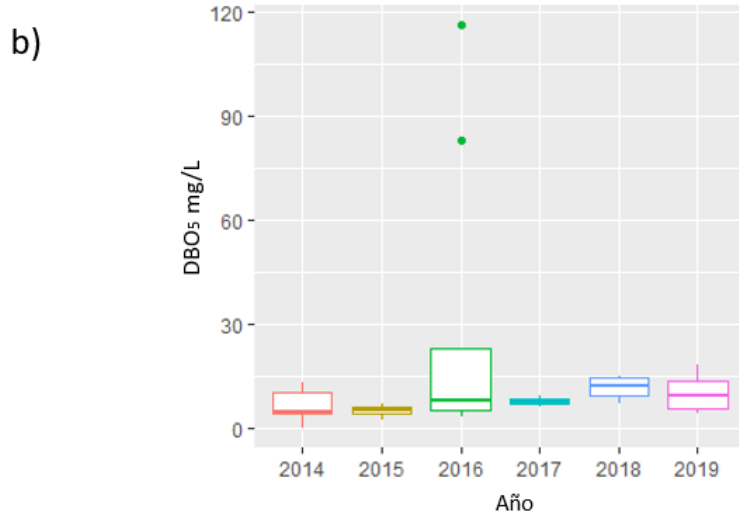
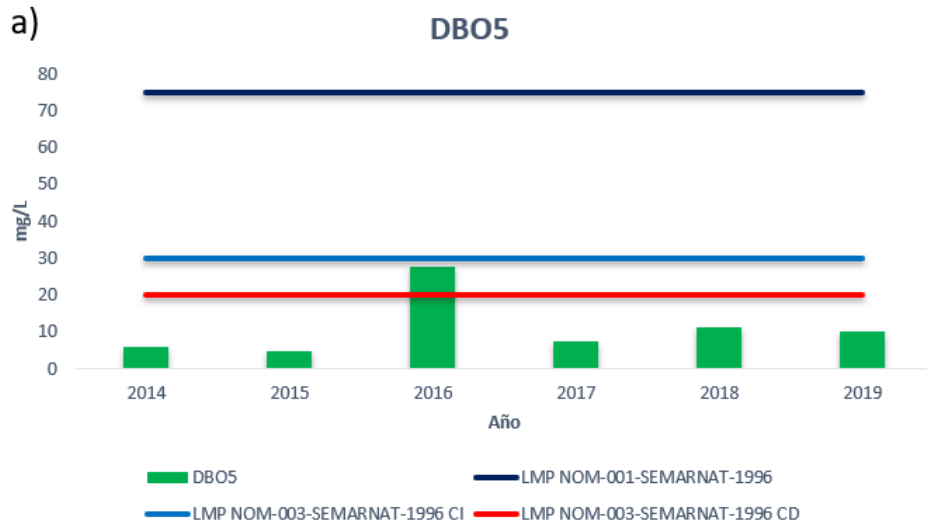


Contacto Directo= CD; Contacto Indirecto= CI; b) valores máximos y mínimos de Grasas y aceites.

Figura 24. a) Media de los valores de Grasas y aceites, la línea roja indica el Límite Máximo Permissible (LPM) de la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997) y el Límite Máximo Permissible (LMP) de la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1998)

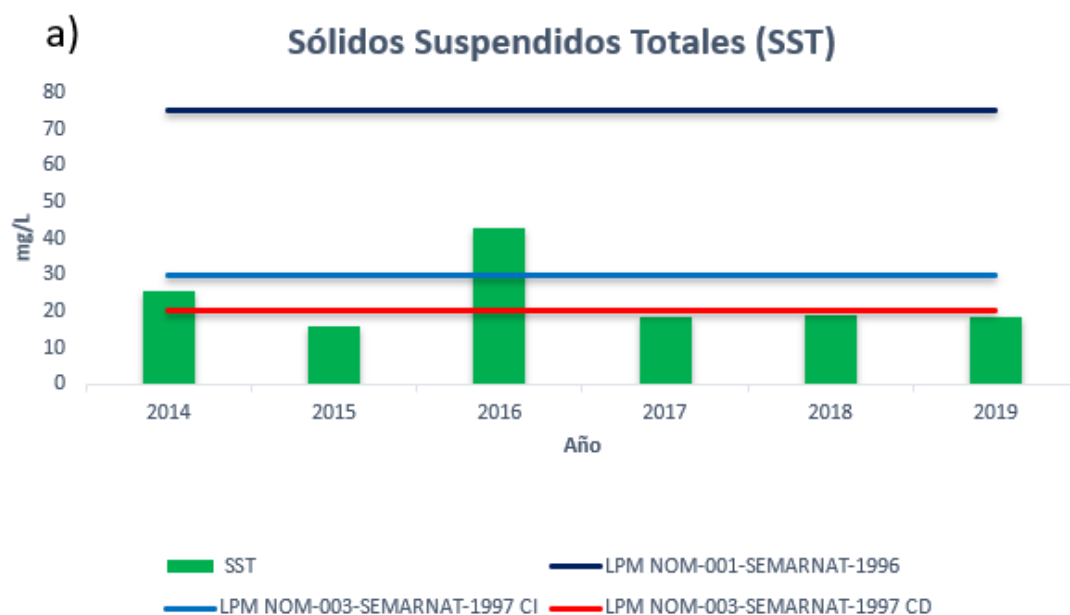
3) *Materia orgánica biodegradable: DBO₅, SST (sólidos suspendidos totales), ST (Sólidos Totales), SDT (Sólidos Disueltos Totales), sólidos sedimentables.*

Los resultados evidencian que el año en el que se presentó el valor máximo de la DBO₅ y los SST fue en el 2016 que alcanzó un máximo de 116 mg/L y un mínimo de 3 mg/L para la DBO₅; en 2014 para los SST que alcanzó los 198.50 mg/L y un mínimo de 0 mg/L. La dispersión de los datos ocurre dado los valores máximos y mínimos, tal como se observa en las Figura 25 y 26, la desviación estándar de la DBO₅ fue 39.26 y 42.60 para los SST. No obstante, como se observa en las Figuras 22 y 23, se cumple con los LMP de la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF,1997) y la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF,1998) con contacto indirecto para la DBO₅, sin embargo, no cumple con los LMP de la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1998) con contacto directo; respecto a los SST se cumple solo la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF,1996) pero no de la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF,1998). Se conoce hasta el momento que La PTAR Magdalena Contreras tiene cinco descargas, la primera es derivada a pipas para abastecimiento de uso público, principalmente en el riego de áreas verdes y autolavados, la segunda es descargada directamente a 300 m río debajo de la planta potabilizadora Río Magdalena 2, le tercera corresponde a una descarga intermitente que se realiza por gravedad a la altura del foro cultural Magdalena Contreras y de la cual SACMEX tiene planos de su trayectoria desde la PTAR hasta las 3 tomas que la integran. La cuarta descarga se realiza al Río Magdalena cerca de los límites de batería de la PTAR y la altura de la llegada del influente. Finalmente, la quinta descarga la compone el abastecimiento intermitente para el riego al deportivo 1° de mayo, ubicado a un costado de la PTAR. De acuerdo con esta información, la PTAR Magdalena Contreras no cumple con la NOM-003-SEMARNAT-1998 respecto al uso directo; la cual dirige parte del agua residual tratada al abastecimiento público.

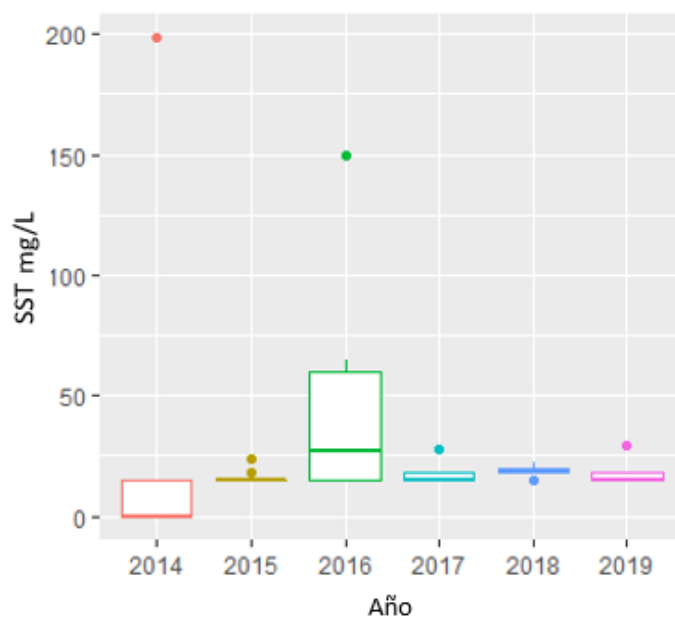


Contacto Indirecto= CI; Contacto Directo= CD; b) valores máximos y mínimos de la DBO₅.

Figura 25. Media de los valores de DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno), la línea roja indica el Límite Máximo Permisible (LPM) de la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997), la línea azul claro y azul marino el Límite Máximo Permisible (LMP) de la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1998).



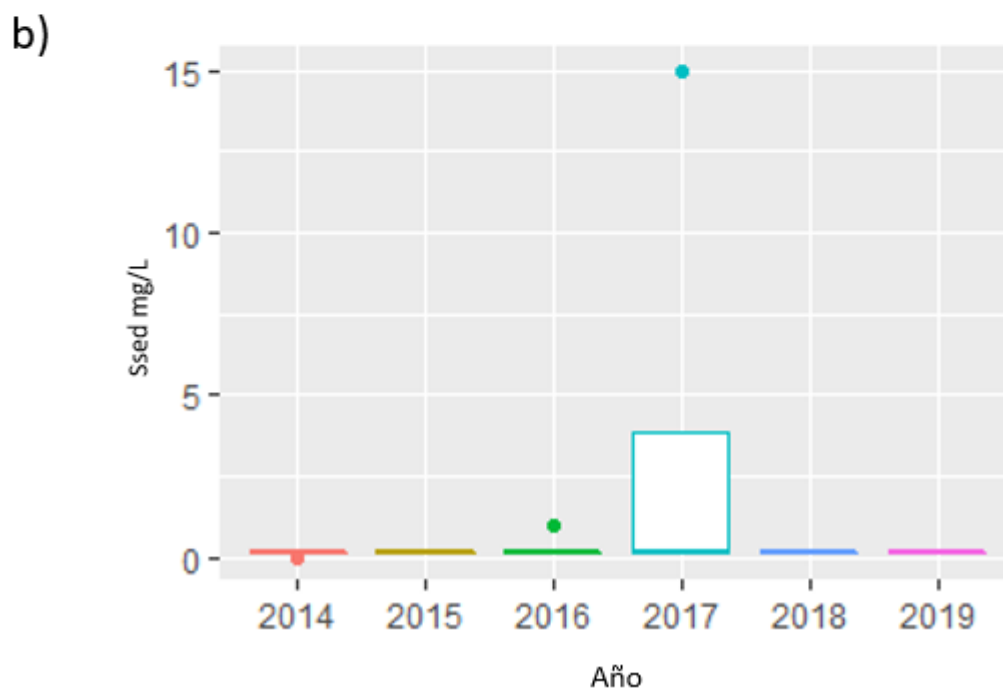
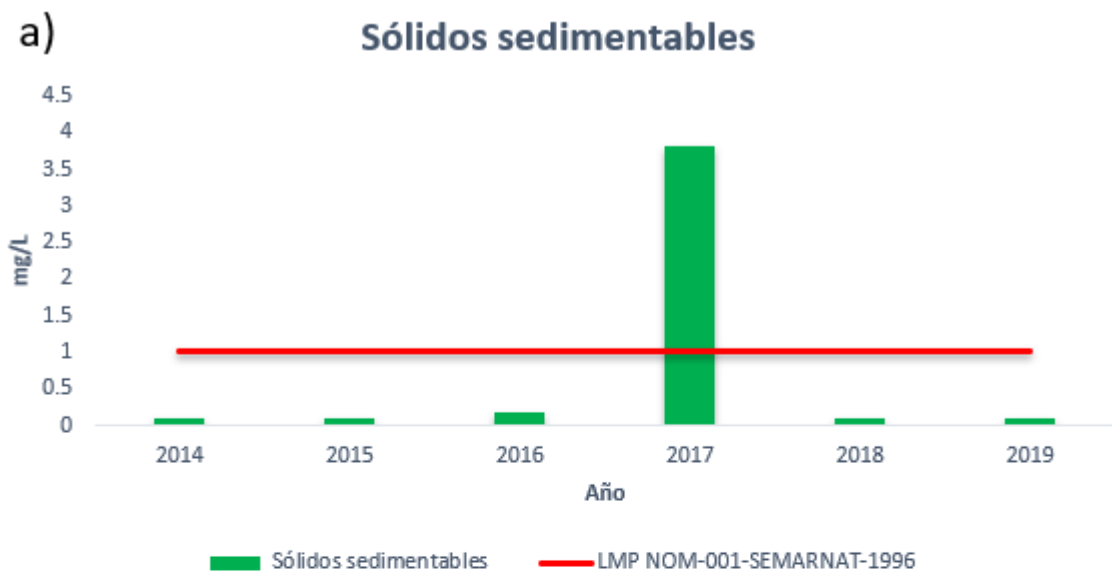
b)



Contacto Indirecto= CI; Contacto Directo= CD; b) valores máximos y mínimos de Sólidos Suspendidos Totales (SST).

Figura 26. a) Media de los valores de Sólidos Suspendidos Totales (SST), la línea roja indica el Límite Máximo Permisible (LPM) de la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997), la línea azul caro y azul marino indican el Límite Máximo Permisible (LMP) de la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1998).

En cuanto a los sólidos sedimentables en la Figura 27, se señala que no se cumplió el LMP de la norma en el año 2017. Lo anterior se explica dado el número de datos en el año 2017 que solo fueron cuatro, y un valor atípico (15 mg/L) considerado como el valor máximo, ya que en todos los años (2014, 2015, 2016, 2018 Y 2019) se obtuvo una media de 0.1 mg/L mientras que para el 2017 fue de 3.85 mg/L y una desviación mayor en comparación con los otros años (7.45). En la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997) no se hace mención de los ST, SF y SV ya que el primero agrupa a cualquier sólido (fijo, volátil, disuelto y suspendido) y los otros dos se engloban en los sólidos suspendidos y sólidos disueltos. No obstante, la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 1995) establece que los sólidos disueltos (SD) deben cumplir un LMP de 1000 mg/L y los resultados demuestran que sí lo cumple.



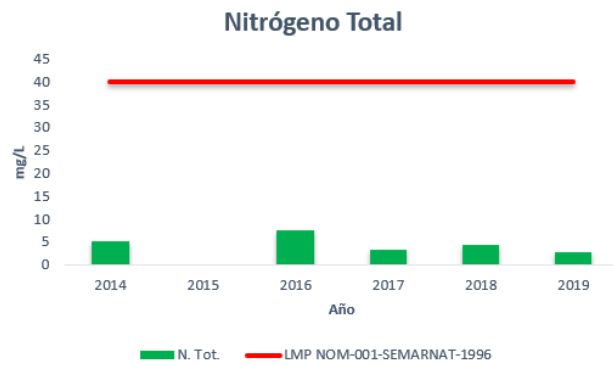
b) Valores máximos y mínimos de Sólidos sedimentables (Ssed).

Figura 27. a) Media de los valores de Sólidos sedimentables, la línea roja indica el Límite Máximo Permissible (LMP) de la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997).

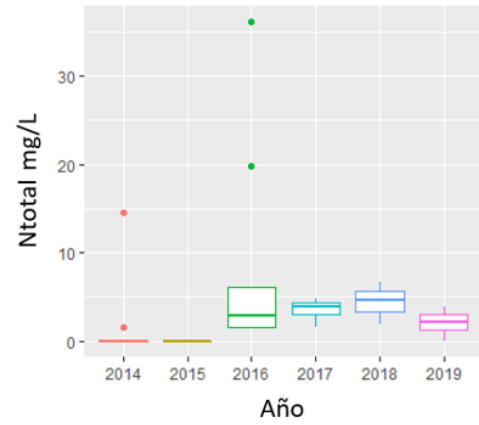
4) Nutrientes (Nitrógeno total, fósforo total, Nitritos (NO_2^-) y Nitratos (NO_3^-)).

En la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997), se señala el LMP del nitrógeno total pero no de los nitritos y nitratos. En la Figura 28 se observa que se cumple con los LMP de la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997). En cuanto a los nitritos y nitratos, Metcalf y Eddy (2004) destacan que los nitritos no deben exceder el 1 mg/L en agua residual y 0.1 mg/L en aguas superficiales, mientras que los nitratos no deben exceder los 20 mg/L en agua residual. En la Figura 28 b) se destacan dos valores máximos que exceden dichos límites para los nitratos y nitritos. No obstante, si observamos la gráfica no excede el límite expuesto por Metcalf y Eddy (2004). En cuanto al fósforo total, se destaca en la Figura 29 que cumple con los LMP y no se señala dispersión de los datos salvo en el año 2014 donde hubo mayor variación dada la desviación estándar (1.08) respecto a los otros años.

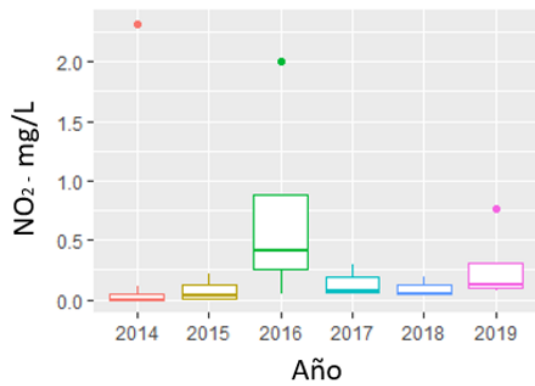
a)



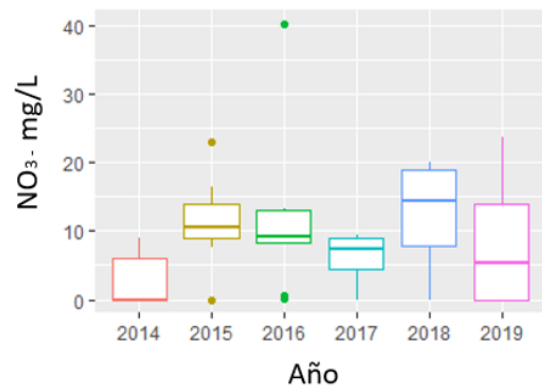
b)



c)

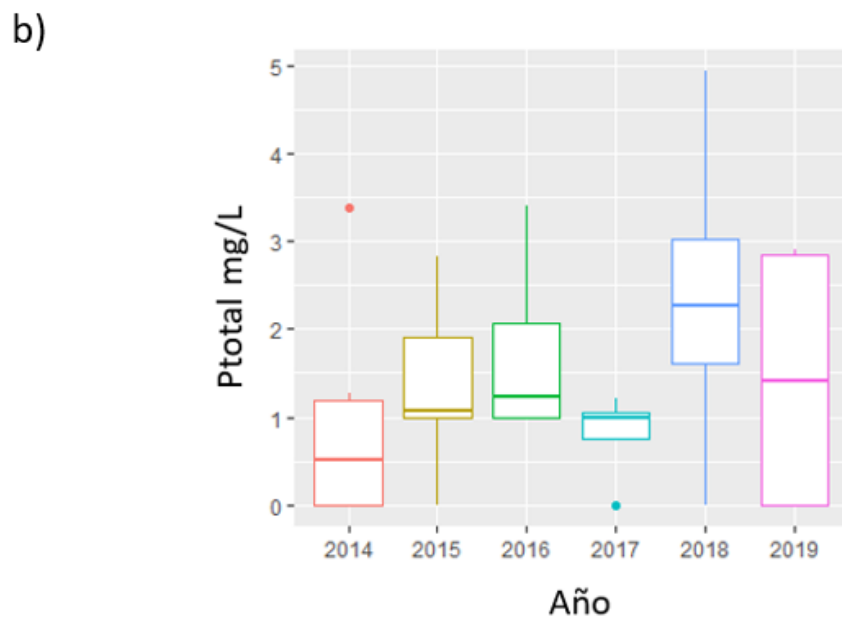
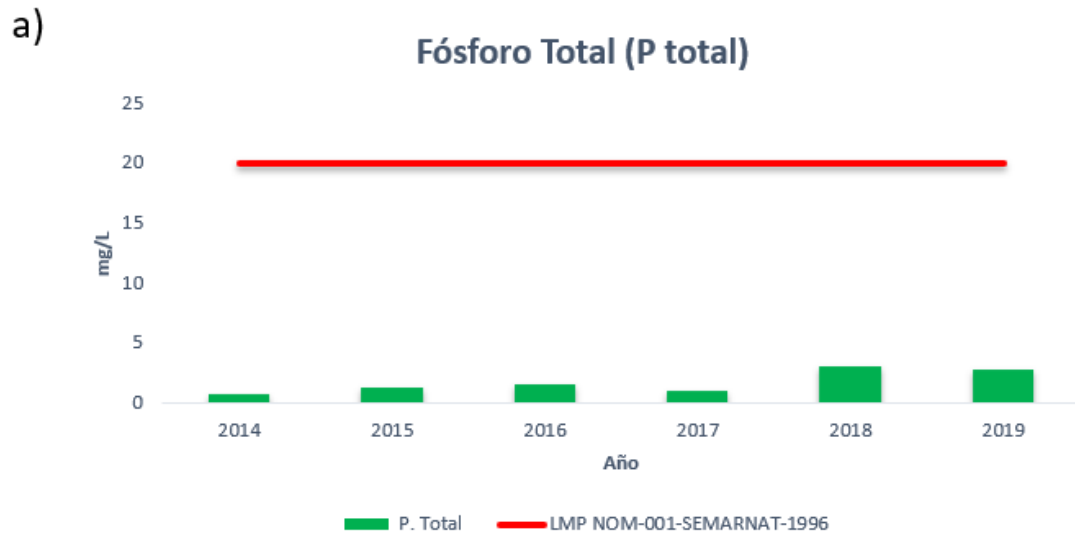


d)



b) Valores máximos y mínimos de Nitrógeno Total (N total); c) Valores máximos y mínimos de Nitritos (NO₂); d) Valores máximos y mínimos de Nitratos (NO₃⁻)

Figura 28. a) Media de los valores de Nitrógeno Total (N total), la línea roja indica el Límite Máximo Permissible de la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997).

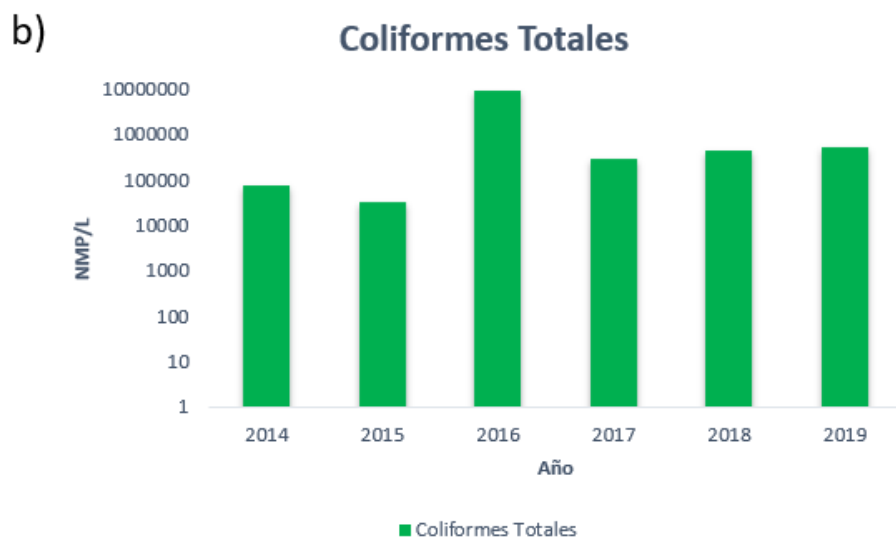
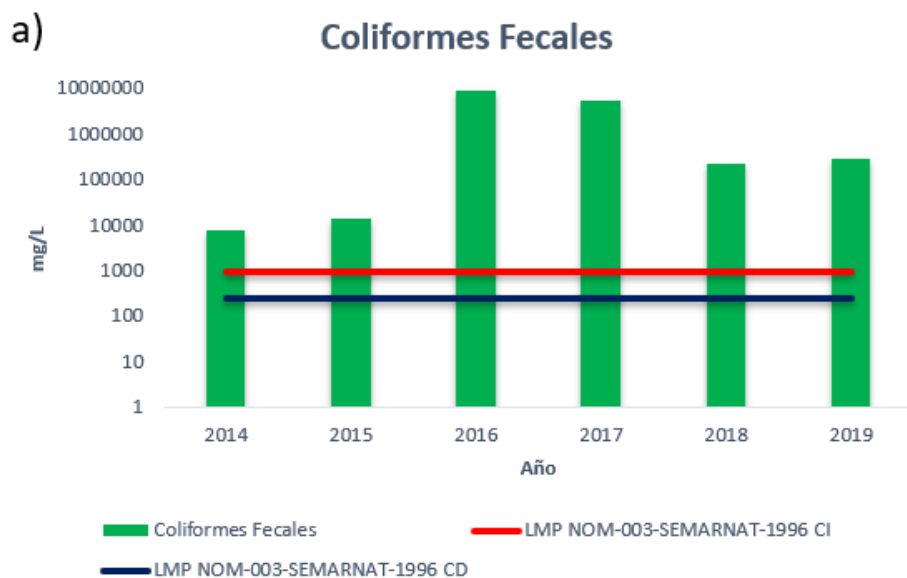


b) Valores máximos y mínimos de Fósforo Total (P total).

Figura 29. a) Media de los valores de Fósforo Total (P total), la línea roja indica el Límite Máximo Permisible de la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997).

5) *Biológicos (coliformes totales y fecales).*

Para el caso de los coliformes totales, solamente se señalan en la NOM-127-SA1-1994 (DOF, 1995), los cuales no deben detectarse; por otra parte, en los coliformes fecales se señalan en la NOM003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1998), la cual establece un LMP de 1000 NMP, para el promedio mensual. En la Figura 30, se observa que no cumple la norma ambiental. El año donde se presentó el valor máximo fue en el 2016. Cuando hay presencia de estos microorganismos en el agua, se debe a que existe alguna falla en la eficacia del tratamiento y la integridad del sistema de distribución. Lo anterior se relaciona con el indicador DBO_5/DQO , la cual demostró tener una baja eficiencia de biodegradabilidad.



Contacto Indirecto= CD; Contacto Directo= CI); b) Media de los valores de Coliformes totales

Figura 30. a) Media de los valores de Coliformes fecales, la línea azul claro y azul marino indican el Límite Máximo Permisible (LPM) de la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1998).

9.2. Identificación del uso potencial del agua residual tratada en la Alcaldía La Magdalena Contreras

En el censo económico 2019 del INEGI, las actividades económicas se dividen en dos niveles, 1) sectores y 2) subsectores. La clasificación general son los sectores y los divide en 20. En el reporte de descargas de aguas residuales de la SEDEMA (2016) se toma en cuenta tres clasificaciones generales y son: industrial, servicios y comercio. En la Tabla 23, se muestran aquellos sectores que siguen ambas instituciones. Como se puede observar, la actividad agropecuaria, queda clasificada en el sector de “Servicios”, asimismo todos los servicios catalogados como sectores en el INEGI pertenecen a esta sección (SEDEMA, 2016). Por su parte, la industria manufacturera se ubica en el sector “Industrial”. Dadas estas características y el aprovechamiento que se le puede atribuir al agua residual tratada, se analizan en los siguientes aspectos:

En la Figura 31 se esquematiza la principal actividad económica, según el censo económico del INEGI (2019) en La Magdalena Contreras lo conforma el *comercio al por menor* (unidades económicas dedicadas a la compra-venta sin transformación de bienes para su consumo final; una unidad económica se refiere a los establecimientos fijos), seguido de *otros servicios excepto actividades gubernamentales* (centros de verificación vehicular, estéticas, panteones, estacionamientos, etc), servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas. La SEDEMA (2016) subraya en su reporte, que, los sectores que generan mayor flujo de aguas residuales son: 1) Servicios (4.39 L/s), 2) Comercio (0.64 L/s) y 3) Industrial (0.03 L/s). La tecnología descentralizada debe asumir para el primer caso un caudal de 379.3 m³/d, del segundo 55 m³/d y del tercero 3 m³/d. Con esta información, se asume que el sector económico que se identifica como requerimiento medio-bajo es el de “Servicios” y requerimiento bajo el sector “Comercio” y el “Industrial”. Así, el sector “Servicios” es al que se le atribuye como el mayor generador de agua residual. Es posible advertir que, el uso

potencial de aprovechamiento del agua tratada sea en el sector de Servicios, siendo este sector definido por puestos fijos.

En México el sector agropecuario utiliza 76.3 % de agua dulce, seguido de la industria y la generación de energía con un 9.6%, mientras que, para el uso de abastecimiento público es ocupado en un 14.4 % (CONAGUA, 2018). En la CDMX el volumen de agua concesionada es destinada al abastecimiento público (97.09%), mayor que la agropecuaria (0.11%) e industrial (2.80%) (CONAGUA, 2018). En la Alcaldía La Magdalena Contreras no destacan actividades primarias, ni secundarias, solo terciarias, que, en este caso, corresponde al sector de “Servicios” (INEGI, 2019). El uso potencial aprovechado de acuerdo con las cifras mencionadas y teniendo en cuenta que solo destaca la actividad terciaria, además de la calidad de agua de acuerdo con los resultados, indican que, el agua tratada podría ser aprovechada para el abastecimiento público, en la Alcaldía La Magdalena Contreras el uso asignado sería para los sanitarios. Asimismo, se propone utilizarse como descarga al Río Magdalena, tal como lo propone el estudio realizado por Monsiváis (2014), que indica que los colectores marginales suelen desbordarse en época de lluvias, los humedales generarían un impacto positivo en el mejoramiento de la calidad del agua en el río.

El tipo de reúso justificado en la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF,1998), se clasifica en dos tipos: contacto directo e indirecto. El uso de contacto directo incluye el servicio de llenado de lagos y canales artificiales, recreativos con paseos en lancha, remo, canotaje y esquí; fuentes de ornato, lavado de autos, riego de parques y jardines. El uso de contacto indirecto, incluye al riego de jardines y camellones en autopistas, camellones en avenidas, fuentes de ornato, campos de golf, abastecimiento de hidrantes contra incendios, lagos artificiales no recreativos, barreras hidráulicas de seguridad y panteones. Para cualquiera de los tipos de reúso reconocidos anteriormente, se debe asumir la calidad dispuesta en la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF,1998).

Unidades económicas

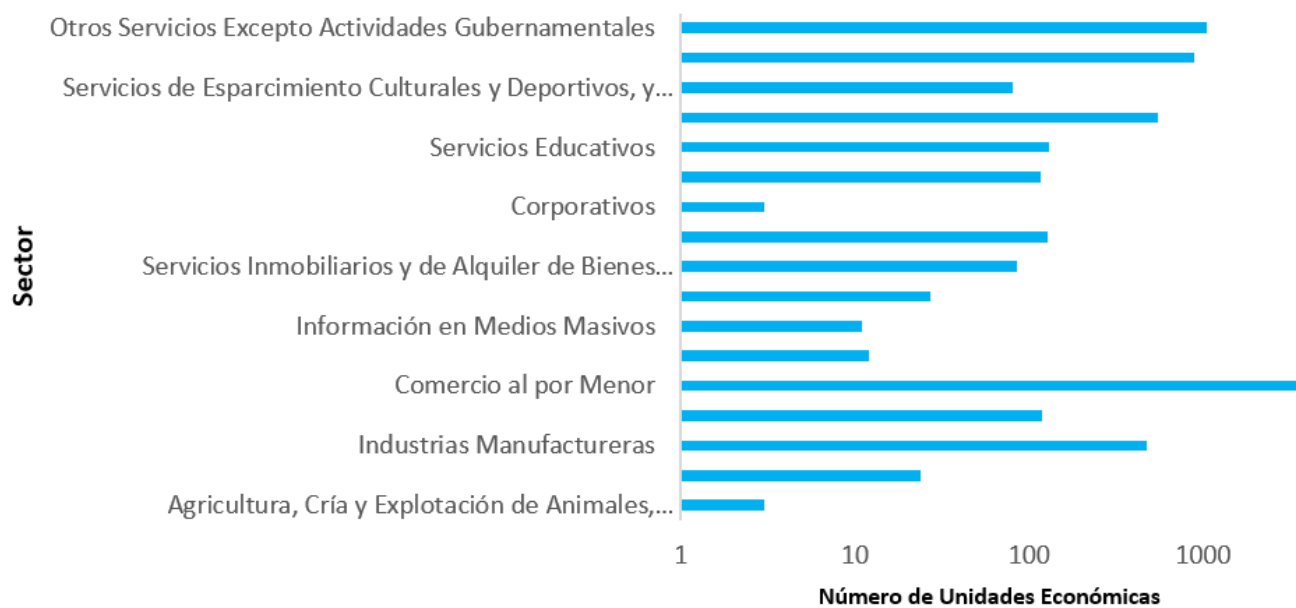


Figura 31. Unidades Económicas por sector en la Alcaldía La Magdalena Contreras (Fuente: INEGI, 2019).

Tabla 23. Clasificación de las actividades económicas siguiendo ambas referencias (INEGI, 2019; SEDEMA,2016).

Sectores económicos INEGI	Sectores económicos SEDEMA
Agricultura, Cría y Explotación de Animales, Aprovechamiento Forestal, Pesca y Caza	SERVICIOS (solo se incluye aquellos relacionados con aprovechamiento forestal y agropecuario)
Construcción	SERVICIOS
Industrias Manufactureras	INDUSTRIAL
Comercio al por Mayor	COMERCIO
Comercio al por Menor	COMERCIO
Transportes, Correos y Almacenamiento	SERVICIOS
Información en Medios Masivos	SERVICIOS
Servicios Financieros y de Seguros	SERVICIOS
Servicios Inmobiliarios y de Alquiler de Bienes Muebles e Intangibles	SERVICIOS
Servicios Profesionales, Científicos y Técnicos	SERVICIOS
Corporativos	SERVICIOS
Servicios de Apoyo a los Negocios y Manejo de Residuos y Desechos, y Servicios de Remediación	SERVICIOS
Servicios Educativos	SERVICIOS
Servicios de Salud y de Asistencia Social	SERVICIOS
Servicios de Esparcimiento Culturales y Deportivos, y otros Servicios Recreativos	SERVICIOS
Servicios de Alojamiento Temporal y de Preparación de Alimentos y Bebidas	SERVICIOS
Otros Servicios Excepto Actividades Gubernamentales	SERVICIOS

9.3. Selección de la tecnología descentralizada

Los resultados analizados para poder seleccionar la tecnología descentralizada en la zona evidencian que la mejor opción la constituyen los HA por sumar 9 puntos, en comparación con las otras tecnologías (Lagunas de estabilización (LE) = 2, RAFA = 3, Tanque séptico (TS) = 2, Tanque Imhoff (TI) = 2, Filtro biológico (FB) = 2, Discos biológicos (DB) = 2). No obstante, todas las opciones analizadas representan un alto potencial para establecerse como sistema. En la Tabla 24 se muestra la matriz con las diferentes tecnologías descentralizadas analizadas, además de mostrarse la sumatoria total de cada una bajo los diferentes criterios estudiados.

Tabla 24. Criterios seleccionados para la tecnología de saneamiento descentralizado.

Criterio	LE ¹	RAFA ²	TS ³	TI ⁴	FB ⁵	DB ⁶	HA ⁷
Factibilidad económica							
Necesidad-espacio	0	1	1	1	1	1	1
Resiliencia	1	0	0	0	0	0	1
Operación y mantenimiento	1	0	0	0	0	0	1
Factibilidad ecológica							
Integración paisajística	0	0	0	0	0	0	1
Generación de residuos con valor económico de reuso	0	0	0	0	0	0	1
Vectores de enfermedades y generación de olores	0	1	1	1	1	1	1
Factibilidad social							
Participación social	1	0	0	0	0	0	1
Aceptación del sistema	0	0	0	0	0	0	1
Filosofía del lugar	0	0	0	0	0	0	1
Total	3	2	2	2	2	2	9

¹Lagunas de Estabilización; ²Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente; ³Tanque séptico; ⁴Tanque Imhoff; ⁵Filtros Biológicos; ⁶Discos Biológicos; ⁷Humedales Artificiales

Los criterios analizados para la selección de la tecnología descentralizada fueron los siguientes:

1) Factibilidad económica (necesidad-área, operación y mantenimiento, resiliencia): En cuanto al área, de las siete tecnologías evaluadas, solo las lagunas de estabilización requieren una superficie amplia para su construcción debido a que el cálculo se basa en cargas volumétricas de DBO₅. En cuanto a la operación y mantenimiento, los filtros y discos biológicos requieren obligatoriamente la disponibilidad de repuestos, en el primero los rociadores de agua y en el segundo los discos. Además de que para su funcionamiento se requiere energía eléctrica (Tilley *et al.*, 2018; CONAGUA, 2019b; Menéndez-Gutiérrez y Dueñas-Moreno, 2020). Desde esta perspectiva no se les concedió ningún puntaje. Del RAFA el costo deriva de limpiar diariamente los vertederos, así como las válvulas de purga de lodos que conducen el agua residual ya que el lodo se acumula fácilmente (CONAGUA, 2019b). Asimismo, para su buen funcionamiento se requiere la estabilización del proceso anaerobio y requiere de tres revisiones fundamentales para su buen funcionamiento que deben ser evaluados por el personal, 1) monitoreo de la eficiencia del reactor, 2) monitoreo de la estabilidad del proceso y 3) monitoreo de la calidad y cantidad del lodo (CONAGUA, 2019b). En los tanques Imhoff al igual que en el RAFA, la revisión es diaria y requiere personal capacitado, porque hay acumulación de gas en los respiraderos y el lodo estabilizado deben retirarse según el diseño. En los humedales y las lagunas de estabilización el mantenimiento involucra el retiro de lodo y en el caso de humedales la poda de la vegetación en crecimiento, la cual se sugiere se realice en un periodo de cada 2 a 3 años; no se requiere personal calificado para llevarlo a cabo. Ambos son sistemas resilientes en comparación con los otros sistemas ya que toleran eventos climáticos extremos. De hecho, se pueden implementar para el control de inundaciones, lo cual los coloca en otras alternativas para amortiguar dichos eventos.

2) Factibilidad ecológica (integración paisajística, generación de residuos con valor económico de reúso, vectores de enfermedades y malos olores): los componentes del paisaje urbano lo constituyen los elementos abióticos (edificios, construcciones, calles) y bióticos (parques, jardines, ríos). Se habla del mejoramiento del espacio urbano si se conservan los elementos bióticos de una ciudad, o se recrean a partir de los elementos ya existentes (Fregoso-Lomas *et al.*, 2016). Cualquier espacio recreado en conjunto con estos dos grupos que provean servicios socioambientales son definidos como “infraestructuras verdes”. El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN, por sus siglas en inglés) y The Nature Conservancy (TNC, 2014), en su guía para el manejo de recursos hídricos, definen una “infraestructura verde” como: *sistemas naturales o seminaturales que proveen servicios útiles para la gestión de los recursos hídricos con beneficios equivalentes o similares a los de la infraestructura hídrica gris, que es la convencional*. Con esta definición las siete tecnologías descentralizadas se clasificarían como “infraestructuras verdes” porque 1) proveen calidad de agua y 2) simulan procesos naturales para el tratamiento de agua residual equivalente al proceso convencional. Sin embargo, en contraposición con esta definición, Benedict y McMahon (2006) proponen que la infraestructura verde son todos aquellos espacios interconectados que conservan los valores y funciones de un ecosistema natural y brindan una serie de beneficios para las personas y los animales. Similar a estos autores, la SEDEMA (s.f.), define también que, las infraestructuras verdes son espacios interconectados, y que son diseñadas y planificadas para ofrecer múltiples servicios socioambientales que fomenten la protección de la biodiversidad, mejora de servicios ecosistémicos, adaptación al cambio climático, prevención y mitigación de riesgos, así como mejora de la calidad de vida, bajo un enfoque de resiliencia. Únicamente los HA son considerados infraestructuras verdes porque cumplen esas premisas (SEDEMA, s.f.; Birch *et al.*, 2004; PNUMA, UICN, TNC, 2014; Muñoz y Crisman, 2019; Stefanakis, 2019; Prescott *et al.*, 2021):

En la CDMX existe un proyecto de infraestructura verde a base de HA, denominado “Sembrando Parques”, del cual, se han recuperado y mejorado diferentes zonas, tales como el Bosque de San Juan de Aragón y el humedal ubicado en la Alcaldía Xochimilco. Este proyecto tiene por objetivo el mejoramiento la calidad del agua del lago del Bosque de San Juan de Aragón, el cual, representa un sitio donde habitan especies de aves migratorias tales como el pelicano blanco americano, garza de dedos dorados, garza blanca, garza morena, garza azul, el ajolote, por mencionar algunos; además de que fomenta un espacio recreativo para los visitantes. En Xochimilco se han empleado HA para mejorar la calidad de agua de los canales y funcionar como corredor biológico desde el Parque Ecológico de Xochimilco hasta el Canal Nacional de Chalco; Xochimilco contiene en su área Suelo de Conservación, en el cual se encuentran a su vez humedales naturales catalogados dentro de la Convención RAMSAR (Sistema Lacustre de Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco) y a su vez se han propuesto otros proyectos a base de HA para su usar el agua tratada en las chinampas (método milenario de cultivo utilizado por los mexicas). La Magdalena Contreras posee un área de valor ambiental, conocido como el “Parque de los Dinamos”, este parque no es reconocido hasta la actualidad ante la CONANP como una ANP según su declaratoria como ANP (Área Natural Protegida) federal debido a la falta de estudios técnicos que se indican en el Artículo Octavo Transitorio de la LGEEPA (Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente) (Jujnovsky *et al.*, 2014). Derivado de las contradicciones ante esta situación, el humedal artificial aumentaría la importancia de la conservación en general en la zona.

La generación de residuos en los sistemas de saneamiento es inevitable, sin embargo, se busca que se genere lo menos posible y que se puedan reusar en forma de biosólidos o biogás. En México el manejo de lodos y disposición final está regulado a través de la NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF,2003) que permite a los

generadores evaluarlos si son aptos para su uso posterior. Generalmente el lodo causa taponamiento y es por esa razón que se tiene que retirar. Si bien, en todos los tratamientos el lodo se puede recuperar y reusar, se tiene que tener en cuenta la cantidad generada en el sistema y calidad; se deben considerar los diferentes procesos para recuperarlos tales como la estabilización aerobia, anaerobia y composta, lo cual incrementa su costo (CONAGUA 2019a; CONAGUA, 2019d; CONAGUA, 2019e). La cantidad de lodos producidos en un humedal artificial es menor en comparación con los otros sistemas, ya que las macrófitas lo adaptan como sustrato, característica que no sucede con los otros procesos, no obstante, un análisis de tipo CRETI (abreviatura que identifica las características de los materiales peligrosos: Corrosivo, Reactivo, Explosivo, Tóxico, Inflamable y Biológico infeccioso) debe ser efectuado en cada ocasión (Delgadillo *et al.*, 2010; Capodaglio *et al.*, 2017; CONAGUA 2019b; Kummar y Dutta, 2019). Respecto a los otros sistemas, en el RAFA, tanque séptico y tanque Imhoff los gases producidos se pueden utilizar en forma de biogás; se requiere un costo extra debido a las técnicas que deben derivarse para poder aprovecharlo (descontaminación y cilindros para almacenarlo) (CONAGUA, 2019a; CONAGUA, 2019c).

Delgadillo *et al.*, (2010) exponen que los vectores de enfermedades (moscas, mosquitos e insectos) y la generación de malos olores debido al agua estancada son dos razones por lo que los sistemas no son aceptados dentro de la comunidad. En México las enfermedades ocasionadas frecuentemente por este hecho son el dengue, el zika y chikunguya (Saborío-Bogantes, 2016). Son infecciones virales transmitidas a través de los mosquitos, *Aedes aegypti* y *A. albopictus*. Si bien, si se detectan a tiempo, los síntomas se pueden controlar, pero si no, pueden ocasionar la muerte por dengue o causar microcefalia en un recién nacido por zika. Cabe destacar que en la zona que se pretende usar la tecnología descentralizada no hay presencia endémica de esas dos especies; no obstante, en un estudio ejecutado por Mejía-Guevara *et al.*, (2020) reportaron la presencia de

Aedes aegepty en once alcaldías de la CDMX, aunque, hasta el momento, no tiene importancia de salud pública, no debe ser descartado en un futuro, ya que, este mismo estudio indica que la incipiente colonización del mosquito deriva del aumento de la temperatura a nivel mundial en zonas con altitud como la CDMX (2,240 msnm), de las inundaciones durante la temporada de lluvias y de los asentamientos humano irregulares con carencia de servicios públicos.

En cuanto a la generación de olores, de las tecnologías seleccionadas, en las lagunas de estabilización, los HAFS, filtros y discos biológicos se generan tanto olores como vectores porque el agua está en contacto con las condiciones atmosféricas. Sin embargo, en los HA se presenta la alternativa del HAFSS que utiliza un material de empaque como medio filtrante donde el agua ya no está en contacto directo. En cuanto a las otras tecnologías el agua se encuentra almacenada en tanques y por tanto tampoco está en contacto directo.

3) Factibilidad social (aceptación del sistema, participación social, filosofía del lugar): las lagunas de estabilización y los HA diseñados para la recreación y conservación son aceptados socialmente (Ghermandi y Fitchman, 2015; Zitácuaro-Contreras *et. al.*, 2021). Ghermandi y Fitchman (2015) describieron en su estudio que ambos sistemas naturales son aceptados por la comunidad si son situados en un espacio al aire libre y que promuevan actividades recreativas tales como el senderismo o el ciclismo, siempre y cuando legislación ambiental lo permitan. Ambos sistemas son estéticos visualmente ya que pueden diseñarse al simularse como piscinas ecológicas, tal como se observa en la Figura 32, una laguna de estabilización ubicada en el Jardín Botánico de Naples, EE.UU. y el humedal construido en el Parque ecológico de Xochimilco, México. Pueden incluir vegetación, y situarse alrededor en senderos útiles para caminatas y bancas para descanso. En comparación con los otros sistemas, no se puede potenciar su uso en este sentido ya que a la vista no son perceptibles estéticamente.



Figura 32. a) Laguna de estabilización en Florida, EEU.UU., b) Humedal artificial en Xochimilco, México. (Fuente: <https://archive.naplesnews.com/lifestyle/neapolitan/the-waterfront-war-retention-ponds-have-morphed-from-storm-filters-to-landscape-features-ep-38792843-339907961.html/>; <http://data.sedema.cdmx.gob.mx:8081/areasnaturalesprotegidas/index.php/parque-ecologico-de-xochimilco>)

En Latinoamérica, existe la participación social a base de los HA. Un estudio de caso ocurrió en el estado de Veracruz, México, en una comunidad denominada Pinoltepec, donde se promovió el uso de plantación ornamental de alcatraces, anturios y azucenas como estrategia para su producción y venta, el grupo involucrado fueron mujeres, ellas se encargan del mantenimiento del humedal (Hernández-Alarcón, 2016). Otro caso excepcional fue en El Salvador, la comunidad de San José Las Flores fue invitada a participar en el proyecto de saneamiento con un humedal artificial subsuperficial debido a la presencia de enfermedades gastrointestinales en la población; se creó un comité regulado por la comunidad misma, se eligió el tipo de saneamiento (un humedal de flujo subsuperficial) y el sitio. Este tipo de beneficio social no se percibe en los otros sistemas ya que se requiere forzosamente un equipo técnico para su mantenimiento excluyendo a la comunidad.

9.4. Diseño conceptual del Humedal Artificial

9.4.1. Selección del sitio

De acuerdo al análisis para la selección del sitio en donde se pretende instalar la tecnología descentralizada en la zona que comprende el área media y baja de las laderas del cauce Río Magdalena, así como las zonas circundantes que comprenden potenciales fuentes de alimentación para el establecimiento del sistema se identificaron los siguientes sitios como potenciales ubicaciones del sistema, se muestran en la Figura 33:

A) Alimentación del Río Magdalena en la segunda sección de los Dinamos en diferentes puntos.

B) Alimentación proveniente de una vivienda ubicada en el Segundo Dinamo.

C) Alimentación proveniente de una vivienda correspondiente a alguna de las zonas comprendidas por el proyecto de zonas no consolidadas (Cazulco (C1), Oxoyuca (C2), o Tierra Colorada (C3).

D) Alimentación proveniente de la PTAR Magdalena Contreras.

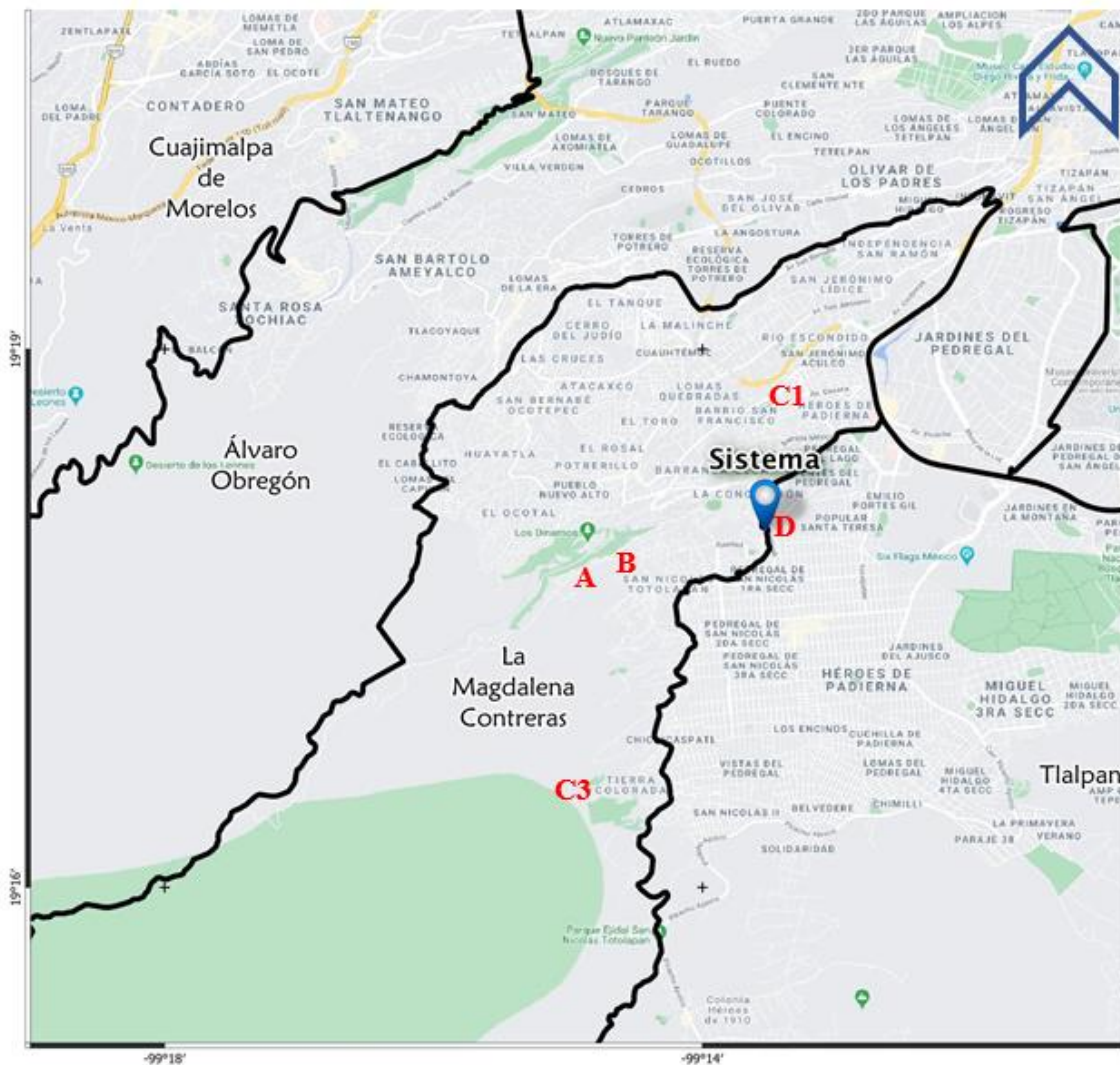


Figura 33. Ubicación de las Propuestas; A) Alimentación del Río Magdalena en la segunda sección de los Dinamos en diferentes puntos; B) Alimentación proveniente de una vivienda ubicada en el Segundo Dinamo; C) Alimentación proveniente de una vivienda correspondiente a alguna de las zonas comprendidas por el proyecto de zonas no consolidadas (Cazulco (C1), Oxoyuca (C2), o Tierra Colorada (C3); D) Alimentación proveniente de la PTAR Magdalena Contreras.

El análisis efectuado para la opción con mayor puntaje, se desarrolla de manera puntual a continuación:

- 1) Visibilidad ante la comunidad:** se le asignó un valor “alto” al tubo de descarga PTAR Magdalena Contreras', ya que se encuentra cerca del Foro Cultural Magdalena Contreras y del Deportivo 1° de Mayo. Debido a la cercanía, hay mayor interacción entre los habitantes que asisten a actividades recreativas y el humedal. En cuanto a las opciones de sitio b) y d) solamente sería instalado para la familia o familias que residen ahí y no se generaría una concientización colectiva del problema ambiental que existe en la alcaldía.
- 2) Filosofía del lugar:** se le asignó un valor alto al tubo de descarga de la PTAR al ubicarse cerca del Foro Cultural Magdalena Contreras (FCMC) ya que corresponde perfectamente con la filosofía del lugar. El Foro Cultural se inauguró en 1979, brinda diversas actividades para los contrerenses, tales como danza, cine, pintura, teatro, entre otros, es un sitio importante de la comunidad, ya que al mencionar que este sirve como un lugar de expresión e ideas refleja en todo sentido el orgullo de ser habitante del barrio de La Magdalena Contreras (La Magdalena Contreras, 2020).
- 3) Mejoramiento del espacio urbano:** a los cuatro sitios se les asignó un valor “alto” porque pertenecen a la zona urbana. La implementación del humedal contribuirá al mejoramiento del espacio urbano en cualquiera de esas zonas y abonaría al proyecto “Sembrando Parques”. Como se discutió anteriormente, el Parque Nacional de los Dinamos no se encuentra catalogado como una ANP, al no catalogarse como una ANP, será inevitable que la mancha urbana rebase el ecosistema de La Magdalena Contreras. En las ciudades es importante cuidar de aquellos sitios que aún mantienen un ecosistema, pues de ellos se obtienen una serie de beneficios, tal como es el uso del agua del Río Magdalena, del cual, una parte de su cauce se usa para su potabilización. El mejoramiento del espacio urbano aumenta el interés de la población sobre

su cuidado, ya que es donde converge la interacción del individuo con su entorno para desarrollarse; le confiere una identidad. Tal como el estudio llevado a cabo por Hernández-Bonilla (2005) indica que las personas construyen espacios públicos de integración y consolidación urbana porque en ello integran su vida en la comunidad y así satisfacen sus necesidades, les enseña valores, y con ello aumenta la lucha por conservarlos. Así el autor indica que “mantener conexiones estrechas entre el espacio y el individuo, además de mantener esa relación a largo plazo de generación en generación es crucial para el desarrollo y permanencia de una vida pública sustentable y de trascendencia”.

- 4) **Seguridad del sistema:** la instalación en la PTAR asegura la preservación de los componentes del sistema, ya que, conformará parte del tren de tratamiento, con ello la operación y mantenimiento por el personal autorizado. Si se instala en una vivienda o en el río, a pesar de que una de las ventajas del humedal sea la facilidad de interactuar con las personas, se tiene que retirar el lodo y realizar trabajos de poda, en estos casos se requiere la supervisión del personal.
- 5) **Racionalidad ambiental:** la ubicación dentro de un área con vegetación incrementará las relaciones bióticas entre las especies, fomentando así su proliferación en cuando a diversidad y abundancia, lo cual es un claro beneficio para la comunidad en general. De los sitios propuestos el único que se encuentra más cercana al área con vegetación es la opción “a” (Figura 27). En México, hasta ahora, no se ha identificado la importancia de estos humedales para la biodiversidad. No obstante, Knapp *et al.*, (2019) y Zhang *et al.*, (2020), detallan que a pesar la investigación en los últimos años respecto al tratamiento de agua residual, se han explorado casos de los humedales construidos y su interacción con la flora y fauna. Tal como un humedal construido en Italia, se identificó la presencia de vegetación que representaba la zona de un parque regional, 54% de los taxones representaban la flora del

sitio, de esos el 6% de los taxones son de interés para la conservación que a su vez fungen como un refugio para aves nidificantes debido a la interacción dada (Wiegler *et al.*, 2017).

En la Tabla 25 los resultados evidencian que la opción constituida por una alimentación proveniente de la PTAR de la zona (opción “d”) es la mejor por sumar 13 puntos, tal como se muestra en la Tabla 23, en comparación con las opciones restantes, para el Segundo Dinamo (opción “a”) se sumaron 12 puntos, para la vivienda ubicada en el Segundo Dinamo (opción “b”) se obtuvieron 7 puntos y para las zonas no consolidadas (opción “c”) se sumaron 8 puntos. No obstante, todas las opciones exploradas representan un alto potencial para constituirse como el sitio de instalación del sistema. Sin embargo, los sitios “a”, “b” y “c” explorados y en primera instancia, no poseen beneficios de visibilidad, aseguramiento del sitio por habitantes de la zona, acceso para seguimiento, mantenimiento y cuidado del lugar, restando así en algunas de los principales beneficios que intenta aportar el sistema.

Tabla 25. Matriz para selección del sitio de la implementación.

Sitio	Río Magdalena 2ª sección	De una vivienda del Segundo Dinamo	De una vivienda ubicada en alguna de las zonas no consolidadas	Proveniente de agua de tubo de descarga de PTAR al Foro cultural (PTAR)
Visibilidad ante la comunidad	2	1	2	3
Filosofía del lugar	3	1	1	3
Mejoramiento del espacio urbano	3	3	3	3
Seguridad del sistema	1	1	1	3
Racionalidad ambiental	3	1	1	1
Total	12	7	8	13

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, se plantea la implementación del humedal artificial en un lugar que impacte de manera positiva a los habitantes de la zona, el cual pueda ser identificado y visitado por ellos, siendo entonces la ubicación seleccionada en el Foro Cultural Magdalena Contreras (19.30434 N, - 99.23479 E). El abastecimiento de agua al sistema se logrará a partir de una tubería derivada que proviene de la PTAR Magdalena Contreras (19.30272 N, - 99.23972 E). El sitio dispuesto para el establecimiento del sistema que se ubicará tentativamente en la parte poniente del FCMC colinda al norte con la calle Felipe Ángeles, al oeste con Camino Real de Contreras, al sur con la 1° cerrada de Contreras y al Oeste con la Calle de Castrejón, destacando que el HA se localizaría en la parte poniente del FCMC (Figura 34). La conceptualización del proyecto plantea representar una alternativa no invasiva dentro del lugar, que ejemplifique

y promueva el sentido social y educativo en materia de conservación y utilización responsable del agua. De manera adicional un factor importante a considerar se compone por las condiciones de disponibilidad de recursos y servicios que brinde el lugar, donde en este caso el FCMC es favorecido aún más como la alternativa con mayor viabilidad por encontrarse disponibles los recursos y servicios.

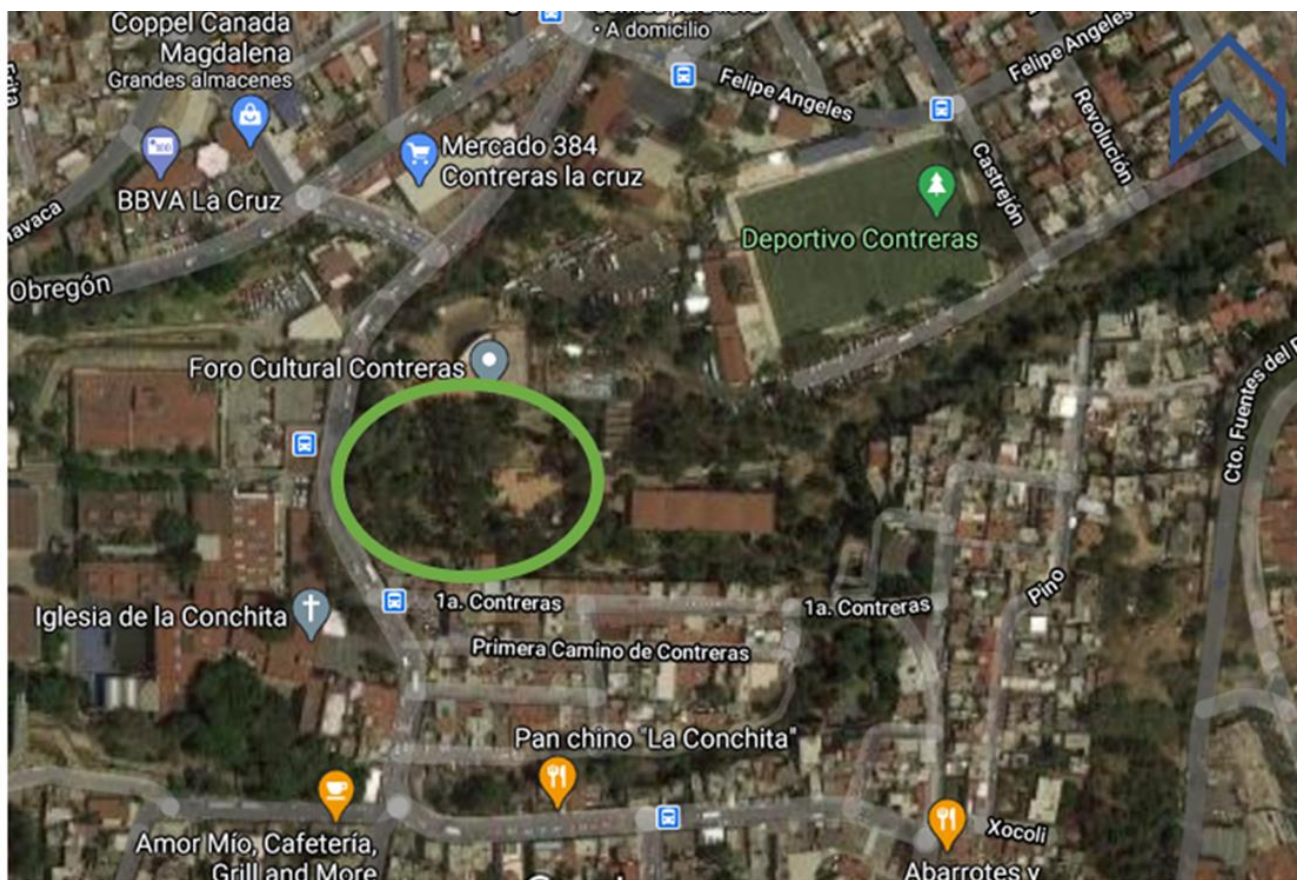


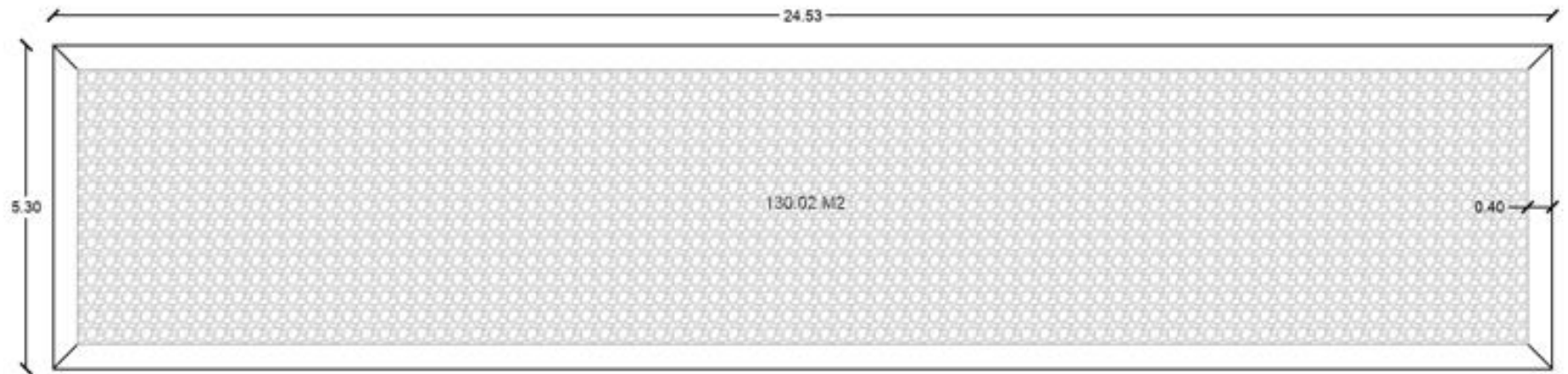
Figura 34. Ubicación del sitio propuesto para implementar el Humedal Artificial (Google Maps).

9.4.2. Diseño hidráulico

Se presenta el diseño del humedal que obedece a las ecuaciones presentadas en la metodología. El dimensionamiento del humedal se estimó a partir de la DBO₅ mg/L ya que obtuvo una carga orgánica mayor que los SST mg/L; para la DBO₅ resultó una concentración inicial de 45.14 mg/L, mientras que para los SST una concentración de 44.18 mg/L; la concentración deseada es la indicada en los lineamientos de la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF,1998) la cual estipula un efluente de 30 mg/L de DBO₅. Así, en la Figura 35 se calculó un área de 130.02 m², la cual cumple con los parámetros de diseño establecidos por la USEPA (2000), un TRH de 0.68 días y una profundidad de 0.40 metros.

La conductividad hidráulica y la porosidad son propiedades del medio granular. La arena, grava y el suelo en sí, son materiales comunes que se consideran en diferentes manuales y estudios (EPA, 1993; CONAGUA, 2019; USEPA, 2000; Serrano y Corzo, 2008). En un estudio planteado por Wang *et al.*, (2020), se evaluaron tres tipos de materiales, 1) naturales, 2) derivados de desechos industriales y de la agricultura y 3) artificiales. Mediante la metodología de una escala cualitativa se calificó a cada material a través de cinco características (permeabilidad, disponibilidad, costo, reúso y capacidad de remoción). Se halló que los materiales naturales muestran un alto puntaje en comparación con los otros materiales. Entre los materiales naturales evaluados se encontraban la grava, arena, zeolita, caliza, rocas volcánicas, minerales, sedimento y esquisto. La grava fue el sustrato que presentó el mayor puntaje (19 puntos, fue el máximo puntaje evaluado) debido a su alta disponibilidad en el mercado, coste, permeabilidad y remoción de contaminante, principalmente metales pesados. En otro estudio más minucioso llevado a cabo por Wu *et al.*, (2015), se evaluaron nueve sustratos, entre ellos, zeolita, la grava, antracita, vermiculita, esquisto, escoria de acero, cerámica para filtro, bio-cerámica y una combinación de tres sustratos (zeolita, antracita y bio-cerámica). La combinación de los tres sustratos

resultó ser el indicado para tratar agua residual doméstica. No obstante, en el estudio no se consideró la combinación de otros sustratos, de forma individual se señala que son costosos frente a otros materiales tales como la grava, el esquisto o la antracita. Bajo esta justificación, el material empleado que se consideró fue la grava.



TRH: 1.68 Días

Profundidad del lecho: 0.40 metros

Área total: 130.02 m²

Ancho: 24.53

Largo: 24.53

Figura 35. Diseño del Humedal de Flujo Sub-superficial horizontal.

En la Figura 36 se reúnen los criterios anteriormente expuestos, como se plantea el primer paso es tomar el agua residual a tratar, en este caso, el efluente, es la tubería derivada de la PTAR Magdalena Contreras. Derivado de los resultados de calidad del agua residual tratada de la PTAR Y se pretende que el agua sea reutilice en dos áreas, 1) sanitarios y 2) descarga al Río Magdalena. Esto último justificado en las actividades económicas predominantes en la alcaldía, donde el sector Servicios es el mayor generador de agua residual.

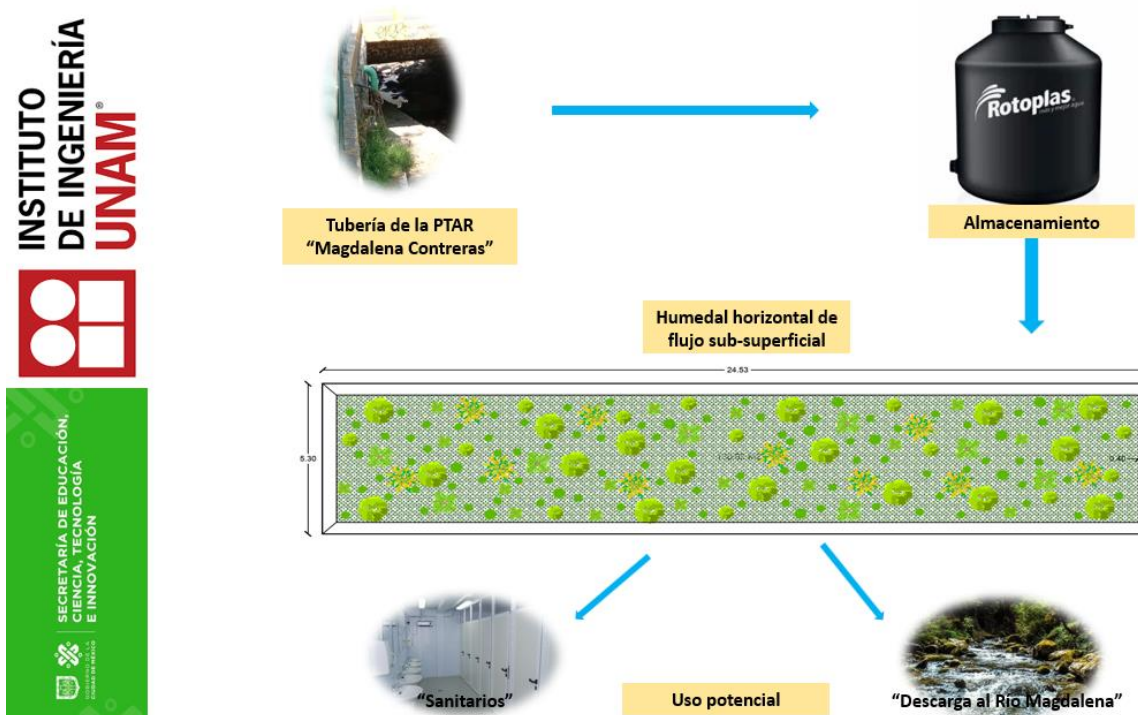


Figura 36. Saneamiento descentralizado a base de un HAFSS con uso potencial en sanitarios y descarga al Río Magdalena.

10. Conclusiones

- La PTAR Magdalena Contreras requiere un mejoramiento en cuanto a eficiencia de tratamiento biológico ya que la relación DBO_5/DQO analizada es baja. Los parámetros de calidad de agua residual tratada para diferentes usos potenciales evaluados bajo tres normas ambientales: la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997), la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1998) y la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 1995); indican que para el uso de descarga al río se cumplen con todos los parámetros indicados en la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997), excepto, con los coliformes totales; el cual está asociado con la relación baja de la DBO_5/DQO de la PTAR; respecto al uso de contacto directo no se cumplen los parámetros de DBO_5 , sólidos suspendidos totales y coliformes fecales, en cuanto al contacto indirecto no se cumplen los parámetros de sólidos suspendidos totales y coliformes fecales; lo que respecta a su reúso para potabilizar el agua tratada, el mineral aluminio excedió los LMP y debe ser monitoreado. Cabe recalcar que el número de datos por cada parámetro no fueron los suficientes, encontrando que la PTAR no se encuentra operando adecuadamente.

- De acuerdo al análisis del uso potencial se sugiere que el agua tratada sea usada en áreas verdes, descarga al río o sanitarios ya que el sector “Servicios” es el mayor generador de agua residual en la Alcaldía La Magdalena Contreras. Lo que respecta al uso en sanitarios se debe prestar atención al cumplimiento de los parámetros incluidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1998) ya que se trata de agua residual con contacto directo.

- De acuerdo con la matriz de beneficios analizada, la selección de la tecnología descentralizada, resultaron ser los humedales artificiales adecuados a emplearse como efluente hacia el Foro Cultural Magdalena Contreras al obtener

el mayor puntaje bajo las tres premisas propuestas: 1) Factibilidad económica, 2) Factibilidad ecológica, 3) Factibilidad social.

- De acuerdo con la selección del sitio se propone que el humedal subsuperficial de flujo horizontal sea ubicado en la PTAR Magdalena Contreras en donde un tubo de descarga será usado como efluente. Dicho efluente será tratado en el humedal para su posterior uso cerca del Foro Magdalena Contreras. El Foro es un sitio donde se reúnen aspectos culturales y la población es parte de ella. La implementación en el sitio es un beneficio ambiental y social en dicha zona.

Durante la última década se han propuesto diversas soluciones para atender la problemática ambiental derivada en el Río Magdalena, entre ellas la construcción de una PTAR que hasta ahora no presenta la totalidad de su función. En este trabajo se presenta una propuesta de saneamiento descentralizado constituida por humedales artificiales, específicamente de un humedal de flujo subsuperficial. Se propone utilizar como efluente el tubo de descarga de la PTAR Magdalena Contreras. No, obstante la calidad físico-química del agua tratada de la PTAR debe seguir siendo monitoreada por las autoridades competentes y poner atención en aquellos parámetros antes mencionados. Los beneficios de un humedal se dividen en tres aspectos 1) Económico, 2) Social y 3) Ambiental; cualquier tecnología descentralizada debe ser analizada bajo estas tres premisas.

Referencias

- Abdelhakeem, S. G., Abouloos, S. A., y Kamel, M. M. (2016). Performance of a vertical subsurface flow constructed wetland under different operational conditions. *Journal of Advanced Research*, 7(5), 803–814. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2015.12.002>
- Adegoke, A. y Stenström, T. (2019). Septic Systems. En, J.B. Rose and B. Jiménez-Cisneros (eds), *Water and Sanitation for the 21st Century: Health and Microbiological Aspects of Excreta and Wastewater Management (Global Water Pathogen Project)*. (J.R. Mihelcic and M.E. Verbyla (eds), Part 4: Management of Risk from Excreta and Wastewater - Section: Sanitation System Technologies, Pathogen Reduction in Non-Sewered (On-site) System Technologies), Michigan State University, E. Lansing, MI, UNESCO. <https://doi.org/10.14321/waterpathogens.59>
- Alcaldía La Magdalena Contreras. (2020). *Programa Provisional del Gobierno*. <https://transparencia.mcontreras.gob.mx/media/ls/2020/07/09/Programa.pdf>
- Amoatey, P., y Bani, R. (2011). Wastewater Evaluation and Management. En, F. García (Ed.), *Waste Water Management* (pp. 379–398). <https://doi.org/10.5772/16158>
- Anda-Sánchez, José de. (2017). Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México. *Sociedad y ambiente*, (14), 119-143. Recuperado en 05 de mayo de 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-65762017000200119&lng=es&tlng=es.
- Antequera-Durán, N. (Ed). (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. <https://blogdelagua.com/wp-content/uploads/2013/02/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales.pdf>
- Banco Mundial (2020a). Desarrollo Urbano. <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/overview#:~:text=Globally%2C%20over%2050%25%20of%20the,housing%20their%20expanding%20populations%20need>.

- Banco Mundial (2020b). Agua residual: de residuo a recurso. https://www.bancomundial.org/es/topic/water/publication/wastewater-initiative#la_iniciativa

- Birch, G. F., Matthai, C., Fazeli, M. S., y Suh, J. Y. (2004). Efficiency of a constructed wetland in removing contaminants from stormwater. *Wetlands*, 24(2), 459-466. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2004\)024\[0459:EOACW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2004)024[0459:EOACW]2.0.CO;2)

- Brix, H. (1993). Wastewater treatment in Constructed Wetlands: System Design, Removal Process, and Treatment Performance. En, Gerald, Moshiri (Ed.), *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement* (pp. 9-23). Lewis Publisher.

- Brix, H. (2003). *Plants used in constructed wetlands and their functions* [Discurso principal]. 1 St. International Seminar on the Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in Constructed Wetlands.

- Caro-Borrero, A., Carmona-Jiménez, J., González-Martínez, T., y Mazari-Hiriart, M. (2015). Hydrological evaluation of a peri-urban stream and its impact on ecosystem services potential. *Global Ecology and Conservation*, 3, 628–644. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2015.02.008>

- Caro-Borrero, A., Carmona Jiménez, J., y Mazari-Hiriart, M. (2016). Evaluation of ecological quality in Peri-Urban rivers in Mexico City: A proposal for identifying and validating reference sites using benthic macroinvertebrates as indicators. *Journal of Limnology*, 75(2), 1–16. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2015.1304>

- Carmona-Jiménez, J., y Caro-Borrero, A. (2017). The last peri-urban rivers of the Mexico Basin: establishment of potential reference conditions through the evaluation of ecological quality and biological indicators. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(2), 425–436. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.03.019>

- Capodaglio, A. G., Callegari, A., Ceconet, D., y Molognoni, D. (2017). Sustainability of decentralized wastewater treatment technologies. *Water Practice and Technology*, 12(2), 463–477. <https://doi.org/10.2166/wpt.2017.055>

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2000). Situación del subsector agua

potable, alcantarillado y saneamiento. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2010). Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015a). Potabilización, desinfección y tratamiento de agua. En: Situación del subsector agua potable, drenaje y saneamiento, SEMARNAT.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2015b). Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2016). Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2017). Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2018). Estadísticas del Agua en México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2019a). Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: zonas rurales, periurbanas y desarrollos turísticos. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2019b). Diseños de PTARM: Humedales Artificiales. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2019c). Diseños de PTARM: Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2019d). Introducción al tratamiento de aguas residuales. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2019e). Tratamiento y disposición de lodos. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2019f). Diseños de PTARM: Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- Comisión Nacional del Agua. (2020). Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- Comisión Nacional del Agua. (2021). Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)
- Cooper, P. (1999). A Review of the Design and Performance of Vertical-flow and Hybrid Reed Bed Treatment Systems. *Water Science*, 40(3), 1–9.
- Diario Oficial de la Federación (1995). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994: salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites máximos permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2063863&fecha=31/12/1969#gsc.tab=0
- Diario Oficial de la Federación (1997). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996: que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

<http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/sgaa-15-13.pdf>

- Diario Oficial de la Federación (1998). Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997: que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

<http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/sgaa-15-13.pdf>

- Diario Oficial de la Federación (2003). Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002: protección ambiental. – Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

[https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=691939&fecha=15/08/2003#gsc.ta
b=0.](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=691939&fecha=15/08/2003#gsc.tab=0)

- de la Cruz, B. (2015). Evaluación de los Servicios Ecosistémicos proporcionados por los Humedales Artificiales. Aplicación al Humedal Artificial de Carrícola (Valencia). [Tesis de Maestría. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Valencia].

<https://m.riunet.upv.es/handle/10251/54587>

- Dhote, S., y Dixit, S. (2009). Water quality improvement through macrophytes - A review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 152(1–4), 149–153.

<https://doi.org/10.1007/s10661-008-0303-9>

- Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., y von Sperling, M. (2017). Treatment Wetlands. En, *Biological Wastewater Treatment Series* (Vol. 7, pp. 5–41). IWA. <https://doi.org/10.2166/9781780408774>

- Ellis, K. V., y Mara, D. (1983). Stabilization Ponds: Design and Operation. *Critical Reviews in Environmental Control* 13(2), 69–102.

<https://doi.org/10.1080/10643388309381703>

- Flores-Pichardo, M. (2008). *Evaluación de la calidad del agua en el río Magdalena* [Tesis de Licenciatura. Facultad de Química, UNAM]. TESIUNAM.

- Frazer-Williams, R. A. D. (2010). A Review of the Influence of Design Parameters on the Performance of Constructed Wetlands. *Journal of Chemical Engineering, IEB*, 25(1). <https://doi.org/10.3329/jce.v25i0.7237>

- Gauss, M. (2008). Constructed wetlands: a promising wastewater treatment system for small localities. *Water and Sanitation Program, Latin America and the Caribbean*. World Bank Policy Research. <https://ssrn.com/abstract=1149070>

- Garzón-Zúñiga, M. A., González-Zurita, J., y García-Barrios, R. (2016). Evaluación de un sistema de tratamiento doméstico para reúso de agua residual. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(2), 199–211. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.02.06>

- Ghermandi, A., y Fichtman, E. (2015). Cultural ecosystem services of multifunctional constructed treatment wetlands and waste stabilization ponds: Time to enter the mainstream? *Ecological Engineering*, 84, 615–623. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.067>

- Guerrero, T., Rives, C., Rodríguez, A., Saldívar, Y., y Cervantes, V. (2009). El agua en la Ciudad de México. *Ciencias*, 94(094). <http://www.revistas.unam.mx/index.php/cns/article/view/14848>

- Greenway, M. (1997). Nutrient content of wetland plants in constructed wetlands receiving municipal effluent in tropical Australia. *Water Science and Technology*, 35(5), 135–142. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00062-0](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00062-0)

- Greenway, M. (2003). Suitability of macrophytes for nutrient removal from surface flow constructed wetlands receiving secondary treated sewage effluent in Queensland, Australia. *Water Science and Technology*, 48(2), 121–128. <https://doi.org/https://doi.org/10.2166/wst.2003.0101>

- Heredia-Deiters, G. (2013). Tratamiento semi-descentralizado de aguas residuales como estrategia para ciudades en rápido crecimiento. Recuperado el 28 de junio del 2021, de: [https://issuu.com/gustavoheredia/docs/tratamiento semidescentralizado de](https://issuu.com/gustavoheredia/docs/tratamiento_semidescentralizado_de)

- Hernández-Alarcón, M. E. (2016). Humedales ornamentales con participación comunitaria para el saneamiento de aguas municipales en México. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable*, 1(2), 1–12. <http://www.rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/16>
- Hernández-Bonilla, M. (2005). Mejoramiento del espacio público en las colonias populares de México. Caso de estudio de Xalapa-Veracruz. *Revista INVI*, 20(53). <https://doi.org/10.5354/0718-8358.2005.62183>
- ITRC. (2003). Technical and regulatory guidance document for Constructed Treatment Wetlands. *Technology*, December, 128.
- Kumar, S., y Dutta, V. (2019). Constructed wetland microcosms as sustainable technology for domestic wastewater treatment: an overview. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(12), 11662–11673. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04816-9>
- La Magdalena Contreras. (2020). *Alcaldía Magdalena Contreras*. <https://mcontreras.gob.mx/mi-alcaldia/la-magdalena-contreras/>
- López, D, Sepúlveda, M, y Vidal, G. (2016). *Phragmites australis* and *Schoenoplectus californicus* in constructed wetlands: Development and nutrient uptake. *Journal of soil science and plant nutrition*, 16(3), 763-777. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-95162016000300015&lng=es&tlng=n.
- Luna-Pabello, Víctor Manuel y Aburto-Castañeda, Sergio. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 17(1), 32-55. Recuperado en 08 de agosto de 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-888X2014000100003&lng=es&tlng=es.
- Lin, H., Liu, J., Dong, Y., Ren, K., y Zhang, Y. (2018). Absorption characteristics of compound heavy metals vanadium , chromium , and cadmium in water by emergent macrophytes and its combinations. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 17820–17829. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11356-018-1785-9>

- Maiga, Y., von Sperling, M. y Mihelcic, J.R. (2017). Constructed Wetlands. En: J.B. Rose y B. Jiménez-Cisneros, (eds) Global Wter Pathogen Project. <http://www.waterpathogens.org> (J.R. Mihelcic and M.E. Verbyla) (eds) Part 4 Management Of Risk from Excreta and Wastewater) <http://www.waterpathogens.org/book/constructed-wetlands> Michigan State University, E. Lansing, MI

- Marín-Acosta, C., Solís-Silván, R., López-Ocaña, G., Bautista-Margulis, R.G., Romellón-Cerino, M.J. (2016). Tratamiento de aguas residuales por humedales artificiales tropicales en Tabasco, México. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 5(10). [10.23913/ciba.v5i10.54](https://doi.org/10.23913/ciba.v5i10.54)

- Marín-Muñiz, J. (2017). Humedales Construidos En México Para El Tratamiento De Aguas Residuales, Producción De Plantas Ornamentales Y Reúso Del Agua. *AgroProductividad*, 10(5), 90–95. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/1028>

- Martínez-Deloya, A. (2001). Biodiscos: una alternativa de tratamiento biológico para aguas residuales cuando no se dispone de grandes extensiones de terreno. *Tecnología En Marcha*, 13(3), 57–59. https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/1541

- Menéndez-Gutiérrez, C., y Dueñas-Moreno, J. (2020). Criterios de diseño y escalado de biodiscos para el tratamiento de aguas residuales. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 41(2), 64-74. Epub 01 de marzo de 2020. Recuperado en 18 de diciembre de 2022, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382020000200064&lng=es&tlng=es.

- Mejía-Guevara, M.D., Correa-Morales, F., González-Acosta, C., Dávalos-Becerril, E., Peralta-Rodríguez, J.L., Martínez-Gaona, A., Hernández-Nava, M., Ramírez-Huicochea, C., Rosas-Trinidad, L., Carmona-Pérez, M., Salazar-Bueyes, V., Tapia-Olarte, F., y Moreno-García, M. (2020). El mosquito del dengue en la Ciudad de México. Invasión incipiente de *Aedes aegypti* y sus potenciales riesgos. *Gaceta médica de México*, 156(5), 388-395. Epub 27 de mayo de 2021. <https://doi.org/10.24875/gmm.20000009>

- Admasu, M., y Tesfaye M. Ecological Conditions and Ecosystem Services of Artificial Wetlands in Semiarid Ethiopian Highlands, *International Journal of Ecology*, 2022, 19. <https://doi.org/10.1155/2022/7667611>

- Jewell, W. J. (1994). Engineering and Cost Considerations: Sludge Management and Land Application. En, C. E. Clapp, W. E. Larson, R. H. Dowdy (Eds.), *Sewage Sludge: Land Utilization and the Environment*. (pp. 41–54). SSSA Misc. Publication. <https://doi.org/10.2134/1994.sewagesludge.c8>

- Jujnovsky, J. (2006). *Servicios ecosistémicos relacionados con el recurso agua en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México* [Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias, UNAM]. TESIUNAM.

- Jujnovsky, J., Almeida-leñero, L., Bojorge-garcía, M., Monges, Y. L., Cantoral-uriza, E., y Mazari-Hiriart, M. (2010). Servicios ecosistémicos hidrológicos: calidad y cantidad del agua en el río Magdalena, Ciudad de México. *Hidrobiológica*, 20(2), 113–126. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972010000200003&lng=es&tlng=

- Kadlec, R. H., y Wallace, S. (2008). *Treatment Wetlands*. <https://doi.org/10.1201/9781420012514>

- Karczmarczyk, A. (2004). Phosphorus removal from domestic wastewater in horizontal subsurface flow constructed wetland after 8 years of operation—a case study. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 12(4), 126–131. <https://doi.org/10.1080/16486897.2004.9636833>

- Karim, M. R., Manshadi, F. D., Karpiscak, M. M., y Gerba, C. P. (2004). The persistence and removal of enteric pathogens in constructed wetlands. *Water research*, 38(7), 1831–1837. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.12.029>

- Knapp, S., Schmauck, S., y Zehnsdorf, A. (2019). Biodiversity impact of green roofs and constructed wetlands as progressive eco-technologies in urban areas. *Sustainability (Switzerland)* 11(20), 2-26. MDPI. <https://doi.org/10.3390/su11205846>

- Lazcano-Carreño, C., (2016). Tratamiento Anaeróbico. En, Lazcano-Carreño (Ed.),

- Biotecnología de aguas y aguas residuales*. (2 ed., pp. 369-393). Eco Ediciones.
- Maiga, Y., von Sperling, M. and Mihelcic, J.R. (2017). Constructed Wetlands. En, J.B. Rose y B. Jiménez-Cisneros (Eds.), *Water and Sanitation for the 21st Century: Health and Microbiological Aspects of Excreta and Wastewater Management (Global Water Pathogen Project)*. (J.R. Mihelcic and M.E. Verbyla (Eds.), Part 4: Management Of Risk from Excreta and Wastewater - Section: Sanitation System Technologies, Pathogen Reduction in Sewered System Technologies. UNESCO. <https://doi.org/10.14321/waterpathogens.66>

 - Marsalek, Jiri, Jiménez-Cisneros, B.E, Malmsquit, P.A. Karamouz y Goldenfum, J. C. B. (2008). Urban Water Cycle Processes and Interactions. In *Urban Water Cycle Processes and Interactions* (pp. 37–46). <https://doi.org/10.1201/9781482288544>

 - Martínez-Cruz, P., Hernández-Martínez, A., Soto-Castor, R., Esquivel-Herrera, A., y Rangel-Levario, J. (2006). Empleo de humedales artificiales para el tratamiento de aguas de un canal experimental de Xochimilco, México. *Hidrobiológica*, 16(3), 211–219. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972006000300001&lng=es&tlng=

 - Massoud, May A., Akram Tarhini, and Joumana A. Nasr. 2009. Decentralized Approaches to Wastewater Treatment and Management: Applicability in Developing Countries. *Journal of Environmental Management* 90(1), 652–59. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.001>

 - Maya-Rodríguez, J. M., y Pineda Pablos, N. (2018). Avances, estancamiento y limitaciones de la política de saneamiento en México 1998-2014. *Entreciencias: Diálogos En La Sociedad Del Conocimiento*, 6(17). <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2018.17.63059>

 - Mazari-Hiriart., M., y Noyola-Robles, A. (2018). Problemática y Política del Agua. En, L. Merino- Pérez y A. Velázquez-Montes (Eds.), *Agenda Ambiental 2018. Diagnóstico y Propuestas* (pp. 13-25).

 - Mazari-Hiriart, M., Pérez-Ortiz, G., Orta-Ledesma, M. T., Armas-Vargas, F., Tapia, M. A., Solano-Ortiz, R., Silva, M. A., Yañez-Noguez, I., López-Vidal, Y., y Díaz-Ávalos, C. (2014). Final opportunity to rehabilitate an urban river as a water source for Mexico City. *PLoS ONE*, 9(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102081>

- Mburu, N., Tebitendwa, S. M., van Bruggen, J. J. A., Rousseau, D. P. L., y Lens, P. N. L. (2013). Performance comparison and economics analysis of waste stabilization ponds and horizontal subsurface flow constructed wetlands treating domestic wastewater: A case study of the Juja sewage treatment works. *Journal of Environmental Management*, 128, 220–225. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.05.031>

- McGrane, S. J. (2016). Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: a review. *Hydrological Sciences Journal*, 61(13), 2295–2311. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1128084>

- Menéndez-Gutiérrez, C., y Dueñas-Moreno, J. (2020). Criterios de diseño y escalado de biodiscos para el tratamiento de aguas residuales. *Ingeniería Hidráulica Y Ambiental*, 41(2), 64–74. <https://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha/article/view/517>

- Monges-Morán, Y. L. (2009). *Calidad del agua como elemento integrador para la rehabilitación del río Magdalena, Distrito Federal* [Tesis de doctorado. Instituto de Ecología, UNAM]. TESIUNAM.

- Morales-Luque, G. (2010). *Evaluación de la calidad del agua en el río Magdalena, D.F., como servicio ecosistémico* [Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM]. TESIUNAM.

- Monsiváis, B. (2014). *Programa de rescate integral del río Magdalena en México DF.* [Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona]. TESIUNAM.

- Observatorio Económico Latinoamericano (OBELA) (2021). *La contaminación del agua en la minería.* <http://www.obela.org/analisis/la-contaminacion-del-agua-en-la-mineria>

- OPS/CEPIS. (2005). Guía Para La Operación Y Mantenimiento De Tanques Sépticos, Tanques Imhoff Y Lagunas De Estabilización. 27–37. http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/guialcalde/2sas/d24/055_O&M_tanques_sépticos_Imhoff_lag/O&M_tanques_sépticos_Imhoff_lagunas_estabilización.pdf

- ONU (Organización de las Naciones Unidas). (2015). *Objetivos del desarrollo sostenible*. Recuperado el 20 de marzo del 2021, de: <https://www.globalgoals.org/>

- OMS (Organización Mundial de la Salud). (2019). *Guías para el saneamiento y la salud*. Recuperado el 20 de septiembre del 2020, de: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241514705>

-

- Ong, S., Uchiyama, K., Inadama, D., Ishida, Y., y Yamagiwa, K. (2010). Performance evaluation of laboratory scale up-flow constructed wetlands with different designs and emergent plants. *Bioresource Technology*, 101(19), 7239–7244. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.032>

- Osti, J. A. S., Henares, M. N. P., y Camargo, A. F. M. (2018). The efficiency of free-floating and emergent aquatic macrophytes in constructed wetlands for the treatment of a fishpond effluent. *Aquaculture Research*, 49(10), 3468–3476. <https://doi.org/10.1111/are.13813>

- Pinto, M., y Matos, J.S. (s.f.). *Low cost on-site sanitation*. Recuperado el 12 de agosto del 2021, de: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395145923211/resumo.pdf>.

- Perló-Cohen, M., y Zamora-Saenz, I. (2017). Perspectivas ambientales sobre la contaminación y la recuperación del Río Magdalena. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 33(3), 377-391. <https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.03.02>

- Pescod, M. B. (1996). The role and limitations of anaerobic pond systems. *Water Science and Technology*, 33(7), 11–21. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(96\)00335-6](https://doi.org/10.1016/0273-1223(96)00335-6).

- Polomski, R. F., Taylor, M. D., Bielenberg, D. G., Bridges, W. C., Klaine, S. J., y Whitwell, T. (2009). Nitrogen and phosphorus remediation by three floating aquatic macrophytes in greenhouse-based laboratory-scale subsurface constructed wetlands. *Water, Air, and Soil Pollution*, 197(1), 223-232. <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9805-x>

- Prescott, M. F., Dobbie, M. F., y Ramirez-Lovering, D. (2021). Green Infrastructure for Sanitation in Settlements in the Global South: A Narrative Review of Socio-Technical Systems. *Sustainability*, 13(4). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su13042071>
- QGIS.org, 2021. QGIS Geographic Information System. QGIS Association. <http://www.qgis.org>
- Ritchie, H. (2019). "Sanitation". *OurWorldInData.org*. Recuperado el 20 de Agosto de 2021, de <https://ourworldindata.org/sanitation>.
- Rivera-Ramírez, K.L. (2017). *Efecto de las actividades humanas y políticas públicas en el socio-ecosistema de la micro-cuenca del río magdalena* [Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM]. TESIUNAM.
- Romero-Rojas, J.A. (2004). Proceso Ascensional de Manto de Lodos Anaerobio. En, C. Salazar (Ed), *Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y Principios de Diseño*. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Roccaro, P., Santamaria, A.E., y Vagliasindi, F. (2014). Historical development of sanitation from the 19th century to nowadays: Centralized vs decentralized wastewater management systems. En, Andreas Angelakis y Joan Rose (Eds), *Evolution of sanitation and wastewater technologies through the Centuries (437-454)*. IWA.
- Rosales-Escalante., E. (2005). Tanques sépticos. Conceptos teóricos base y aplicaciones. *Tecnología en Marcha*, 18(2), 26-33. https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/205
- Rousseau, D. P. L., Vanrolleghem, P. A., y de Pauw, N. (2004). Model-based design of horizontal subsurface flow constructed treatment wetlands: A review. *Water Research*, 38(6), 1484–1493. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.12.013>
- Ruskule, A., Vinogradovs, I., y Villoslada, M. (2018). Ecosystem Service Concept and Classification System. En, Kasparinskis (Ed.) *The Guidebook on "The Introduction to the Ecosystem Service Framework and its Application in*

- Integrated Planning*” (6-14). https://vivagrass.eu/wp-content/uploads/2018/10/guidebook_ecosystem_services_vivagrass-compressed.pdf
- Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA) (2016). Registro de Descargas de Aguas residuales de la Ciudad de México. SEMARNAT
 - Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA) (s.f.). *Infraestructura verde*. <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/programas/programa/infraestructura-verde>
 - Sehar, S., Naz, I., Khan, S., Naeem, S., Perveen, I., Ali, N., y Ahmed, S. (2016). Performance Evaluation of Integrated Constructed Wetland for Domestic Wastewater Treatment. *Water Environment Research*, 88(3), 280–287. <https://doi.org/10.2175/106143016X14504669767814>
 - Serrano, J., y Corzo, A. (2008). *Depuración con Humedales Construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial*. <http://hdl.handle.net/2117/2474>
 - Servín-Jungdorf, C.A., Sánchez-Castañeda, L.F., Mantilla-Morales, G., Montesillo-Cedillo J.L., Ruiz-López, A.J., y Hansen-Rodríguez, I.R. (2004). Selección de alternativas para el tratamiento de aguas residuales de una ciudad. Consultado el 28 de junio del 2021, de: <http://www.ingenieroambiental.com/4014/servin.pdf>
 - Shingare, R. P., Nanekar, S. V., Thawale, P. R., Karthik, R., y Juwarkar, A. A. (2017). Comparative study on removal of enteric pathogens from domestic wastewater using *Typha latifolia* and *Cyperus rotundus* along with different substrates. *International journal of phytoremediation*, 19(10), 899–908. <https://doi.org/10.1080/15226514.2017.1303809>
 - Shukla, S., Khire, M. V., y Gedam, S. S. (2013). Effects of urbanization on river basin ecosystem - A framework. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2(12), 3861–3863. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2013.6723674>

- Stefanakis, A., Akratos, C. S., y Tsihrintzis, V. A. (2014). *Vertical flow constructed wetlands: eco-engineering systems for wastewater and sludge treatment*. Elsevier Science. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-01288-4>

- Stefanakis, A. I. (2019b). The Role of Constructed Wetlands as Green Infrastructure for Sustainable Urban Water Management. *Sustainability*, 11(24), 1–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su11246981>

- Stott, R., May, E., Matsushita, E., y Warren, A. (2001). Protozoan predation as a mechanism for the removal of Cryptosporidium oocysts from wastewaters in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 44(11-12), 191-198. <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0828>

- Tchobanoglous, G y Burton, F. (1995). *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización* (Trad. J. Trillo Monstouri e I. Trillo Fox). McGraw Hill.

- Tilley, E., Lukas, U., Lüthi, C., Reymond, P., y Schertenleib, R. (2018). *Compendio de Sistemas y Tecnologías De Saneamiento* (Trad. [Banco Interamericano de Desarrollo, (BID)] y Hábitat para la Humanidad). Instituto Federal Suizo Para La Ciencia y La Tecnología Acuática (Eawag).

- USEPA (United States Environmental Protection Agency). (2000). *Manual Treatment of Municipal Wastewaters*. <http://www.epa.gov/ORD/NRMRL>

- Valera, V. (2016). *Evaluación de los Servicios Ecosistémicos proporcionados por los Humedales Artificiales. Aplicación a la Creación de Zonas Húmedas para Mejorar la Biodiversidad en Paterna (Valencia)*. [Tesis de Maestría. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Valencia]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/72724?show=full>

- Vammen, K. (2015). A quick look at Urban Water Challenges in the Americas. En, IANAS y UNESCO (Eds.), *Urban Water Challenges in the Americas a perspective from Academies* (pp-21-26). <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000246414>

- Velázquez-Pedroza, K. (2009). *Propuesta de Plantas de Tratamiento para el Saneamiento del Río Magdalena* [Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM]. TESIUNAM.

- Vymazal, J. (2005). Removal of Enteric Bacteria in Constructed Treatment Wetlands with Emergent Macrophytes: A Review. *Journal of Environmental Science and Health*, 40(6-7), 1355–1367. <https://doi.org/10.1081/ESE-200055851>

- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 380(1–3), 48–65. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.014>

- Vymazal, J. (2008a). *Constructed wetlands for Wastewater Treatment: A review* [Discurso principal]. The 12th World Lake Conference

- Vymazal, J. (2008b). Constructed Wetlands, Subsurface Flow. *Encyclopedia of Ecology*, 748–764. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00080-X>

- Vymazal, J. (2008c). Constructed Wetlands, Surface Flow. *Encyclopedia of Ecology*, 765–776. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00079-3>

- Vymazal, J. (2010). Constructed wetlands for wastewater treatment. *Water (Switzerland)*, 2(3), 530–549. <https://doi.org/10.3390/w2030530>

- Vymazal, J. (2013). Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: A review. *Ecological Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.06.023>

- Weerakoon, G. M. P. R., Jinadasa, K. B. S. N., Herath, G. B. B., Mowjood, M. I. M., y Bruggen, J. J. A. Van. (2013). Impact of the hydraulic loading rate on pollutants removal in tropical horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 61, 154–160. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.09.016>

- Wilderer, P. A., y Schreff, D. (2000). Decentralized and centralized wastewater management: A challenge for technology developers. *Water Science and Technology*, 41(1), 1–8. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0001>

- Wilderer, P. A. (2001). Decentralised versus centralized wastewater management. En, P. Lens, G. Zeeman, y G. Lettinga (Eds.), *Decentralised Sanitation and Reuse: Concepts, Systems and Implementation* [pp. 39–54]. IWA. <https://doi.org/10.2166/9781780402949>

- Zhang, C., Wen, L., Wang, Y., Liu, C., Zhou, Y., & Lei, G. (2020). Can constructed wetlands be wildlife refuges? A review of their potential biodiversity conservation value. *Sustainability (Switzerland)*, 12(4), 1–18. <https://doi.org/10.3390/su12041442>

- Zitácuaro-Contreras, I., Vidal-Álvarez, M., Hernández y Orduña, M. G., Zamora-Castro, S. A., Betanzo-Torres, E. A., Marín-Múñiz, J. L., y Sandoval-Herazo, L. C. (2021). Environmental, Economic, and Social Potentialities of Ornamental Vegetation Cultivated in Constructed Wetlands of Mexico. *Sustainability*, 34, 605–617. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su13116267>

- Zurita-Martínez, F., Castellanos-Hernández, O. A., y Rodríguez-Sahagún, A. (2011). El tratamiento de las aguas residuales municipales en las comunidades rurales de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(spe1), 139-150. Recuperado el 18 de junio del 2020, de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000700011

- Zdragas, A., Zalidis, G. C., Takavakoglou, V., Katsavouni, S., Anastasiadis, E. T., Eskridge, K., y Panoras, A. (2002). The effect of environmental conditions on the ability of a constructed wetland to disinfect municipal wastewaters. *Environmental management*, 29(4), 510–515. <https://doi.org/10.1007/s00267-001-0010-6>

- Wang, Y., Cai, Z., Sheng, S., Pan, F., Chen, F., y Fu, J. (2020). Comprehensive evaluation of substrate materials for contaminants removal in constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 701, 134736. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134736>.

- Wiegleb, G., Dahms, H.-U., Byeon, W. I., y Choi, G. (2017). To What Extent Can Constructed Wetlands Enhance Biodiversity? *International Journal of*

Environmental Science and Development, 8(8), 561–569.
<https://doi.org/10.18178/ijesd.2017.8.8.1016>

- Wu, J., Xu, D., He, F., He, J., y Wu, Z. (2015). Comprehensive evaluation of substrates in vertical-flow constructed wetlands for domestic wastewater treatment. *Water Practice and Technology*, 10(3), 625-632.
<https://doi.org/10.2166/wpt.2015.077>

ANEXO I.

Resultado estadístico de la evaluación de calidad de agua de los parámetros registrados del año 2014-2019. Se presentan los valores máximos, mínimos, la media y la desviación estándar.

Tabla 26. Parámetros físico-químicos del 2014-2019.

Parámetro	Unidad	2014				2015				2016			
		Máy.	Mín.	Media	DS	Máy.	Mín.	Media	DS	Máy.	Mín.	Media	DS
Grasas y aceites	mg/L	5.72	0.00	1.24	2.06	6.55	0.00	4.74	1.64	32.09	5	10.26	9.19
pH		7.26	6.17	6.54	0.36	7.39	0.00	6.10	2.06	7.62	6.46	6.95	0.39
ST	mg/L	380	0	192.44	101.37	390	176	256.36	60.81	456	198	271	75.21
SD	mg/L	198	0	71.06	88.25	390	176	252.55	60.04	306	198	234.40	31.43
Fijos	mg/L	262	100	171.56	50.21	390	142	236.73	76.61	308	134	223.60	58.50
Volátiles	mg/L	155	0	20.56	50.83	18	15	15.27	0.90	40	15	19	8.76
SST	mg/L	198.5	0.00	25.39	65.24	24	15	16.09	2.77	150.00	15.00	42.60	42.14
S. sedimentables	mg/L	0.10	0.00	0.09	0.03	0.10	0.10	0.10	0.00	1.00	0.10	0.19	0.28
DBO ₅	mg/L	13.00	0.00	5.94	4.61	7.00	2.00	4.91	1.76	116	3.00	27.50	39.23
DQO	mg/L	50.36	1.00	26.05	17.21	114	10.60	49.82	36.02	307.6	6.00	97.59	107.91

N-total	mg/L	14.50	0.00	5.33	7.97	0.00	0.00	0.00	0.00	10.47	1.5	7.75	11.43
Nitrito	mg/L	2.32	0.00	0.42	0.93	0.206	0.00	0.063	0.07	2	0.049	0.72	0.76
Nitrato	mg/L	8.85	0.00	3.66	4.11	22.85	0.00	11.27	5.74	40.22	0.1	11.52	11.10
P-total	mg/L	3.39	0.00	0.81	1.08	2.83	0.00	1.3	0.90	3.41	1.00	1.54	0.81
Coliformes totales	NMP	550000	0.00	82222.23		100000	0.00	33907.3		92000000	10000		
Coliformes fecales	NMP	55000	0.00	7555.56		80000	0.00	14356.4		56000000	8500		
Parámetro	Unidad	2017				2018				2019			
		Máx.	Mín.	Media	DS	Máx.	Mín.	Media	DS	Máx.	Mín.	Media	DS
Grasas y aceites	mg/L	5	5	5	0	5.00	5.00	5.00	0	5.55	5.00	5.14	0.27
pH		7.15	6.98	7.07	0.083	7.27	6.45	6.76	0.37	6.63	6.35	6.51	0.14
ST	mg/L	960	224	432	353.10	364	248	296.50	49.43	330	212	256.50	55.24
SD	mg/L	932	224	425.00	339.15	345	226	281.50	48.82	330	212	249.25	55.13
Fijos	mg/L	774	100	325.50	303.90	252	174	198.00	36.48	208	128	151.50	37.89
Volátiles	mg/L	186	100	139	45.50	124	100	109	11.49	130	100	113	15.36
SST	mg/L	28	15	18.25	6.50	22	15	18.75	2.87	29	14.00	18.25	7.18
S. sedimentables	mg/L	15	0.10	3.83	7.45	0.10	0.10	0.10	0.00	0.10	0.10	0.10	0.00

DBO ₅	mg/L	9	6	7.5	1.29	15	7	11.5	3.70	18	4.00	10.00	6.32
DQO	mg/L	125	20	48.8	51.01	80.6	30	59.05	23.41	524	10.00	281.33	258.20
N-total	mg/L	4.72	1.5	3.47	1.40	6.63	1.89	4.41	2.06	3.91	1.76	2.76	1.08
Nitrito	mg/L	0.294	0.055	0.142	0.13	0.189	0.047	0.094	0.08	0.756	0.072	0.27	0.32
Nitrato	mg/L	9.46	6.02	8.12	1.84	20.13	10.35	16.29	5.22	23.63	10.54	17.08	9.25
P-total	mg/L	1.216	1.00	1.072	0.12	4.94	2.14	3.15	1.55	2.91	2.83	2.87	0.06
Coliformes totales	NMP	740000	55000	293250		1000000	100000	472500		860000	220000	530000	
Coliformes fecales	NMP	260000	12000	86000		420000	100000	220000		490000	40000	295000	

ANEXO II. Memoria de cálculo para el dimensionamiento del Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal.

El dimensionamiento del humedal se desarrolló utilizando las ecuaciones presentadas por la USEPA (2000) tal como se desarrolla a continuación:

- 1) Determinar DBO₅ o SST del influente (en este caso el efluente será el flujo de entrada del humedal) y el caudal. El caudal fue hipotético siguiendo los parámetros de diseño dispuestos por la USEPA (2000).
- 2) Conocer la calidad deseada del efluente: fue determinada a partir de la NOM-003-SEMARNAT-1997
- 3) Profundidad. Se seleccionó la profundidad de lecho con base en los parámetros de diseño (USEPA, 2000)
- 4) Selección del área. El área se calculó de acuerdo a la siguiente ecuación (1):

a) Área superficial:

$$As = Q(Co) * ALR \quad (1)$$

En donde:

As = área superficial

Q = caudal (m³/d)

Co = SST o DBO₅ influente

ALR = área requerida = Q*DBO₅ mg/L / 6 g/m²

b) Largo-Ancho. Una vez obtenida el área del humedal se calculó el ancho (W) y el largo (L) siguiendo la ecuación de Darcy que determina la capacidad hidráulica del sistema, siguiendo las siguientes ecuaciones (2) y (3). La USEPA (2000) en su manual destaca que hay dos zonas de tratamiento, la inicial y la final, la zona inicial ocupa el 30% de la superficie total del humedal, y es donde se lleva a cabo la mayor parte del tratamiento, por otro parte la final ocupa el 70%. Se muestran las ecuaciones siguientes para calcular el ancho (W) y largo (L) del humedal.

b-1) Ancho (W):

$$Q = (K_i)(W)(DW_0) \left(\frac{d_{hi}}{L_i} \right) \quad (2)$$

En donde:

Q= caudal o gasto (m³/d)

L = longitud (m)

W = ancho (m)

K_i = conductividad hidráulica en la zona inicial

d_{hi}= pérdida de carga inicial aceptada

DW₀ = profundidad del lecho en la zona inicial

Despejando el ancho (W) en la ecuación anterior se obtiene:

$$W^2 = \frac{(Q)(A_{si})}{(K_i)(d_{hi})(DW_0)} \quad (3)$$

- b-2) Largo:

Zona inicial:

$$L = A_{si}/W$$

Zona final:

$$L = A_f/W$$

En donde:

Asi= área de la zona inicial (m²)

Af= área de la zona final (m²)

5) Cálculo del tiempo de retención hidráulico:

$$THR = V * n / Q$$

Donde:

THR = tiempo de retención hidráulico (días)

V = volumen

n = porosidad del medio (%)

Q = gasto o caudal (m³/d)

12.1. Cálculo del área superficial, ancho (W) y largo (L) y THR (tiempo de retención hidráulico).

Se presenta a continuación el cálculo del humedal con las ecuaciones anteriormente mencionadas:

1) Área superficial.

$$As = 17.28 \frac{m^3}{d} (45.14 \frac{mg}{L}) / (6 \frac{g}{m^2}) \quad (1)$$

$$\text{Área superficial} = 130.02 \text{ m}^2$$

2) Largo y Ancho.

Ancho:

$$W^2 = \frac{(17.28 \text{ m}^3)(39.00481256 \text{ m}^2)}{1000 \frac{\text{m}}{\text{d}} (0.4 \text{ m})(0.06 \text{ m})} \quad (2)$$

Ancho = 5.30 m

Largo:

Zona inicial:

$$L = 39.00481256 \text{ m}^2 / 5.30 \text{ m}^2$$

Zona final:

$$L = 91.01122932 / 5.30 \text{ m}^2$$

Largo = 7.36 m + 17.17 m = 24.53 m

3) *Tiempo de Retención Hidráulico (THR)*

$$\text{THR} = (24.53 \text{ m})(5.30 \text{ m})(0.6 \text{ m}) * (0.35) / 17.28 \text{ m}^3/\text{d}$$

THR = 1.68 días

Tabla 27. Dimensionamiento del humedal artificial a partir del cálculo obtenido de las ecuaciones presentadas (USEPA, 2000).

Parámetro de diseño		Valor	Unidad	USEPA (2000)
Co	Concentración inicial del efluente	45.14	mg/L	-
Ce	Concentración deseada del efluente	30	mg/L	Lo que la norma indique
Q	Gasto	17.28	m ³ /d	-
Ks	Conductividad hidráulica	100,000	m/d	-
S	Pendiente del lecho	0.005	%	
As	Área total	130.02	m ²	No específica
W	Ancho	5.30	m	Máx. 60 m
LT	Longitud total	24.53	m	Mín. 15 m
THR	Tiempo de retención hidráulico	1.68	días	No específica