

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial 15018, publicado en el Diario Oficial de la Federación del 29 de noviembre de 1976.

Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano
MAESTRÍA EN PROYECTOS Y EDIFICACIÓN SUSTENTABLES



**Los retos en la recuperación de la infraestructura de saneamiento
en el contexto rural: Reconversión tecnológica y rehabilitación de la
PTARM de Copala, Jalisco**

TRABAJO RECEPCIONAL que para obtener el **GRADO** de
MAESTRO EN PROYECTOS Y EDIFICACIÓN SUSTENTABLES
Presenta: **VÍCTOR MANUEL MIJANGOS PULIDO**

Tutor **DR. JOSÉ DE ANDA SÁNCHEZ**

Tlaquepaque, Jalisco. 25 de septiembre de 2020.

DEDICATORIA

Dedicado a la memoria de mi abuelo Beto.

AGRADECIMIENTOS

A mi novia Carolina y a mi familia por su respaldo incondicional en las decisiones importantes de mi vida.

Al Dr. José de Anda Sánchez por todo su apoyo a lo largo de mis estudios y su contribución para poder realizar este trabajo.

Al CONACYT por el apoyo económico recibido para realizar este posgrado.

Al ITESO y todo su personal académico y administrativo involucrados en el desarrollo de la maestría

Al Colegio de la Frontera Sur y sus profesores, el Dr. Héctor S. Cortina y la Dra. Vera Camacho.

A mis compañeros de maestría, por su colaboración en diferentes proyectos dentro de la maestría y su valiosa amistad.

Al Arq. Ricardo Ramírez por las facilidades que me dio para dedicarme al posgrado.

A los miembros de la JIRA con quienes tuve la oportunidad de gestionar el proyecto.

A Pedro Guzmán, director de ecología del municipio de Tolimán y a los operadores de la PTARM de Copala, José y Ramón, por su ayuda en la realización del proyecto.

Igualmente se agradece a todo el personal de la empresa BioDAF Water Technology y a su director, el Ing. Marcos de la Monja Carter, por autorizar la publicación de la información contenida en este trabajo referente al proyecto de rehabilitación y reconversión tecnológica de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales (PTARM) de la comunidad de Copala, ubicada en el municipio de Tolimán, Jalisco. La información autorizada para su publicación comprende los planos originales de la PTAR y los generados por el autor, así como fotografías de las visitas al sitio en la etapa de diagnóstico y del proceso de obra, que forman parte del archivo de proyecto, propiedad de la empresa BioDAF Water Technology.

RESUMEN

En este trabajo se aborda la problemática que existe en torno al abandono de la infraestructura de saneamiento en México, particularmente en el estado de Jalisco. Tras realizarse una evaluación de 26 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales (PTARM) en estado de abandono, se seleccionó la PTARM de una comunidad de rural de más de 3,000 habitantes para su rehabilitación y la reconversión tecnológica de algunos componentes de su sistema de tratamiento. En el documento se describe a detalle el sistema original de la planta, que utiliza un tanque séptico precedido por humedales artificiales y sistemas lagunares; y se exponen las limitaciones en su diseño original y los errores que se cometieron durante su construcción. En el diagnóstico del sitio también se detectan los riesgos a los que se encuentra sujeta la infraestructura. También se discute la propuesta del proyecto para detectar los aciertos y errores, así como las limitaciones durante su desarrollo. Con el propósito prever el cumplimiento con la normatividad mexicana para descarga y reúso del agua residual tratada, se presenta un ejercicio de la eficiencia esperada del sistema de tratamiento posterior a su reconversión. Se incluyen recomendaciones para el seguimiento y operación del sistema. Igualmente se presentan los resultados sobre un estudio preliminar de la calidad del agua realizado durante el arranque y puesta en operación. Por último, se incluye un análisis del contexto territorial de la PTARM, en la cual muestra los cultivos de riego que pudieran hacer uso del agua residual tratada.

PALABRAS CLAVE: PTAR, aguas residuales municipales, saneamiento rural, sistemas de tratamiento pasivos, humedales artificiales.

ABSTRACT

This paper addresses the existing problems related to the abandonment of the sanitation infrastructure in Mexico and particularly in the state of Jalisco. After conducting an evaluation of 26 Municipal Wastewater Treatment Plants (MWWTP) in a state of abandonment, the MWWTP of a rural community of more than 3,000 inhabitants was

selected for its rehabilitation and the technological reconversion of some components of its treatment system. The document describes in detail the original system of the plant, which uses a septic tank preceded by artificial wetlands and lagoon systems; and exposes both limitations in its original design and failures during construction. The site diagnosis also includes the risks to which the infrastructure is subject. The project proposal to detect the successes and errors, as well as the limitations during its development, is also discussed. In order to foresee compliance with Mexican regulations for discharge and reuse of treated wastewater, an exercise of the expected efficiency of the treatment system after its reconversion is presented. Recommendations for the monitoring and operation of the system are included. The results of a preliminary study of water quality carried out during startup and commissioning are also presented. Finally, an analysis of the territorial context of the PTARM is included, in which it shows the irrigated crops that could make use of the treated wastewater.

KEYWORDS: WWTP, municipal wastewater, rural sanitation, passive treatment systems, artificial wetlands.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	7
2. MARCO CONTEXTUAL.....	8
2.1 Agua y saneamiento a nivel global	8
2.2 Agua y saneamiento en México	11
2.3 Agua y saneamiento en Jalisco	14
3. DELIMITACIÓN CONCEPTUAL.....	16
3.1 Derecho humano al agua y saneamiento.....	17
3.2 Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH).....	17
3.3 Gobernanza del agua.....	19
3.4 La economía circular del agua	20
4. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS	21
4.1 Sistemas centralizados y descentralizados	21
4.2 Procesos aerobios y anaerobios.....	22
4.3 Sistemas basados en procesos naturales	24
4.4 Normatividad en México para el tratamiento de las aguas residuales	25
5. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	32
6. SELECCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO	34
6.1 Proceso metodológico de selección del sitio	34
6.2 Descripción del área de estudio.....	36
6.3 Relevancia del caso de estudio	38
6.4 Gestión del proyecto	40
7. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO.....	42
8. CARACTERIZACIÓN DEL CASO	44
8.1 Revisión de la documentación original.....	44
8.2 Revisión de la infraestructura existente.....	55
8.3 Planteamiento del proyecto	62
8.4 Modificaciones al proyecto	65
8.5 Análisis sobre la gestión local de los recursos hídricos.....	70
9. EVALUACIÓN DE HALLAZGOS.....	72
9.1 Evaluación al diseño original de la PTARM	72
9.1.1 Capacidad del sistema.....	72
9.1.2 Tanque séptico	73

9.1.3 Humedales artificiales	74
9.2 Evaluación de riesgos	75
9.3 Evaluación de la etapa de construcción	76
9.4 Evaluación al proyecto de rehabilitación y reconversión	77
9.4.1 Desarrollo del proyecto y ejecución de las obras	77
9.4.2 Eficiencia esperada del sistema propuesto.....	81
9.5 Proceso de arranque y seguimiento de operación	83
9.5.1 Control de flujo de ingreso.....	84
9.5.2 Canal de desbaste	85
9.5.3 Tanque séptico	85
9.5.4 Lecho de secado de lodos.....	86
9.5.5 Humedal de sobrenadante	87
9.5.6 Resto de la PTARM.....	89
9.5.7 Mitigación de riesgos	89
9.5.8 Monitoreo del agua residual tratada	90
9.6 Aprovechamiento del agua residual tratada.....	92
10. CONCLUSIONES	93
REFERENCIAS CITADAS.....	97

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto de investigación que a continuación se presenta sigue los procesos metodológicos propios de un “Estudio de Caso”. El Estudio de Caso se determinó como la estrategia de investigación a seguir, ya que, por su carácter descriptivo y explicativo, ofrece la estructura idónea para presentar el desarrollo de este trabajo. Esta modalidad se encuentra dentro de aquellas establecidas por el núcleo académico del Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano (DHDU) del ITESO para presentar el Trabajo de Obtención de Grado (TOG) en la Maestría de Proyectos y Edificación Sustentables (DHDU, 2015)

Asimismo, el TOG se desarrolla en temáticas acordes a las Líneas de Generación y Aplicación del Conocimiento (LGAC) establecidas por la coordinación de los Posgrados en Sustentabilidad del DHUD del ITESO (DHDU, 2015a). En mayor medida se puede referir a la LGAC 04, Análisis y Gestión de Infraestructuras y Equipamientos Sustentables; sin embargo, también se puede asociar a la LGAC 05, Desarrollo de Tecnología Apropiaada y la LGAC 06, Eficiencia en el Uso de Recursos Naturales y Energéticos; debido al uso de tecnologías adecuadas para proveer servicios de saneamiento en el contexto rural y el aprovechamiento de las aguas residuales tratadas dentro del territorio.

Conforme a la nomenclatura establecida por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO por sus siglas en inglés) en cuanto a los campos de las ciencias y las tecnologías, este TOG aborda una amplia gama de campos de las Ciencias Tecnológicas, tales como la Ingeniería y Tecnología del Medioambiente (3308), en Ingeniería Sanitaria (330809), Tecnología de las aguas residuales (330810) y Control de la Contaminación del Agua (330811). Así como en la categoría Tecnología de la Construcción (3305), en Alcantarillado y Depuración de Aguas (330530), Abastecimiento del Agua (330538) y Planificación Urbana (3329). Igualmente, en este trabajo se tratan temas vinculados a otros saberes relacionados con el derecho humano al agua y saneamiento las cuales se encuentran relacionadas con las Ciencias Sociales y Jurídicas y la Economía Circular tema relevante que puede considerarse en

el ámbito de las Ciencias Económicas (5300), como Teoría de la Planificación Económica (530709) y Política del Medio Ambiente (590208), entre otras ciencias (UNESCO, 2000).

2. MARCO CONTEXTUAL

2.1 Agua y saneamiento a nivel global

La escasez de agua es un problema global que afecta a millones de personas. De acuerdo con los reportes presentados por el Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP por sus siglas en inglés) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), en el mundo existen más de 2,000 millones de personas que viven en países afectados por una severa escasez de agua (WWAP, 2019). Alrededor de 500 millones de personas viven en regiones del mundo donde el consumo de agua dobla la renovación de los recursos hídricos locales (WWAP, 2017). Estas cifras irán en ascenso conforme los efectos del cambio climático se intensifiquen; se prevé que para el año 2030 el mundo tendrá que enfrentarse a un déficit mundial del 40% de agua en un escenario climático en el que todo siga igual (2030 Water Resources Group, 2009).

Esta situación también responde a un aumento desmedido sobre la demanda del agua que requiere el crecimiento poblacional y el desarrollo socioeconómico de las naciones. La ONU reporta que la demanda del uso del agua a nivel global viene registrando un aumento del 1% anual y que, de seguir la tendencia, se espera que para el año 2050 el uso del agua incremente de un 20 a un 30% sobre el nivel actual de demanda (WWAP, 2019). Las regiones en donde los recursos hídricos no renovables (*i.e.* aguas subterráneas fósiles) se encuentran en constante detrimento, son las más vulnerables y dependen de fuentes alternas para subsistir (WWAP, 2017). A nivel global, 2,500 millones de personas dependen exclusivamente de los recursos de aguas subterráneas para satisfacer sus necesidades básicas diarias de agua (WWAP, 2015).

Las actividades agrícolas son responsables de un 70% de las extracciones globales de agua anualmente, por lo que aumentar la eficiencia de sus consumos puede aliviar el estrés hídrico de modo significativo y beneficiar otros sectores hacen uso de este recurso [United Nations (UN), 2018]. En los últimos 50 años, la superficie de los campos agrícolas

con equipamiento de riego se duplicó y con esto se incrementó el uso de las aguas subterráneas, ya que un 40% de estas tierras depende de esta fuente. Esta actividad también contribuye significativamente a la contaminación del agua, ya que los fertilizantes y productos agroquímicos utilizados se infiltran en el subsuelo o son arrastrados hasta llegar a los cuerpos de agua cercanos. Además de estas presiones, el cambio climático traerá consigo mayores variaciones espaciales y temporales en el ciclo del agua que afectaran las cosechas, debido al incremento de las temperaturas, la prolongación de las sequías, la variabilidad de las lluvias, así como la frecuencia y duración de los fenómenos extremos meteorológicos. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2011).

La disponibilidad de los recursos hídricos depende en gran medida de la calidad del agua, ya que la contaminación de las fuentes de agua limita su aprovechamiento en distintos usos. De acuerdo con datos de la ONU, más del 80% de las aguas residuales son vertidas directamente al medio ambiente sin ningún tratamiento previo (WWAP, 2017). La contaminación en la mayoría de los ríos de América Latina, África y Asia ha empeorado desde la década de los 90s, se estima que un tercio de todos los ramales de los ríos en estas regiones del mundo se encuentran severamente contaminados por microorganismos patógenos. Esto trae consigo repercusiones negativas como es el deterioro de los ecosistemas acuáticos y enfermedades transmitidas por el agua contaminada; afectando la salud de las personas y los medios de subsistencia de las comunidades (UN, 2018).

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), el número de personas que se encuentran en riesgo de adquirir problemas de salud al entrar en contacto con aguas superficiales contaminadas en estos continentes asciende a decenas de millones (OMS, 2017). El saneamiento deficiente y el agua contaminada están relacionados con enfermedades como la diarrea, el cólera, la disentería, la hepatitis A y la fiebre tifoidea. Estas enfermedades pueden afectar la salud de todo tipo de personas, en especial la de los niños. La OMS reporta que 361,000 niños menores de 5 años mueren cada año a causa de la diarrea (OMS, 2017).

En todo el mundo, la falta de acceso a agua potable segura afecta a tres de cada diez personas; y seis de cada diez no cuentan con servicios de saneamiento seguro. Sin embargo, las cifras globales de acceso al agua potable y saneamiento no muestran las notables desigualdades que existen entre y dentro de las distintas regiones y países del mundo, incluso dentro de las mismas comunidades (OMS, 2017). Existe un déficit de infraestructura para la gestión del agua y saneamiento que afecta a millones de personas que viven en poblaciones y comunidades rurales. A esto hay que sumar una baja capacidad institucional de los países para la asignación de recursos económicos que sirvan para dar mantenimiento a la infraestructura existente (WWAP, 2017).

De acuerdo con los últimos datos reportados por la ONU en el seguimiento al objetivo del desarrollo sustentable 6 (ODS 6) de la agenda 2030, asegurar para todos la disponibilidad y la gestión sustentable del agua y saneamiento, el alcanzar el acceso universal al agua potable segura y asequible para el 2030 representa un gran reto para todos los países, no solo para aquellos de bajos ingresos (UN, 2018). La proporción de la población mundial que utiliza por lo menos un servicio básico de agua potable incrementó de un 81% en el año 2000 a un 89% en el año 2015, sin embargo, aún deben extenderse estos servicios a 844 millones de personas que carecen de un servicio básico de agua potable. La mejora de la calidad del servicio debe alcanzar aún a 2,100 millones de personas que no cuentan con agua potable disponible en sitio cuando la necesitan y libre de contaminantes, es decir, agua potable gestionada de manera segura (UN, 2018).

En cuanto a saneamiento se refiere, la proporción de la población mundial que utiliza servicios básicos de saneamiento incrementó de un 59% en el año 2000, a un 68% en el año 2015. Sin embargo, aún existen 2,300 millones de personas que carecen de un servicio básico de saneamiento; de esta cifra, la mayor parte habita en áreas rurales. Sumado a esto, existen aún 4,500 millones de personas en el mundo que no cuentan un servicio de saneamiento gestionado de manera segura, donde se disponen adecuadamente los desechos humanos in situ o con un tratamiento centralizado (OMS, 2017). Para aumentar la cobertura de saneamiento se necesita una importante inversión en infraestructura, especialmente en áreas urbanas de rápido crecimiento, y fortalecer la

capacidad de las autoridades, en todos los niveles, para manejar y regular los sistemas de saneamiento (UN, 2018).

2.2 Agua y saneamiento en México

México ha venido experimentando incremento exponencial en el uso del agua desde la segunda mitad del siglo XX que se ha mantenido hasta la fecha. Esto debido al crecimiento demográfico y urbano, la expansión de los cultivos de riego, el sector energético y el industrial. Según datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la disponibilidad de agua en el país en el año 1950 era de 18,035 m³ por habitante al año (CONAGUA, 2007), esta cifra ha disminuido notoriamente, pues al año 2017 se tiene una disponibilidad de 3,656 m³ por habitante al año (CONAGUA, 2018). Reportes de fuentes internacionales como el *World Resource Institute* (WRI) ubican al país en la posición 24 a nivel mundial por el grado de estrés hídrico actual. Esto se debe a que 23 de los 32 estados de México manifiestan un estrés hídrico alto o extremadamente alto. (WRI, 2019)

Sobre la calidad de las aguas superficiales, los sitios de monitoreo evaluados en el año 2017 con el indicador de Demanda Biológica de Oxígeno a cinco días (DBO₅) mostraron que un 53.6% de estos tienen una excelente calidad de agua. Sin embargo, la prueba Demanda Química de Oxígeno (DQO) arrojó solo un 18.5% de sitios con una excelente calidad de agua; y 27.5% con agua contaminada. El indicador de Coliformes Fecales (CF) presentes en el agua dio como resultado un 27% de sitios con agua contaminada y un 28.4% fuertemente contaminada; lo que indica una grave presencia de aguas residuales (CONAGUA, 2018). Según el primer informe de contraloría social, realizado al programa de tratamiento de aguas de la CONAGUA, el 70% de los cuerpos de agua de México tienen algún grado de contaminación y se desconoce la calidad en la que se encuentran más de la mitad de los acuíferos del país (Animal Político, 2017).

De acuerdo con el Registro Público de Derechos del Agua, los volúmenes concesionados o asignados a los usuarios de las aguas nacionales en el año 2017 fueron un total de 270,917 hm³, de los cuales los mayores usos se tuvieron en la actividad agrícola (76%) y en el abastecimiento público (14.4%). Las aguas superficiales representaron el 61%, y las subterráneas el 39%, del total de los usos consuntivos

(CONAGUA, 2018). Sin embargo, se menciona que el programa de CONAGUA solamente pudo vigilar el 1.7% de las 275,300 concesiones para la extracción de aguas subterráneas (Animal Político, 2017). El volumen concesionado también ha incrementado en los últimos 10 años, las concesiones sobre aguas superficiales fueron un 6% mayor y el de aguas subterráneas un 6.9%. El porcentaje del agua empleada con respecto al agua renovable nos indica que el grado de presión sobre los recursos hídricos de las zonas centro, norte y noroeste del país es alto (CONAGUA, 2018).

En cuanto a la cobertura de infraestructura de agua potable en el país, se tiene un registro de que el 94.4% de la población contaba con el suministro de agua entubada en su vivienda o predio al 2015. Con una cobertura del 97.2% en la población urbana y del 85% en el ámbito rural. De manera análoga, en el 2015, la cobertura reportada de alcantarillado a red pública o fosa séptica fue de 91.4%. La cobertura urbana fue del 96.6% y la rural del 74.2% (CONAGUA, 2018). No obstante, el Programa Conjunto de Monitoreo del Abastecimiento de Agua y del Saneamiento de la OMS indica que en México solamente el 43% de los servicios de agua potable, y el 45% de los servicios de saneamiento, son gestionados de manera segura (OMS, 2017). La provisión de servicios de agua potable y alcantarillado es favorecida por la concentración de la población en áreas urbanas, en contraste con la dispersión de la población rural.

En el 2017, las aguas residuales municipales generadas en los núcleos de población y colectadas por los sistemas de alcantarillado fueron 215.2 m³/s en todo el país. De este volumen, se trataron 135.6 m³/s en las 2,526 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (PTARM) que se encontraban en operación; con esto se alcanzó una cobertura de saneamiento nacional del 63% (CONAGUA, 2018). Este porcentaje se queda corto en comparación con el nivel de cobertura que tienen otros países de Latinoamérica, como es el caso de Chile con una cobertura superior al 80% (Duryea y Robles, 2016). Existe también un grave problema de abandono de la infraestructura, ya que el inventario nacional 2016 de CONAGUA hace mención que de 3,517 PTARM, 981 (27.89%) se encontraban fuera de operación o dadas de baja (CONAGUA, 2017). Los principales procesos de las PTARM en operación del país de acuerdo con su caudal tratado se muestran en la Figura 1, en la cual destacan las plantas de lodos activados.

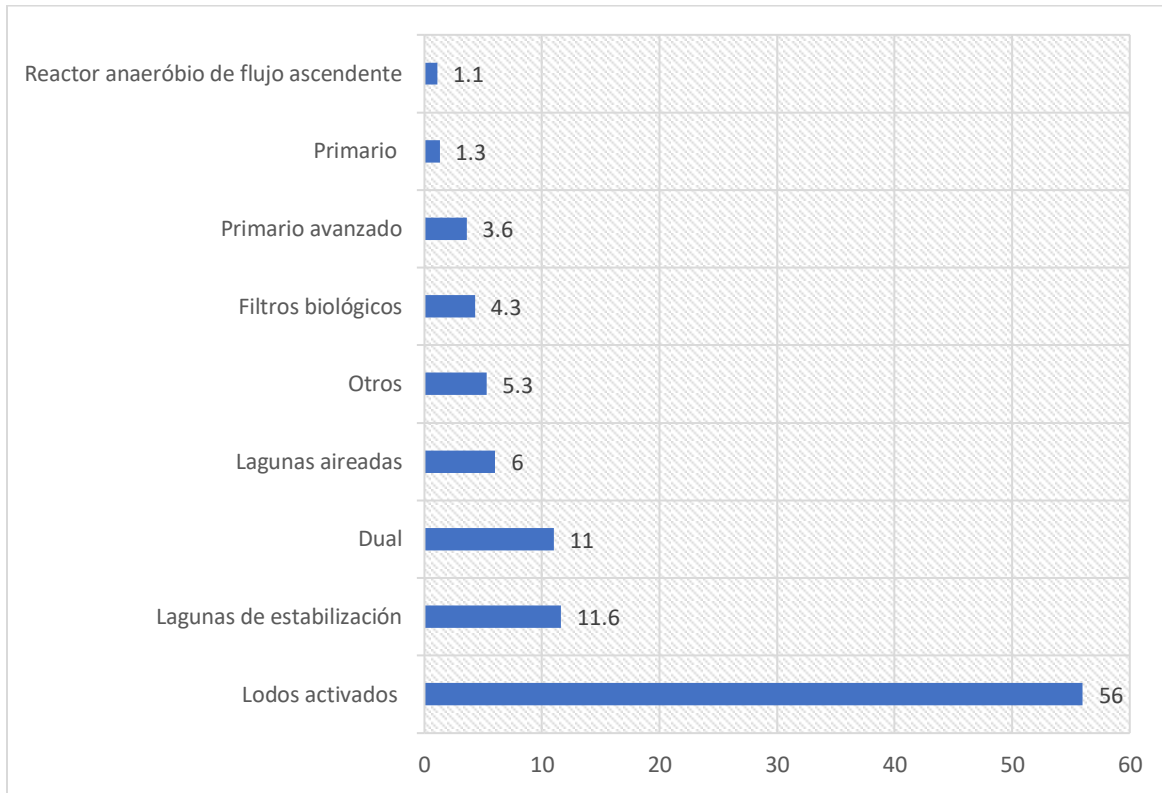


Figura 1. Principales procesos de PTARM por caudal tratado en 2016 en unidades porcentuales del total. [Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA (2017)].

Sumado a la baja cobertura de saneamiento y al abandono de su infraestructura, existe un bajo aprovechamiento de las aguas tratadas que debe incrementarse. En México, CONAGUA estima que al 2016 se reusaban directamente (antes de su descarga) 39.8 m³/s, las cuales representan un 29.35% de todas las aguas tratadas. En tanto que se reusaban indirectamente (después de su descarga a un cuerpo receptor) para riego agrícola y otros usos, 78.8 m³/s, el 58.1% del caudal tratado total. El intercambio de aguas residuales tratadas, en el que substituyen agua de primer uso, se estimaba en 8.6 m³/s, esto representa solamente el 6.3% del volumen total de aguas tratadas (CONAGUA, 2018).

2.3 Agua y saneamiento en Jalisco

El estado de Jalisco tiene una superficie continental de 78,599 km² que se divide en 125 municipios. Su población al 2017 fue de 8.11 millones de habitantes, de los cuales el 87% viven en áreas urbanas. Se estima que la población total del estado al 2030 será de 9.1 millones de habitantes (CONAGUA, 2018). La disponibilidad de los recursos hídricos del estado en el año 2017 fue de 15,951 hm³/año; con una cifra per cápita de 1,967 m³/ habitante/ año. Esta cifra se prevé que disminuya para el año 2030 a 1,752 m³/ habitante/ año de acuerdo con el crecimiento poblacional estimado y el grado de presión que actualmente existe, de 31.4%, aumente a un 36.6% (CONAGUA, 2018).

Sin embargo, estos datos contrastan con lo reportado por el WRI (2019), en la que se clasifican ciertas partes de su territorio (Figura 2) con un estrés hídrico extremadamente alto (>80%). La Comisión Estatal del Agua en Jalisco (CEA) reportó la disponibilidad de las aguas subterráneas en el estado a principios del año 2018, con 30 acuíferos sobreexplotados de los 59 que existen en el estado; y un déficit del orden de 245.6 hm³ (CEA, 2018). Los mayores volúmenes de agua concesionados en el estado fueron para la agricultura (75 %), de los cuales se utilizaron un 53.66% de fuentes subterráneas y 46.44% de aguas superficiales (CONAGUA, 2018). Esto nos muestra que una parte significativa de la actividad agrícola del estado depende de las aguas subterráneas, de ahí la importante reducción en la disponibilidad media anual en varios de los acuíferos del estado.

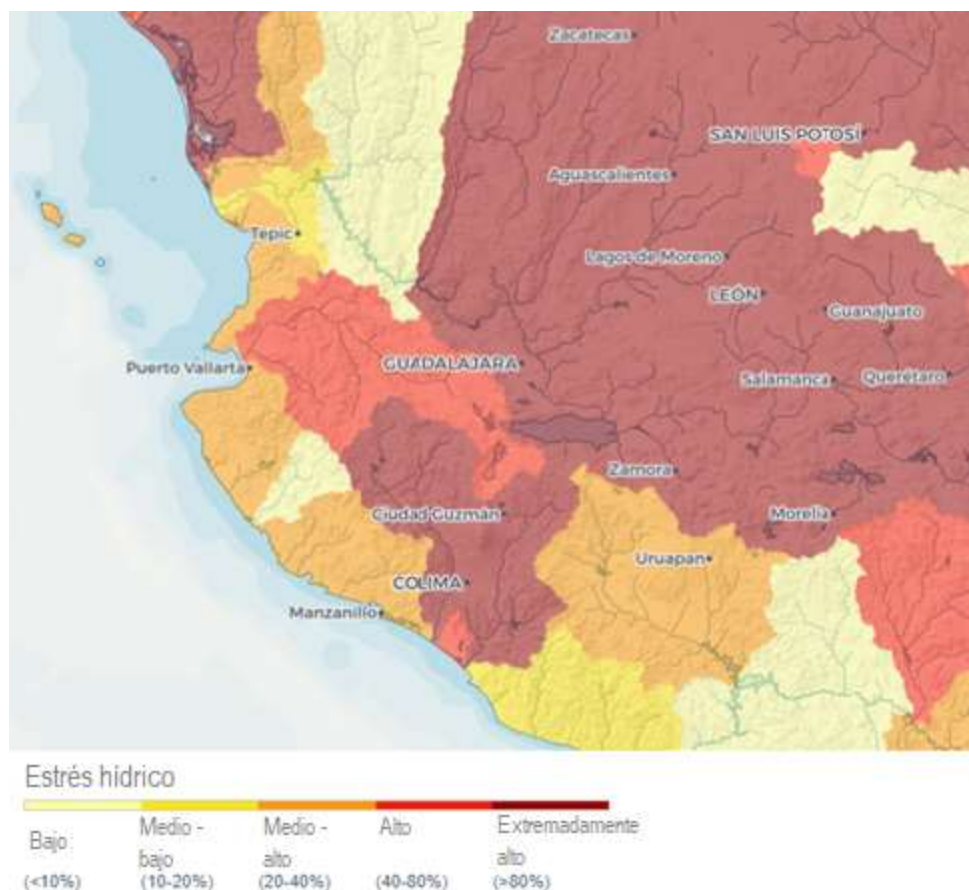


Figura 2. Estrés hídrico en el centro-occidente de México (Fuente: WRI, 2019a).

En cuanto a la calidad monitoreada en sus aguas superficiales, de 228 sitios monitoreados dentro de su territorio en el 2017 con el indicador DBO_5 , el 55.3% presentaron una calidad excelente. Sin embargo, el indicador DQO mostró un 44.3% de los sitios con aguas contaminadas. Los CF detectados en 264 sitios de monitoreo mostraron que solo el 6.1% y 5.7% tenían una excelente y buena calidad respectivamente, un 10.2% aceptable, y un 34.5% contaminada y 43.6% fuertemente contaminada; es decir más de un 75% de los cuerpos de agua del estado están afectados por las descargas de aguas residuales no tratadas (CONAGUA, 2018).

Esta evidente contaminación tiene su origen en la carencia o abandono de la infraestructura de saneamiento existente en el estado. La CEA reportó a finales del 2018 un registro de 217 PTARM en el estado, de estas 119 se reportaban en operación y 98 fuera de operación; y otras 76 ya habían sido dadas de baja. A pesar de esto, la

capacidad instalada en operación representa el 88% del total (CEA, s.f.). Esto significa que la mayoría de las PTARM que se encuentran fuera de operación o dadas de baja, trataban un caudal menor y se encuentran localizadas en municipios con actividades preponderantemente rurales del estado de Jalisco.

Por otra parte, el sistema de monitoreo del Gobierno del Estado de Jalisco menciona que, en el 2019, de las PTARM que se encontraban activas, solamente 50 operaban conforme a la norma. La cobertura de saneamiento reportada ese mismo año en el estado fue del 65.59 %; con un reúso directo de las aguas tratadas de 1,085 litros por segundo, muy por debajo de la capacidad instalada. (Gobierno del Estado de Jalisco, 2020). El inventario de la infraestructura de saneamiento del estado puede resumirse en la gráfica de la Figura 3.

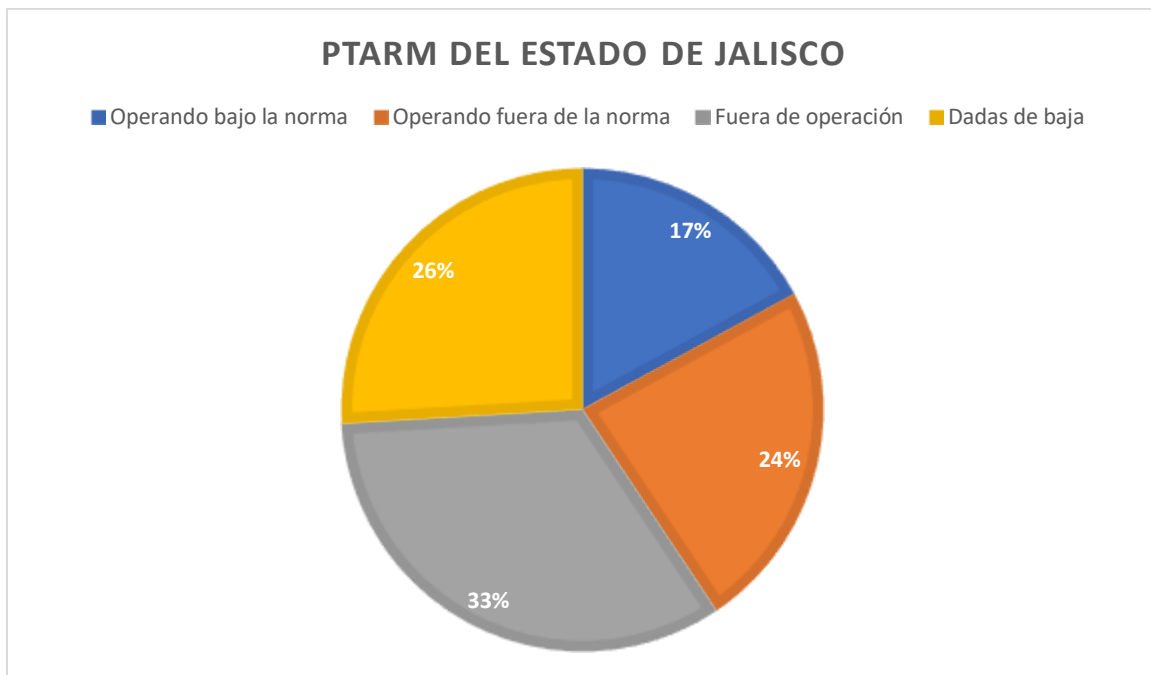


Figura 3. Situación de las PTARM en Jalisco en el año 2019 [Fuente: Elaboración propia con datos de la CEA (s.f.) y del Gobierno del Estado de Jalisco (2020)].

3. DELIMITACIÓN CONCEPTUAL

Para facilitar el entendimiento de este trabajo, es necesario definir algunos conceptos relevantes para el desarrollo del tema en cuestión, estos se relacionan entre sí y son la

base teórica sobre la cual se fundamenta la implementación del proyecto de investigación. Estos incluyen aspectos sociales, medioambientales y económicos en torno al manejo sustentable de los servicios de agua y saneamiento. Estos se describen brevemente a continuación:

3.1 Derecho humano al agua y saneamiento

En el 2002, el Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales de las Naciones Unidas, definió el derecho humano al agua, la cual debe ser suficiente, salubre, aceptable, accesible y asequible para el uso personal y doméstico. En el año 2010, la ONU reconoció el derecho humano al agua potable limpia y el saneamiento como esencial para poder ejercer todos los derechos humanos. En esta resolución se exhorta a que se promuevan los recursos financieros, capacitación y tecnología que ayude a los países, en especial aquellos en vías de desarrollo, a suministrar los servicios de agua potable y saneamiento a sus habitantes (UN, 2014).

A partir de este decreto, en México, el acceso universal al agua es un derecho humano reconocido constitucionalmente en el 2012. En el artículo 4º, sexto párrafo, se señala que “Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible” (SEGOB, 2014, p.21). En México, la Ley de Aguas Nacionales (LAN) regula la administración de los recursos hídricos de su territorio y son los municipios los que deben cumplir con las funciones y servicios públicos de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales.

Bajo esta premisa, en el 2015, se define como uno de los 17 objetivos del desarrollo sostenible el ODS6, garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos, buscando el acceso universal para el año 2030. Cumplir con los objetivos trazados continúa siendo un reto importante y es crucial para el progreso de la salud, la educación y la disminución de la pobreza (UN, 2018).

3.2 Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH)

Las medidas que se toman en el manejo del agua afectan todos los aspectos esenciales del desarrollo humano, como son la salud y bienestar, la agricultura, la

economía, y la calidad de vida en general. Una buena gestión de los recursos hídricos es determinante para el desarrollo sustentable de un territorio; sin embargo, es un proceso complejo que requiere de acciones constantes y una visión a largo plazo, además de involucrar diversos actores como son los gobiernos, organizaciones locales y regionales, instituciones y organismos nacionales e internacionales, organismos no gubernamentales, así como del sector privado y la sociedad civil (UN, 2018).

En 1992, en la Cumbre de la Tierra, las naciones reconocieron la importancia de adoptar medidas para el manejo integral del agua. La implementación de estas acciones a través de los años ha probado que la GIRH no solo es necesaria para cumplir el ODS6, si no para cumplir todos los objetivos para el desarrollo sustentable de la agenda 2030. La *Global Water Partnership South America* (2011, párrafo1) define el concepto como:

“La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) es un proceso que promueve el desarrollo y manejo coordinados del agua, la tierra y otros recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar económico y social resultante de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales.”

El concepto de la GIRH se encuentra incluido dentro de la LAN, sin embargo, Flores Elizondo (2014) menciona que las políticas hídricas de México tienden más a una gestión del agua, buscando solamente el uso y aprovechamiento por medio de infraestructuras de conducción y control. Bajo los principios de la GIRH se busca que el manejo de las cuencas hidrológicas y los acuíferos, sean considerados como un asunto de utilidad pública y de seguridad nacional; buscando la protección, el mejoramiento, la conservación y restauración de las cuencas y diferentes cuerpos de agua de la nación, así como de zonas de captación e infiltración de aguas para reabastecer los mantos acuíferos (CONAGUA, 2012).

Sin embargo, es necesario mencionar que la aplicación del concepto de la GIRH ha tenido resultados desiguales. Debido a la gran diversidad que existe entre países y dentro de los mismos, no se puede ofrecer una solución única para los desafíos del agua, las soluciones deben ir adaptarse a las características específicas del territorio en cuestión [Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), 2015].

3.3 Gobernanza del agua

En la actualidad, la gestión de los recursos hídricos presenta nuevos desafíos de capacidad y coordinación en la prestación de los servicios públicos. Las responsabilidades que recaen en las autoridades locales son cada vez más complejas y rebasan sus facultades administrativas; una situación que fomenta la fragmentación de las estructuras de gobierno. La gobernanza del agua busca que la toma de decisiones y la implementación de políticas integre a los distintos niveles de gobierno, a la sociedad civil, el sector privado y demás actores involucrados, en un manejo corresponsable del agua que busque el mayor beneficio económico, social y ambiental (OCDE, 2015).

De acuerdo con el Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo la gobernanza del agua la gobernanza del agua se refiere a los sistemas políticos, sociales, económicos y administrativos que influyen en el uso y manejo de los recursos hídricos. Esta determina una asignación y distribución del agua y los servicios relacionados de manera equitativa y eficiente; equilibrando su uso entre las actividades socioeconómicas y los ecosistemas. Las dinámicas de la gobernanza del agua se desenvuelven en cuatro dimensiones fundamentales: social, económica, política y ambiental (UNDP-SIWI Water Governance Facility, 2016).

En México, los retos que se presentan en materia de agua comprometen el desarrollo del país y la sustentabilidad de sus recursos hídricos. La degradación de las cuencas, el crecimiento urbano y las dinámicas poblacionales, un ordenamiento territorial inapropiado, acuíferos sobreexplotados, las afectaciones de sequías e inundaciones, sumado a una infraestructura y sistemas hidráulicos vulnerables y deficientes son algunos de los riesgos hídricos que el país enfrenta, y que se verán acentuados por los efectos del cambio climático. Las instituciones y el gobierno se ven superados por estos problemas, por lo que es necesario buscar maneras de involucrar a los diversos sectores de la sociedad en la toma de decisiones, desde la planificación hasta la implementación y evaluación de las acciones. El enfoque de gobernanza propone los lineamientos que permiten construir soluciones viables a los problemas del agua en el país (Galindo y Jiménez, 2015).

3.4 La economía circular del agua

La evolución de la economía global ha estado dominada por un modelo lineal, en el cual se extraen recursos, se utilizan y se desechan. Es sistema basado en el consumo conlleva pérdidas significativas a lo largo de la cadena de valor; el crecimiento exponencial de esta modelo extractivista ha evidenciado sus efectos negativos, deteriorando los sistemas naturales que suministran los recursos necesarios para la productividad de las economías. En este contexto, el modelo circular de crecimiento se desvincula del consumo de recursos finitos y es capaz de ofrecer sistemas económicos más resilientes (Ellen Macarthur Foundation, 2015).

Una economía circular utiliza la menor cantidad de recursos necesarios, haciendo una selección inteligente de los mismos, evitando aquellos no renovables y dando preferencia a aquellos de origen reciclado. En su ciclo de vida, se mantiene su uso el mayor tiempo posible, maximizando su valor en el sistema económico. De esta forma se generan menos residuos y con esto se reducen los impactos ambientales, permitiendo la restauración del capital natural (Perero Van Hove, 2019). En materia de recursos hídricos, este sistema permite alcanzar suministros de agua seguros, sostenibles y de calidad para el futuro. En este aspecto, uno de los campos de oportunidad que más posibilidades ofrece es la reutilización del agua (WWAP, 2017).

La reutilización del agua residual tratada ofrece una amplia gama de beneficios para las comunidades, que se traducen en un inmenso valor para el público y el medio ambiente. Sin embargo, los beneficios de la reutilización del agua tratada pueden ser difíciles de cuantificar y, a menudo, no se reconocen. Uno de los más significativos es el valor creado por la inclusión de la reutilización del agua en la planificación integrada de los recursos hídricos y otros aspectos de la política del agua, así como en la implementación de proyectos, lo cual resulta en la sustentabilidad a largo plazo de los recursos hídricos (Miller, 2006).

El agua tratada puede ser una fuente constante y segura de agua aún en temporadas de sequía; contribuye a la conservación de los recursos hídricos y asegura la disponibilidad hídrica a nivel regional; además que reduce los costos económicos de

utilizar otras fuentes de agua más costosas en el riego (de Anda-Sánchez, 2017). El sistema de tratamiento y la calidad del agua tratada dependerá del uso que se requiera; tomando en cuenta los costos del proceso para la viabilidad económica de su reutilización. En este aspecto, también influye en gran medida a reducir los costos que la reutilización se dé en zonas cercanas al lugar de producción. Además, las aguas residuales tratadas adecuadamente representan una fuente valiosa de nutrientes (*i.e.* fósforo y nitrógeno) y los residuos (*i.e.* lodos biológicos) obtenidos de los procesos de tratamiento pueden ser transformados en fertilizante orgánico (WWAP, 2017).

Sin embargo, existen numerosos ejemplos de barreras experimentadas por los proyectos actuales de reutilización de agua tratada en todo el mundo, incluyendo la necesidad de tecnologías innovadoras y nuevas aplicaciones; una mayor aceptación pública; mejor documentación de los beneficios de la reutilización del agua tratada; la falta de fondos disponibles para proyectos; difusión por parte de los medios de comunicación, y la necesidad de apoyo por los legisladores y los políticos (Miller, 2006).

4. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

El desarrollo de este trabajo contiene una base que en gran parte se desenvuelve en los aspectos tecnológicos para la correcta planificación, diseño, implementación y funcionamiento de las infraestructuras para el tratamiento de aguas residuales municipales (*i.e.* PTARM). Por este motivo, esta sección se enfoca en describir brevemente los tecnicismos que caracterizan este tipo de instalaciones y que se verán aplicados más adelante.

4.1 Sistemas centralizados y descentralizados

La mayoría de las tecnologías implementadas en los municipios del país para el tratamiento de las aguas residuales sanitarias, se basan en sistemas centralizados convencionales, en donde se utilizan tecnologías complejas en el proceso de tratamiento (de Anda-Sánchez, 2017). Los sistemas centralizados para el tratamiento del agua residual se caracterizan por tener una red de líneas de conducción con un tratamiento al

final del sistema. Se compone por lo general de un sistema de recolección (alcantarillado) que colecta el agua residual, y por lo general también la pluvial, que se produce y un sistema de tratamiento de aguas residuales centralizado en una planta de tratamiento que posteriormente dispone o reutiliza el efluente tratado. Su diseño, la inversión para su construcción, su operación y mantenimiento, implican altos costos (CONAGUA, 2015c).

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales descentralizadas o en redes comunitarias están diseñados para operar a pequeña escala. A diferencia de los sistemas centralizados de tratamiento de aguas residuales, los sistemas descentralizados, por lo general, son los más indicados para las comunidades en donde hay baja densificación urbana, tales como las zonas rurales o las zonas periurbanas (Massoud *et al.*, 2009). Además, los sistemas descentralizados se adecúan a las condiciones particulares del sitio; de esta forma, se evita la costosa implementación de sistemas de tratamiento centralizados en donde se tienen mayores requisitos para su construcción y operación (de Anda-Sánchez, 2017).

El uso de este tipo de sistemas requiere menores costos en infraestructura de recolección o drenaje. Su expansión, en caso de requerirse, es modular y por etapas, esto reduce la necesidad de una gran inversión inicial y puede irse financiando a medida que aumenta la demanda de la población. Otra ventaja para considerar es la disminución de riesgos ambientales, ya que en estos sistemas se manejan caudales menores lo que implica menor daño ambiental en caso de alguna falla (de la Peña *et al.*, 2013). En sí mismo, estos sistemas utilizan tecnologías más simples que son menos susceptibles de presentar alguna falla, y al utilizar la estrategia de descentralización, la probabilidad de una falla simultánea en todas las plantas es significativamente menor a la de una planta central (CONAGUA, 2015c).

4.2 Procesos aerobios y anaerobios

De acuerdo con Noyola, Morgan-Sagastume y Güereca (2013), las tecnologías para el tratamiento de aguas residuales pueden dividirse en dos grandes grupos, los tratamientos fisicoquímicos y los biológicos. Los primeros, como su nombre lo indica, hacen uso de procesos físicos, como el uso de la gravedad, la filtración por retención

física, atracción electrostática, etc.; y de procesos químicos como la coagulación, absorción, oxidación, precipitación, etc. El segundo grupo, los tratamientos biológicos, involucra la degradación o transformación de la materia orgánica por medio de microorganismos. Estos sistemas pueden ser aerobios, los cuales requieren de oxígeno molecular disuelto, o anaerobios, es decir, funcionan sin la presencia de oxígeno (Noyola *et al.*, 2013).

La energía química contenida en la materia orgánica contaminante, hablando de sustratos fácilmente biodegradables, sigue un flujo en función del tratamiento aplicado. En un sistema aerobio, los organismos microbianos transforman en nuevas células (*i.e.* lodos biológicos) el 65% de su energía producida mediante la síntesis. El 35% restante se disipa en forma de calor como resultado de la liberación de energía que acompaña dichos procesos (Noyola *et al.*, 2013). Los sistemas de tratamiento aerobio requieren de equipos de aireación que transfieren oxígeno al agua y a los microorganismos para poder cumplir sus procesos de tratamiento, lo cual implica los costos más altos en consumo energético. Los lodos que resultan del proceso deben tener su propio tratamiento para poder disponer de ellos de forma segura lo cual implica costos adicionales que deben ser considerados (CONAGUA, 2015a).

En cambio, en un sistema anaerobio, el 90% de la energía contenida en la materia orgánica contaminante se transforma en emisiones de gas metano, el cual puede ser capturado y aprovechado como combustible. Solo el 10% restante de la energía contenida del sustrato se transforma en lodos, lo cual representa una sexta parte de los lodos que genera un sistema aerobio, reduciendo así los requerimientos y costos para la disposición de estos (Noyola *et al.*, 2013). Es importante señalar que, a diferencia de los sistemas aerobios, la operación de un sistema anaerobio requiere de bajos o nulos consumos de energía (Kleerebezem y Macarie, 2003).

La principal tecnología disponibles para el tratamiento aerobio de agua residual es la de lodos activados y sus diversas variantes; en sistemas de tratamiento anaerobios los más comunes son los tanques sépticos (CONAGUA, 2015c; OMS, 2017). Sin embargo, durante la última década se han desarrollado nuevos sistemas basados en procesos anaerobios avanzados con mejoras importantes en los tiempos y efectividad de

tratamiento, tales como el reactor anaerobio de flujo ascendente, el filtro anaerobio de flujo ascendente, el lecho fluidizado anaerobio y los reactores aerobios de lecho extendido (Abdel-Halim *et al.*, 2008). Estos sistemas ofrecen buenas oportunidades para el tratamiento de una gran variedad de aguas residuales industriales con contenidos medios y altos de carga orgánica, así como para el tratamiento de las aguas residuales domésticas y municipales de baja carga orgánica (Mara, 2003).

Sin embargo, los sistemas aerobios mantienen la ventaja de proveer una calidad superior de agua tratada. Por lo mismo, los sistemas aerobios son ampliamente utilizados, ya que permiten cumplir con los requerimientos en efluentes tratados de las regulaciones ambientales estrictas. Para poder aprovechar los beneficios ya mencionados de los sistemas anaerobios, a estos sistemas debe seguir un proceso aerobio que termine de degradar la materia orgánica del efluente anaerobio. Una combinación de sistemas anaerobios con sistemas aerobios disminuye notoriamente los costos de operación y mantenimiento en una planta de tratamiento, ya que reduce el consumo energético y la producción de lodos. (Noyola *et al.*, 2013).

4.3 Sistemas basados en procesos naturales

Un grupo aparte que es importante mencionar, son los sistemas que hacen uso de los procesos naturales como son los sistemas lagunares y sus diversas variantes, los humedales (*i.e. wetlands*) y los escurrimientos o infiltración en el terreno (Noyola *et al.*, 2013). Estas tecnologías utilizan procesos que ocurren en hábitats naturales, pero lo hacen de manera más controlada (Rozkošný *et al.*, 2014). Los sistemas basados en procesos naturales para el tratamiento de diversos tipos de aguas residuales tienen un largo historial en su utilización y por mucho tiempo se han considerado una solución muy atractiva debido a los bajos costos de inversión, mantenimiento y operación (de Anda-Sánchez, 2017).

Los humedales naturales son áreas que se caracterizan por tener agua que cubre su superficie de manera permanente o por temporadas. Los humedales artificiales o construidos son sistemas de tratamiento que utilizan procesos naturales que involucran vegetación de humedales, suelos y sus conjuntos microbianos asociados para mejorar

la calidad del agua (United States Environmental Protection Agency [USEPA], 2018). Los humedales artificiales tienen una amplia gama de aplicaciones limpiando diferentes tipos de aguas como drenajes domésticos, de cultivos, descargas industriales, desagües de minas, escurrimientos de rellenos sanitarios, ríos contaminados, aguas pluviales y contaminantes urbanos (Wu *et al.*, 2015).

En un humedal artificial se dan diferentes procesos físicos, químicos y biológicos para la degradación de los contaminantes presentes en las aguas residuales (CONAGUA, 2015). Los sólidos suspendidos son removidos en el humedal por filtración y sedimentación, mientras que los microbios que se encuentran en el humedal degradan biológicamente la materia orgánica tanto de forma anaerobia, como aerobia. La vegetación del humedal suministra el oxígeno de la atmósfera a sus raíces para la degradación aerobia (UN Habitat, 2008].

Aunque este tipo de sistemas son más apropiados para ambientes rurales y periurbanos, debido a la extensión de terrenos que se requiere, igualmente se han aplicado en ambientes urbanos (de Anda-Sánchez, 2017). Los sistemas anaerobios pueden combinarse con sistemas facultativos y aerobios tales como las lagunas de estabilización, biofiltros y humedales artificiales, los cuales son sistemas de bajo costo de instalación, de bajo consumo energético y permiten cumplir con los estándares de calidad a la descarga, además de que generan espacios amigables con el entorno (Mara, 2003).

4.4 Normatividad en México para el tratamiento de las aguas residuales

Para determinar las posibilidades de utilizar un sistema de tratamiento en particular, es necesario conocer de la cantidad y calidad de las aguas residuales a tratar, y las normas de calidad que deben cumplirse para las descargas de la planta de tratamiento. Conociendo esto, es posible definir los procesos de tratamiento adecuados. Existen otros factores que pueden ser condicionantes como son la disponibilidad de terreno, de mano de obra calificada, requerimientos energéticos, insumos como refacciones de equipos y químicos, consumo y disponibilidad de agua; así como considerar los costos de estos

requisitos puedan tener en los trabajos de mantenimiento y operación (MyO) (CONAGUA, 2015a).

En la Tabla 1 se muestran composición típica de las aguas residuales de origen doméstico o municipal. El agua residual municipal es clasificada como fuerte, media o débil, dependiendo de la concentración de los diferentes contaminantes. La Tabla 2 presenta las características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales domésticas para distintos tamaños de poblaciones (2,500 a 100,000 habitantes) en el país (CONAGUA, 2015a).

Tabla 1. Composición típica de las aguas crudas de origen doméstico (CONAGUA, 2015a).

Parámetro	Concentración		
	Alta	Media	Baja
Sólidos totales	1 200	720	350
Disueltos totales	850	500	250
Fijos	525	300	145
Volátiles	325	200	105
Suspendidos totales	350	220	100
Fijos	75	55	20
Volátiles	275	165	80
Sólidos sedimentables (mL/L)	20	10	5
DBO (a 20°C)	400	220	110
COT	290	160	80
DQO	1 000	500	250
Nitrógeno (total como N)	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoniacal	50	25	12
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
Fosfatos (como P)	15	8	4
Orgánico	5	3	1
Inorgánico	10	5	3
Clorados b	100	50	30
Alcalinidad (como CaCO ₃)	200	100	50
Grasas	150	100	50

a Unidades en mg/L, excepto los sólidos sedimentables

b Valor que se incrementa de acuerdo con la cantidad de suministro de agua

Tabla 2. Promedio de aguas residuales municipales por tamaño de población (CONAGUA, 2015a).

Parámetro	Tamaño de población (Núm. de habitantes)				Promedio
	2 500	10 000	20 000	50 000	
	a	a	a	a	
	10 000	20 000	50 000	100 000	
PH	7.4	6.9	6.9	7.3	7.1
Temperatura (°C)	25	20	23	22	23
DBO	264	299	254	301	280
DQO	698	719	609	430	614
SS (mL/L)	9	5	8	3	6
Grasas y aceites	56	44	65	96	65
N-NH ₃	24	28	14	12	20
N-Orgánico	18	23	23	9	18
N-Total	37	44	30	24	34
Fosfatos Totales	20	24	16	29	22
SAAM	14	11	17	17	15
Coliformes. Totales NMP/100mL	7	773	14	107	225
Sólidos:					
Totales	1552	1141	1391	932	1254
Totales Suspendidos	286	309	233	167	249
Totales Dispersos	1266	832	1158	765	1005
Totales Vol.	737	871	449	349	602
Volátiles Suspendidos	223	192	151	139	176
Volátiles Dispersos	514	379	298	210	350
Totales Fijos	815	570	942	583	728
Fijos Suspendidos	116	145	183	58	126
Fijos Dispersos	699	425	759	525	602

Unidades en mg/L, excepto que se indique de otra forma

Dentro de las Normas Oficiales Mexicanas vigentes en el tema de la calidad del recurso hídrico se encuentra la NOM-001-SEMARNAT-1996, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (Tabla 3 y 4). La NOM-003-SEMARNAT-1996 (Tabla 5), la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reutilicen en servicios al público. Adicionalmente existe la NOM-004-SEMARNAT-2002 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para el aprovechamiento y disposición final de lodos y biosólidos provenientes de los sistemas

de tratamiento de aguas residuales. Las descargas de una PTARM deben cumplir satisfactoriamente estos parámetros.

Tabla 3. Límites máximos permisibles para contaminantes básicos NOM- 001- SEMARNAT-1996 (SEMARNAT, 2012).

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

(1) Instantáneo

(2) Muestra Simple Promedio Ponderado

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

P.D.= Promedio Diario; P.M.= Promedio Mensual; N.A.= No es aplicable (A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos.

Tabla 4. Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros NOM- 001- SEMARNAT-1996 (SEMARNAT, 2012).

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

(*) Medidos de manera total.
P.D. = Promedio Diario, P.M. = Promedio Mensual; N.A. = No es aplicable
(A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos.

Tabla 5. Límites máximos permisibles para reúso en servicios al público NOM-003- SEMARNAT-1997 (SEMARNAT, 2012).

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES					
TIPO DE REUSO	PROMEDIO MENSUAL				
	Coliformes fecales NMP/100 ml	Huevos de helminto (h/l)	Grasas y aceites mg/l	DBO ₅ mg/l	SST mg/l
SERVICIOS AL PÚBLICO CON CONTACTO DIRECTO	240	≥ 1	15	20	20
SERVICIOS AL PÚBLICO CON CONTACTO INDIRECTO U OCASIONAL	1,000	≤ 5	15	30	30

Adicionalmente, existe un proyecto de modificación a la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, denominado PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017, que propone nuevos lineamientos a cumplir, con nuevos parámetros como la DQO y carbono orgánico total (COT), nuevos límites permisibles y una nueva clasificación para los cuerpos

receptores. La Tabla 6 muestra los límites máximos permisibles para contaminantes básicos de acuerdo con el PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017.

Tabla 6. Límites máximos permisibles para contaminantes básicos PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017 (SEMARNAT, 2017).

Parámetros (*) (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas y estuarios			Suelo					
	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos		
										P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.
Temperatura (°C)	35	35	35	35	35	35	40	40	40	35	35	35	35	35	35
Grasas y Aceites	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21
Sólidos Suspendidos Totales	60	72	84	20	24	28	20	24	28	30	36	42	100	120	140
Demanda Química de Oxígeno	150	180	210	100	120	140	85	100	120	60	72	84	150	180	210
Carbón Orgánico Total*	38	45	53	25	30	35	21	25	30	15	18	21	38	45	53
Nitrógeno Total	25	30	35	20	25	30	25	30	35	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Fósforo Total	15	18	21	12	15	18	15	18	21	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Huevos de Helmintos (huevos/litro)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1					
<i>Escherichia coli</i> , (NMP/100 ml)	1000	1200	1400	1000	1200	1400	1000	1200	1400	1000	1200	1400	1000	1200	1400
<i>Enterococos fecales</i> * (NMP/100 ml)	1000	1200	1400	1000	1200	1400	1000	1200	1400	1000	1200	1400	1000	1200	1400
pH (UpH)	6.5 - 8.5														
Color verdadero	Pureza del 15%														
Toxicidad aguda (UT)	Menor o igual a 5														
N.A: No Aplica P.M: Promedio Mensual P.D: Promedio Diario V.I: Valor Instantáneo NMP: Número más probable UpH: Unidades de pH UT: Unidades de Toxicidad * Carbón Orgánico Total y <i>Enterococos fecales</i> solo se analizarán en lugar de Demanda Química de Oxígeno y <i>Escherichia coli</i> para aquellas descargas de aguas residuales que presenten concentraciones mayores a 1000 mg/l de cloruros.															

5. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En México, la gestión de recursos económicos para el financiamiento que requiere la construcción de una PTARM es un proceso complicado. Una vez que se logra el objetivo de instalación, y después de algún tiempo de mantenerlas en operación, los municipios se dan cuenta que no tienen los recursos suficientes para su funcionamiento y deciden cancelar los recursos que financian su operación, por lo que las instalaciones terminan siendo abandonadas (De la Peña *et al.*, 2013).

Cuando los sistemas operan de forma intermitente o dejen de operar se generan impactos importantes al medio ambiente derivado de las descargas directas de las aguas residuales a cuerpos receptores de agua (De la Peña *et al.*, 2013). Esta situación se puede contemplar en la mayoría de los estados del país, en donde los ecosistemas fluviales, lacustres y de aguas subterráneas (acuíferos) han sufrido diversos grados de degradación debido al vertido de aguas sin tratar en cuerpos de aguas superficiales o a su infiltración al subsuelo (de Anda-Sánchez, 2017).

Además de esto, los municipios deben adquirir capacidades administrativas y de operación para poder mantener la PTARM funcionando. El hecho de que los periodos de la administración municipal sean relativamente cortos, hace que las instituciones de agua y saneamiento enfrenten la pérdida periódica de conocimiento y experiencia, además de repetir la negociación de sus presupuestos anuales. Tal situación se ve agravada por la frecuente ausencia de planeación a mediano y largo plazo en el ámbito de los gobiernos municipales (Noyola *et al.*, 2013).

En el estado de Jalisco, son muchos los ejemplos de PTARM abandonadas o que se encuentran trabajando en condiciones precarias (Figura 4). Las entrevistas con funcionarios y operadores de los servicios de agua y alcantarillado en algunos de los municipios del estado indican que la razón principal por la que muchas de las PTARM dejaron de operar, se debe a los elevados consumos de energía y a los altos costos de MyO (de Anda y Shear, 2016; de Anda-Sánchez, 2017).



Figura 4. Laguna de aireación de la PTARM de Poncitlán en estado de abandono (Fuente: Tomada por Víctor M. Mijangos Pulido, 2018. Publicada con autorización de CIATEJ).

Para lograr el ODS6 de la Agenda 2030, acceso a un saneamiento e higiene adecuado y equitativo para todos, en particular para los grupos de la sociedad más vulnerables, es necesario implementar soluciones sustentables que compensen la insuficiencia que existe en la infraestructura para el manejo y tratamiento del agua residual, así como para ampliar y mejorar los sistemas de abastecimiento de agua. La situación actual, con infraestructura construida insuficiente, inapropiada y obsoleta, presenta un escenario de oportunidades para replantear el modelo que se debe implementar para un manejo sustentable de las aguas residuales.

6. SELECCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

6.1 Proceso metodológico de selección del sitio

La selección del caso de estudio fue precedida por una primera etapa de evaluación de sitios con base en una metodología multicriterio, que permitió distinguir aquellos sitios que reunían las mejores condiciones para su rehabilitación y de ser necesario, su reconversión tecnológica de su sistema de tratamiento. El proceso de evaluación consideró un total de 26 PTARM de diferentes localidades dentro del estado de Jalisco que, de acuerdo con los reportes de la CEA (s.f.), se encontraban fuera de operación, en estado de abandono o trabajando en condiciones precarias. Los sitios se enlistan a continuación y su ubicación se muestra en la Figura 5.

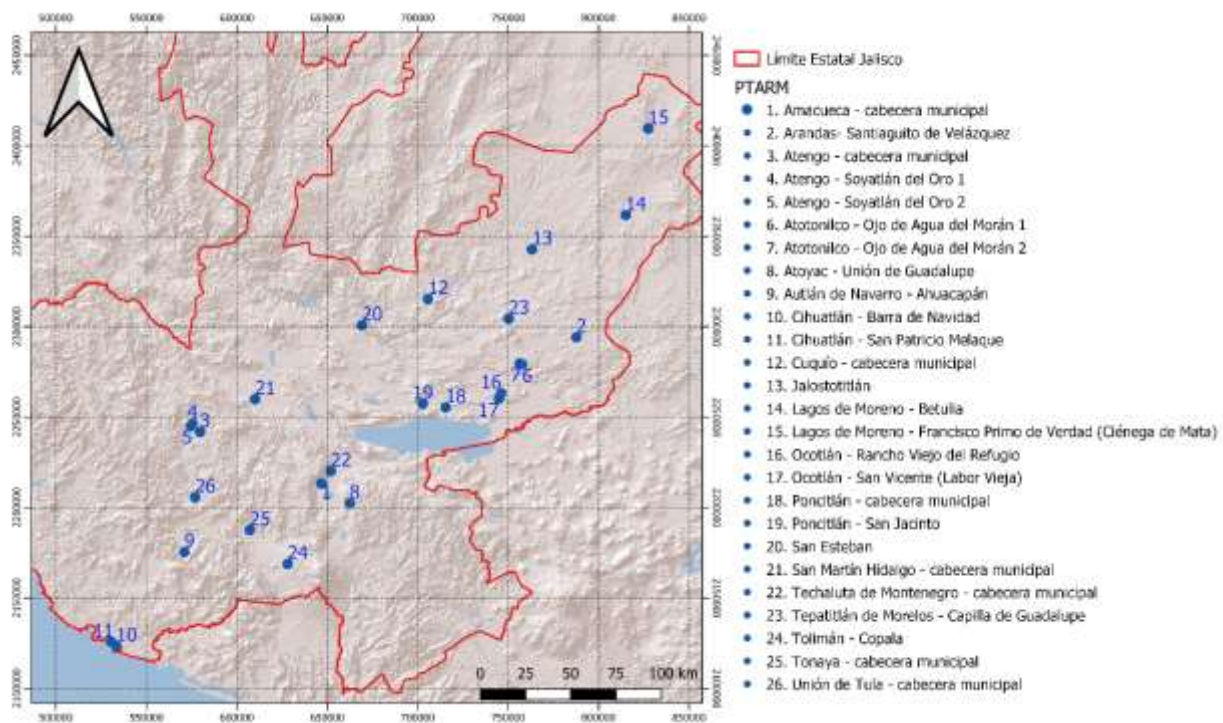


Figura 5. Mapa de ubicación de sitios visitados en el estado de Jalisco (Fuente: Elaboración propia).

Cada una de las PTARM consideradas cuenta con características constructivas y de diseño únicas, por lo que fue necesario desarrollar una metodología para poder comparar sus particularidades bajo un esquema que pudiera homologar los resultados obtenidos. No se localizaron fuentes de información que permitieran conocer los criterios bajo los cuales se pueda aplicar una metodología con los propósitos planteados, por lo que se considera que este fue uno de los primeros esfuerzos realizados en este sentido. La descripción completa de este ejercicio de evaluación y sus resultados ya fue presentada por Mijangos Pulido y de Anda Sánchez (2019).

La metodología aplicada se basó en la evaluación de reactivos de acuerdo con una escala de Likert. En la literatura se reportan varios trabajos relacionados con la resolución de problemas ambientales que se fundamentan en la aplicación de métodos basados en la escala de Likert (Yigitcanlar y Dur, 2010; Shen *et al.* 2011; Kaminsky y Javernick-Will, 2013). Los reactivos definidos para aplicar esta metodología responden a un criterio meramente tecnológico. La matriz generada consta de 20 reactivos que evalúan las características propias de la PTARM y de las aguas residuales tratadas, además de considerar las dificultades técnicas al llevar a cabo la rehabilitación y /o reconversión tecnológica en los procesos de tratamiento. Esta matriz fue diseñada considerando la opinión de expertos que han publicado algunos criterios de selección y diseño de este tipo de infraestructura (WEF, 2010). Los reactivos se clasificaron de la siguiente forma:

- Condiciones generales de la infraestructura de saneamiento
- Tecnología de tratamiento y condiciones físicas de la PTARM
- Calidad del agua
- Factibilidad técnica para implementar el proyecto
- Riesgos
- Presupuesto

La evaluación se efectuó con la información obtenida en las visitas de campo y la información obtenida de diversas fuentes; como fueron las entrevistas con autoridades y responsables de los servicios de agua y saneamiento municipales, levantamientos fotográficos, fichas técnicas hidrológicas municipales publicadas por la Comisión Estatal

del Agua de Jalisco, diagnósticos municipales elaborados por el Instituto de Información Estadística y Geográfica del Estado de Jalisco (IIEG), así como otras publicaciones y fuentes de información complementarias.

Los reactivos favorecieron a aquellas PTARMs que conservaran una mayor integridad de su infraestructura, pues contaban mejores posibilidades de ser rehabilitadas; y aquellas que su tecnología de operación permitiera una reconversión a un sistema de tratamiento de bajo consumo energético y gastos de MyO. En este aspecto aquellas con sistemas de tratamiento que utilizan procesos anaerobios seguidos de un proceso aerobio o facultativo. El tipo de contaminantes de acuerdo con las aguas residuales generadas en la población deberán ser aptas para el sistema biológico de depuración que se propone.

Otro reactivo que tuvo un peso importante en la evaluación fue el número de personas que se verían beneficiadas con la obra, lo cual se ve reflejado en el aforo de agua a tratar, pues se buscó que el proyecto tuviera el mayor será el beneficio posible. Por otra parte, la factibilidad técnica de implementar la reconversión o rehabilitación de una PTARM toma en cuenta aspectos propios del sitio como es el espacio disponible, la accesibilidad y las características del terreno, con la finalidad de anticipar cualquier impedimento en la ejecución del proyecto. Los riesgos asociados al sitio, como inundaciones o deslaves, también fueron un criterio que se calificó.

El proceso de evaluación y selección de acuerdo con diferentes criterios tecnológicos reveló que la planta de Copala, Tolimán, fue aquella que mejor cumple con las condiciones para ser intervenida, entre las PTARMs analizadas dentro del estado. El diseño original de la planta, además de las características de su población y contexto territorial, dieron buenos resultados en un primer ejercicio de diagnóstico para poder tomar la decisión de invertir los recursos necesarios en su rehabilitación.

6.2 Descripción del área de estudio

La población de Copala se encuentra ubicada dentro del municipio de Tolimán (Figura 6), en la región sur del estado de Jalisco, México, en las coordenadas 19°36'38"N

103°46'01"O. Con una altitud media de 1,461 m s. n. m., se sitúa en las inmediaciones del volcán de Colima. Se trata de la localidad rural más poblada del municipio, con 2,709 habitantes al año 2010. La población general del municipio presenta un grado de marginación alto, además de una carencia importante en servicios de salud. La agricultura y ganadería son la principal actividad económica (IIEG, 2018).

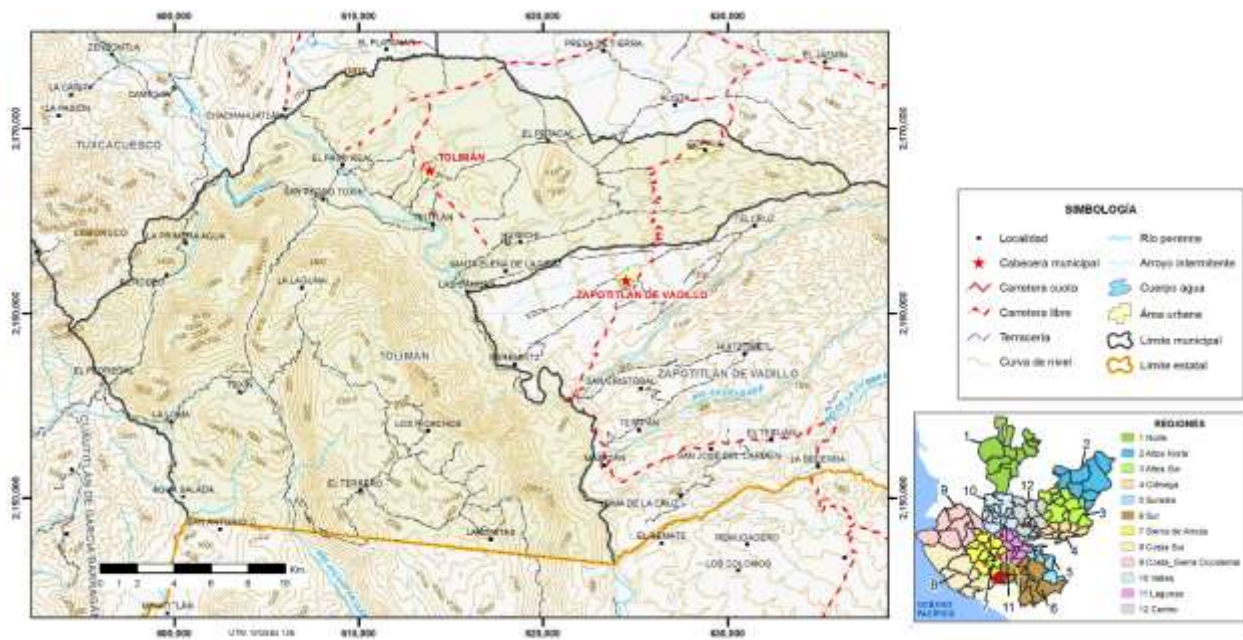


Figura 6. Mapa base del municipio de Toluán, Jalisco (IIEG, 2018).

El cauce principal por el cual fluyen las aguas superficiales en el municipio de Toluán son las del río Ayuquila, al cual se le une el río Tuxcacuesco, y posteriormente forma parte del río Armería. Los escurrimientos y arroyos temporales en las barrancas que rodean la población de Copala desembocan en el río Ayuquila. La carta hidrogeológica de la región (INEGI, 2016), clasifica el área de estudio como zona de alta recarga para los acuíferos en la parte baja del territorio, cercanos al río. De acuerdo con el WRI, el grado de estrés hídrico en la zona es extremadamente alto (WRI, 2019a).

La principal fuente de agua potable para uso doméstico proviene de los manantiales que surgen en las laderas del volcán de Colima. El organismo operador de agua potable y alcantarillado (SAPAC) reporta una dotación de un caudal de 16 L/s (litros por segundo)

que abastece las localidades de la región, con un suministro estimado de 8 L/s para la población de Copala. Por otra parte, la mayoría de los aprovechamientos de agua subterránea en el municipio (98%) son para uso agrícola (CEA, 2015). Existe una gran demanda del recurso por parte del sector agrícola; por este motivo, es común ver en la zona grandes reservorios construidos para la captación de aguas pluviales, además del abastecimiento con pipas (*i.e.* camiones cisterna) de agua potable para riego agrícola.

En el municipio de Tolimán cuenta con dos PTARM instaladas y ambas se reportan fuera de operación, siendo una de estas la PTARM de Copala. Por lo anterior, se puede decir que la cobertura de saneamiento en el municipio es del 0% (CEA, 2015). Esto significa que las aguas residuales generadas por las diferentes localidades del municipio son descargadas directamente sin ningún tratamiento previo. Al revisar los sitios de monitoreo de CONAGUA bajo diferentes indicadores [*e.g.* DBO₅, DQO, sólidos suspendidos totales (SST), CF] de calidad de agua, el cauce del río Ayuquila dentro del territorio municipal, reporta una calidad de agua clasificada en los rangos de contaminada a fuertemente contaminada (SINA, 2017).

En lo que respecta a los usos de suelos del área de estudio definida, las superficies de selva caducifolia y de agricultura de temporal; así como los bosques de encino y coníferas en las laderas del volcán, predominan la región (INEGI, 2013). Sin embargo, en la actualidad podemos observar un cambio en el paisaje, con la expansión del cultivo de aguacate, el cual requiere grandes cantidades de agua para riego. De acuerdo con un estudio presentado por el Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible A.C. (CCMSS), el municipio de Tolimán ha pasado del rango de 0.01 - 10 hectáreas de cultivo en el año 2003, a un rango de 50-250 en el año 2018 (CCMSS, 2020). Por lo mismo, se puede suponer que la demanda por los recursos hídricos en la región ha incrementado debido a estos cambios en el uso del suelo.

6.3 Relevancia del caso de estudio

En Jalisco, la información publicada por la Comisión Estatal del Agua indica que más de la mitad de las PTARM del estado se encuentran fuera de operación o dadas de baja (CEA, s.f.), lo que significa que una inversión muy importante del estado en este rubro

no generó los beneficios esperados por la sociedad. Con la finalidad de contribuir a dar solución a la problemática que afrontan los municipios del estado de Jalisco en su infraestructura para el tratamiento de aguas residuales municipales, el Gobierno del Estado de Jalisco ha establecido como objetivo:

“Garantizar el derecho humano al agua y al saneamiento, a través de la gestión integral del recurso hídrico con visión de cuenca, que asegure un aprovechamiento sustentable y equitativo del agua superficial y subterránea, y permita la conservación de la biodiversidad y los procesos ecosistémicos.” (Gobierno del Estado de Jalisco, 2019, p.175).

Los esfuerzos dirigidos a cumplir este objetivo se miden a través de una serie de indicadores de los cuales podemos destacar tres por su relación directa con el proyecto al cual se enfoca este trabajo; 1) Plantas de tratamiento de aguas residuales en operación dentro de la norma, 2) Porcentaje de aguas residuales tratadas y 3) Litros por segundo de agua residual tratada reutilizada. Los resultados esperados para los años 2021 y 2024 buscan un incremento gradual de cada indicador (Gobierno del Estado de Jalisco, 2020).

Como ya se ha visto, el uso de tecnologías convencionales inadecuadas para su contexto, traen consigo el problema de abandono de las PTARM. Los profesionales orientados al diseño de PTARM deben tomar en cuenta el marco regulatorio, objetivos de la comunidad, restricciones financieras, y la tecnología más conveniente. Adicionalmente se espera que la PTARM funcione de forma confiable, económica, discreta y que cumpla con las normas oficiales aplicables (WEF, 2010).

En este aspecto, los sistemas que utilizan humedales artificiales o construidos para el tratamiento eficiente de las aguas residuales son una opción cada vez más utilizada debido a su bajo consumo energético y sus bajos costos de MyO (de Anda Sánchez, 2017). En México podemos encontrar más de 200 PTARM instaladas que utilizan esta tecnología humedales artificiales (CONAGUA, 2017); lo que representa una parte importante del inventario nacional y una tendencia en el desarrollo de esta tecnología.

A pesar de los beneficios que ofrecen como alternativa a las tecnologías convencionales, la correcta implementación de los sistemas de tratamiento que utilizan humedales artificiales continúa siendo un reto. El desempeño óptimo y sostenido a largo plazo de estos sistemas depende en gran medida de los parámetros de operación establecidos en su diseño, así como de condiciones propias del contexto en que se encuentra (Wu *et al.*, 2015).

En México no existe la información suficiente para generar criterios de diseño y operación específicos de estos sistemas en el país (CONAGUA, 2015) por lo que uno de los objetivos del presente trabajo es documentar el proceso de rehabilitación y reconversión tecnológica de una planta de tratamiento de aguas residuales comunitarias en estado de abandono basada en procesos anaerobios y humedales artificiales. Para este propósito se seleccionó la PTARM de la comunidad de Copala localizada en el municipio de Tolimán en el Estado de Jalisco. Los hallazgos y resultados de este trabajo aportan experiencias y aprendizajes no solo para la recuperación de la infraestructura existente, sino también para la gestión e implementación de nuevos proyectos de saneamiento en el contexto rural.

6.4 Gestión del proyecto

Sumado al resultado del proceso de selección de sitios, la Junta Intermunicipal de medio ambiente para la gestión integral de la cuenca baja del río Ayuquila (JIRA), en su informe anual del 2017, ya mencionaba un anteproyecto para la rehabilitación y mejora de la PTARM de Copala, Tolimán para cumplir con sus objetivos de incrementar la cantidad de aguas tratadas dentro de la cuenca hidrográfica de influencia. La JIRA, junto con el ayuntamiento municipal de Tolimán recuperaron la información del proyecto original e iniciaron las gestiones con la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial del Gobierno del Estado de Jalisco (SEMADET) para obtener los recursos económicos necesarios a través de un fondo ambiental (JIRA, 2017).

Fue a mediados del 2019 cuando la SEMADET autorizó el recurso económico para llevar a cabo el desarrollo del proyecto y las obras correspondientes, el cual sería administrado por la JIRA como organismo público descentralizado (OPD). El proyecto

fue asignado a la empresa BIODAF Water Technology con la asesoría técnica del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ). El presupuesto asignado para su ejecución fue de \$900,000.00 MXN. El proyecto es un esfuerzo compartido de diferentes actores como son el gobierno, OPDs, iniciativa privada y la academia.

Desde un principio se planteó el proyecto para aplicar la tecnología patentada por CIATEJ, la cual hace uso de los procesos anaerobios de un tanque séptico, seguido de un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA), en conjunto con el uso de humedales artificiales de flujo subsuperficial, plantados con especies ornamentales (López-López y de Anda-Sánchez, 2016). La eficiencia de dicho sistema está comprobada, las descargas de las aguas residuales tratadas cumplen con las normas oficiales, NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997 (de Anda *et al.*, 2018). En la Figura 7 se muestra una fotografía del humedal construido en las instalaciones de CIATEJ.



Figura 7. Planta de tratamiento de aguas residuales del Centro Público de Investigación CIATEJ en Zapopan, Jalisco, México (Fuente: Fotografía tomada por José de Anda Sánchez, 2018. Publicada con autorización de CIATEJ).

7. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

Yin (1994) define al estudio de caso como una estrategia de investigación destinada a responder ciertos tipos de interrogantes que se enfocan en el ¿Qué? ¿Cómo? y ¿Por qué? denotando la finalidad descriptiva y explicativa. En este caso, se busca comprender el fenómeno del abandono de una PTARM, que utiliza un tratamiento basado en procesos naturales, que contrario a los sistemas convencionales, son más adecuados para poblaciones rurales. Describir su proceso de rehabilitación expone las ventajas y desventajas de llevar este proyecto a cabo; las particularidades de este caso se pueden trasladar a un escenario general en el campo de diseño de las PTARM para promover la correcta implementación de estos sistemas y evitar la problemática de abandono que existe en el país.

El trabajo de investigación sobre el proyecto de rehabilitación y reconversión tecnológica de la PTARM de Copala, Tolimán se basa en un método mixto de datos cuantitativos y cualitativos; enfocándose, en su mayoría, sobre los aspectos técnicos de la infraestructura en cuestión. Esto incluye la revisión al proyecto y el diseño original, un diagnóstico de las circunstancias en las que se encontraba el sitio y una valoración de la efectividad de las obras para su intervención. De esta manera, se puede conocer a detalle las causas que llevaron al colapso del sistema de tratamiento y las estrategias que se definieron para corregir los defectos de este, rescatando los hallazgos más importantes del proceso. Sumado a esto, se realizó un ejercicio para estimar el potencial que puede tener la reutilización de las aguas tratadas en la zona para promover una gestión integral de sus recursos hídricos.

La revisión al proyecto original incluyó los planos, manuales y estudios en los cuales se detalla la configuración y el funcionamiento planteado en un inicio para el sistema de tratamiento general de la PTARM. Se presentan las bases sobre las cuales se define el diseño, como es la caracterización y el aforo de las aguas residuales. Se detalla cada proceso individual, sus componentes y sus características constructivas. Se hace un énfasis particular en las bases de diseño del sistema en general y los tiempos de retención hidráulico (TRH) de cada etapa del tren de tratamiento; estos se comparan con los criterios de diseño que se mencionan en la literatura especializada y los datos

obtenidos de la investigación. También se hacen observaciones sobre la calidad informativa del mismo proyecto y como influyeron en la construcción de este.

Una vez realizado el análisis al diseño original, este fue comparado con lo que se encontró en las visitas al sitio. Adicionalmente, se tomaron en cuenta los testimonios de los operadores, quienes dan mantenimiento a la planta desde sus inicios. De esta forma se evidenciaron las diferencias entre lo proyectado y lo construido, y a partir de esto se detectaron los defectos que llevaron a la situación de abandono. Los hallazgos que se hicieron en esta etapa se registraron y clasificaron de acuerdo con el tipo de afectación que ocurrió en el sistema de la PTARM, y más adelante se discuten si estas se deben a errores de diseño o errores constructivos, es decir, si se debían a una decisión incorrecta en el proyecto original o a una omisión en la obra. El diagnóstico del estado de abandono de la PTARM también mostró los riesgos y amenazas a los cuales se encuentra expuesto el sitio y que afectaron la integridad de sus instalaciones.

Con base en la revisión del proyecto original y el diagnóstico de la infraestructura, se definió una propuesta para la rehabilitación y reconversión tecnológica de la PTARM siguiendo lineamientos de diseño comprobados. La propuesta y la implementación de esta también se discuten para poder detectar los aciertos y errores que tuvieron en su desarrollo; tomando en consideración las limitaciones que condicionaban el alcance del proyecto. En esta sección se presenta la estrategia general para recuperar las funciones básicas del sistema de tratamiento, así como las partidas definidas para corregir los defectos identificados en cada uno de sus componentes. También se describen los obstáculos y desafíos que se dieron en el avance de las obras; y como estos afectaron y modificaron el plan de trabajo inicial.

En este trabajo se incluye un ejercicio sobre la eficiencia esperada en el tratamiento de las aguas residuales. Se toman los parámetros del estudio original de calidad del agua y con base en la revisión de casos de referencia, se estima la remoción que tendrá cada uno de estos en las dos etapas planteadas para el proyecto de rehabilitación de la PTARM. Los resultados obtenidos se comparan con la normatividad mexicana. Además, se establece un protocolo para el arranque y seguimiento de la planta y los lineamientos a seguir en su nueva forma de operar. En esta sección se presentan los resultados

obtenidos de un análisis de calidad del agua que acompaña el inicio de operaciones y lo que estos significan para los objetivos planteados en el proyecto.

Por último, se realiza una propuesta para el aprovechamiento de las aguas residuales tratadas, producto de la rehabilitación de la PTARM. A partir de lo observado en campo y de las entrevistas con los habitantes de la zona, se hace un análisis territorial de la expansión del cultivo de aguacate en los alrededores. Para esto, se define un área de influencia, el cual se basa en la clasificación de las cuencas hidrológicas y se revisa las imágenes satelitales para identificar las parcelas que pueden ser abastecidas. En esta parte se mencionan los actores que deben involucrarse para tener un mayor control del recurso.

8. CARACTERIZACIÓN DEL CASO

8.1 Revisión de la documentación original

La revisión de los documentos que describen el diseño y operación del proyecto original incluyó los planos constructivos, el manual de operación y estudios realizados como fueron los aforos de caudal y estudios sobre la calidad de las aguas residuales. De acuerdo con el manual de operación de la PTARM, esta fue diseñada con base en un tratamiento del agua por medio de sistemas pasivos (e.g. humedales artificiales y sistemas lagunares) y un nulo consumo energético. El flujo que corre a través de su tren de tratamiento funciona completamente por gravedad siguiendo la pendiente natural del terreno, sin la ayuda de ningún sistema de bombeo.

Los estudios de calidad del agua que acompañan al proyecto original muestran en los parámetros medidos niveles propios de un agua residual fuertemente contaminada de acuerdo con la clasificación antes vista (CONAGUA, 2015a); el resumen de resultados, que incluye el flujo calculado de los aforos, se presenta en la Tabla 7. La capacidad de caudal fue establecida en 3.5 L/s para una comunidad de 2,500 habitantes proyectada para el año 2020.

Tabla 7. Resumen de resultados de aforo y análisis fisicoquímicos y microbiológicos de las descargas de aguas residuales de Copala, Tolimán, Jal.

(Fuente: Archivos del proyecto original)

	12-13-feb-09	13-14-feb-09	14-15-feb-09	Promedio	Val. Máx.	Val. Mín.
Flujo, L/seg.	2.51	2.83	2.65	2.66	2.83	2.51
pH, Unidades de pH.	7.04	7.05	7.17	7.09	7.17	7.04
Sólidos Sedimentables, ml/L.	5.0	2.0	6.0	4.3	6.0	2.0
Sólidos Suspendidos Totales, mg/L.	230.00	480.00	360.00	356.67	480.00	230.00
Demanda Bioquímica de Oxígeno, mg/L.	320.00	460.00	505.00	428.33	505.00	320.00
Demanda Química de Oxígeno, mg/L.	1008.00	1209.60	1814.40	1344.00	1814.40	1008.00
Nitrógeno Total (Kjeldahl + nitritos + nitratos), mg/L.	64.37	77.75	87.60	76.57	87.60	64.37
Fósforo Total, mg/L.	15.42	14.46	15.19	15.02	15.42	14.46
Coliformes fecales, NMP/100 ml. (M1)	1.60E+08	3.30E+06	4.90E+06	5.61E+07	1.60E+08	3.30E+06
Grasas y Aceites, mg/L. (M1)	77.98	77.89	96.62	84.16	96.62	77.89
Arsénico; mg/l.		0.00180				
Cadmio; mg/l.		0.02				
Cianuro; mg/l.		<0,020				
Cobre; mg/l.		0.05				
Cromo; mg/l.		<0,04				
Mercurio; mg/l.		<0,0005				
Níquel; mg/l.		<0.04				
Plomo; mg/l.		0.04				
Zinc; mg/l.		0.34				
Huevos de helmintos, H/L.	3	8	4	5	8	3

La PTARM inició su operación a finales del año 2009 con una inversión de los tres niveles de gobierno por un total de \$6,436,997.00 MXN (aproximadamente \$9,848,605.00 MXN a precios de junio del 2020). Este proyecto fue parte del Programa para el Desarrollo de Zonas Prioritarias de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) el cual busca la mejora de la vivienda y provisión de servicios e infraestructura en las comunidades más marginadas del país (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo, 2013).

La configuración de la PTARM consta de siete componentes que conforman el tren de tratamiento de las aguas residuales. La forma, tamaño y distribución de cada componente dentro del sitio se puede apreciar en la Figura 8, la cual fue adaptada de los planos originales del proyecto; la numeración de cada uno sigue el orden que llevan dentro del sistema de tratamiento. A partir del tanque séptico (#2), el flujo saliente, llamado sobrenadante, se divide en un registro con doble vertedero, llamado caja de bifurcación, en dos trayectos paralelos, simultáneos y secuenciales, estos se diferencian con las letras “A” y “B”.

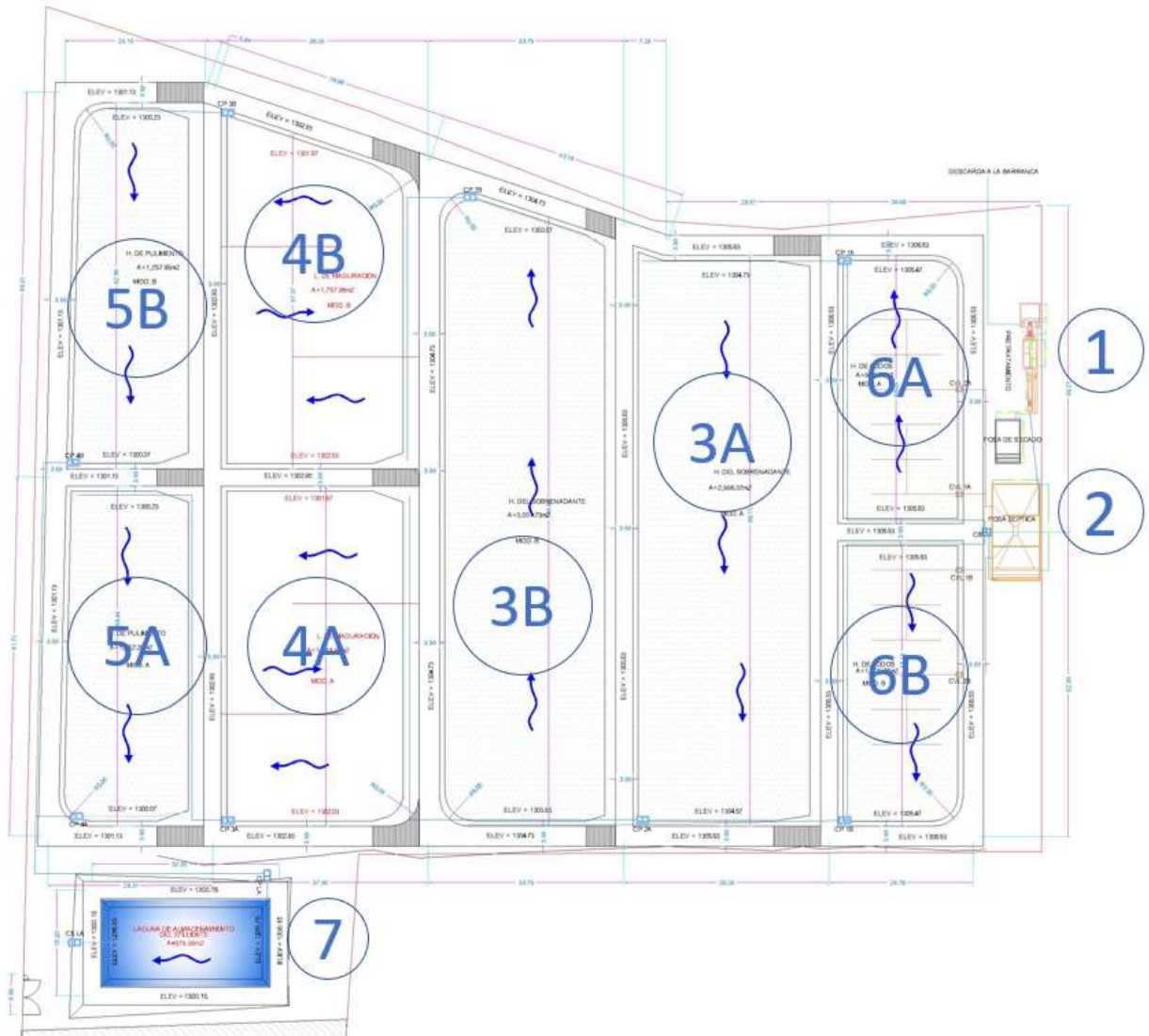


Figura 8. Plano de distribución de los principales componentes de la PTARM original
(Fuente: *planos originales del proyecto*).

A continuación, se describe cada componente del sistema y sus principales características, de acuerdo con lo especificado en los planos y el manual de operación:

- 1) Un canal de desbaste para retención mecánica y sedimentación de sólidos y arenas, en una estructura construida denominada Unidad de Pretratamiento. Este cuenta con dos cribas de acero al carbón para la remoción manual de sólidos finos y gruesos, doble canal desarenador con compuertas y un canal Parshall en la salida del canal

para medir el flujo de entrada; además de una salida para el sobreflujo que pueda llegar en temporada de lluvias. Esta estructura conecta en diferentes puntos con un depósito abierto que colecta los sólidos sedimentados, llamado fosa de secado de lodos. El detalle en planos de este componente se puede ver en la Figura 9

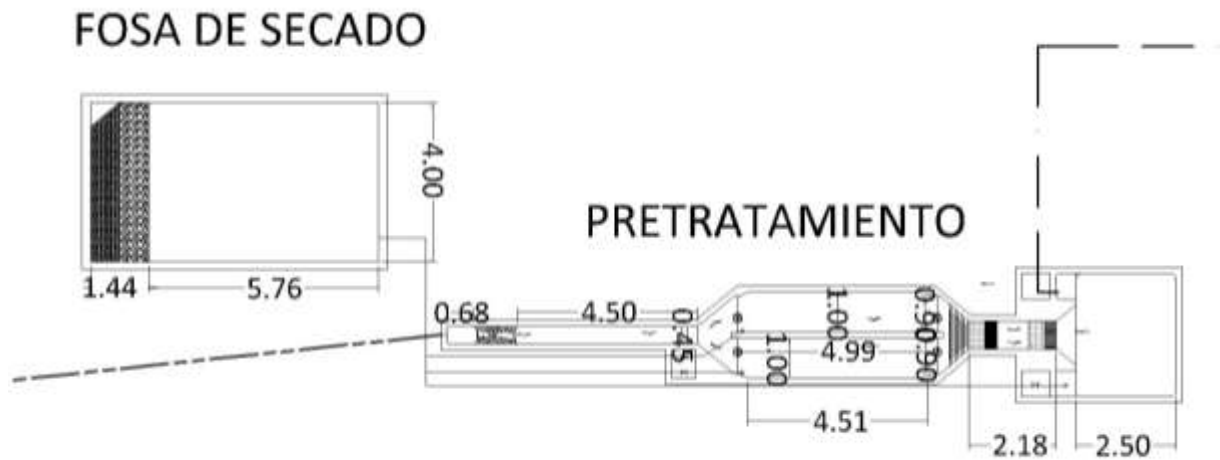


Figura 9. Plano de detalle de la unidad de pretratamiento y la fosa de secado de lodos
(Fuente: *planos originales del proyecto*).

- 2) Un tanque séptico para el tratamiento anaerobio del agua residual, con dimensiones de 8 m de ancho por 16 m de largo y un nivel hidráulico de 2.2 m de altura. Con una capacidad de almacenamiento aproximada de 280 m³ y un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 22.2 horas (~ 0.93 días) para un flujo de 3.5 L/s. El cálculo del TRH se realizó utilizando la siguiente fórmula, en donde V es el volumen total en m³ y Q el caudal del flujo de ingreso en m³/día:

$$TRH = \frac{V}{Q} = \frac{280}{302.4} = 0.925 \text{ días}$$

Su interior se divide en dos cámaras de digestión y una cámara de sedimentación tipo tanque Imhoff en la parte final. Para la extracción de los lodos sedimentados en su interior

cuenta con dos tuberías de 4" de diámetro que llegan al fondo del tanque y funcionan por carga hidráulica con la apertura de sus respectivas válvulas. La Figura 10 tomada de los planos muestra una vista en planta y otra en sección del tanque séptico, en esta se pueden observar sus características constructivas.

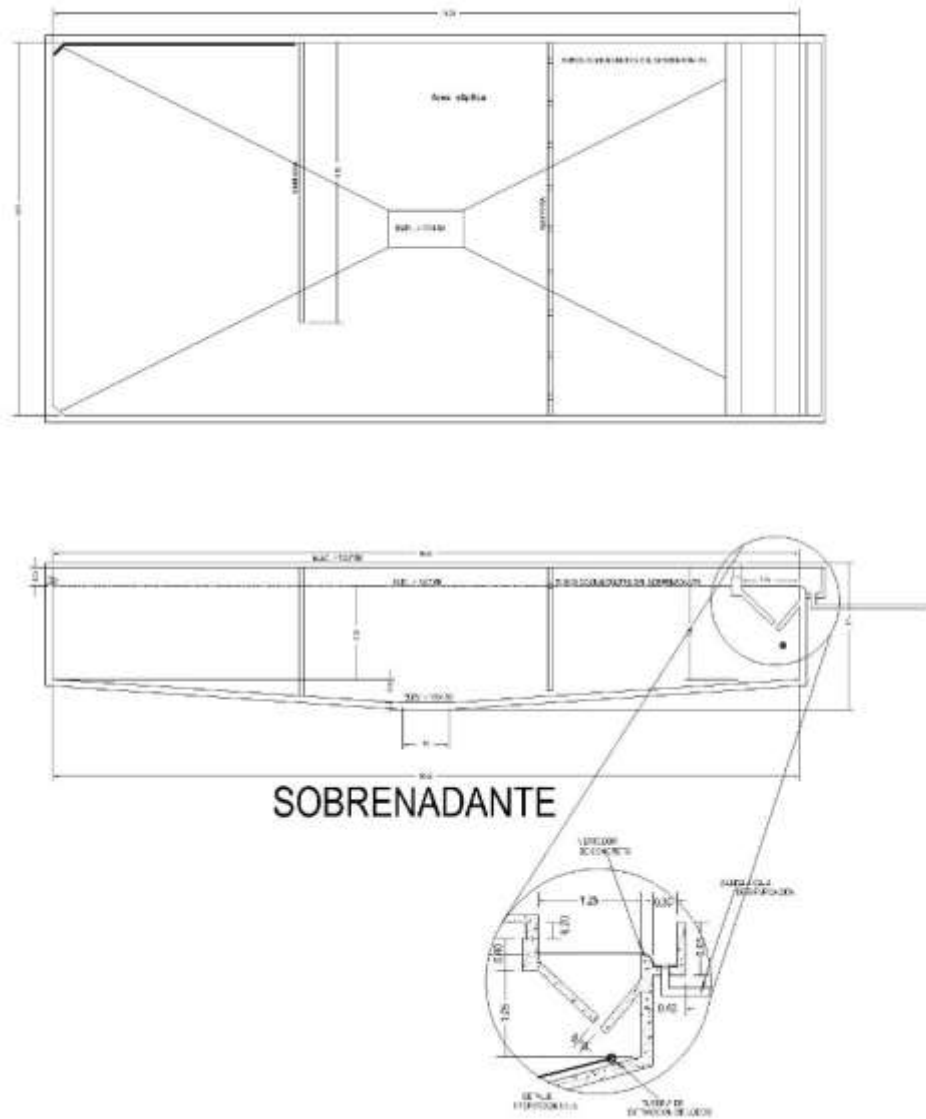


Figura 10. Plano de detalle del tanque séptico (Fuente: *planos originales del proyecto*).

- 3) Dos humedales (“A” y “B”) de flujo subsuperficial plantados con la especie tule común (*Typha sp.*), y rellenos a 70 cm con de material pétreo de la región (*i.e.* tezontle o

balastre) sobre una base de arcilla de 10 cms, llamados “Humedales de sobrenadante”. El nivel hidráulico se mantiene a 50 cm y se controla al final de línea de recolección con un vertedero dentro de un registro denominado “caja de paso”. El detalle del relleno en los humedales se puede apreciar en la Figura 11.

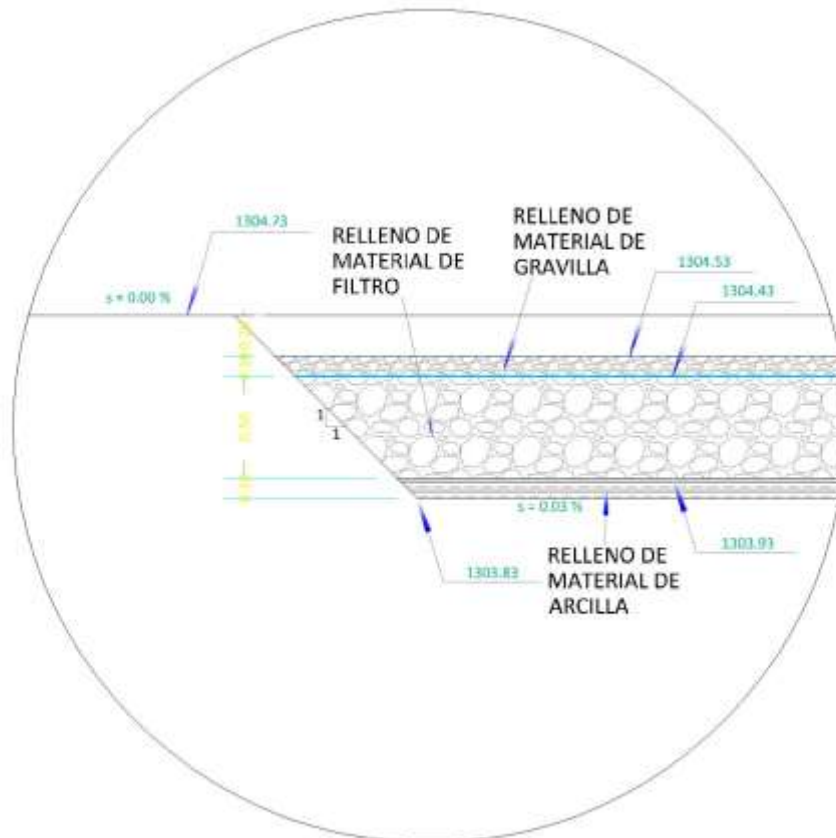


Figura 11. Detalle de niveles en humedales de sobrenadante (Fuente: *planos originales del proyecto*).

Cada uno de los humedales tiene una superficie aproximada de 3,000 m² (~ 100 x 30 m). El TRH de los humedales se calculó utilizando la siguiente ecuación (de Anda *et al.*, 2018, p. 9):

$$TRH = \frac{V \varepsilon_w}{Q_i} (1 - E)$$

En donde ε_w es la porosidad del medio filtrante, establecida en 0.68 (de Anda *et al.*, 2018, p. 9) y V es el volumen total del humedal (1500 m³). Q_i es el caudal, que es de 302.4 m³ por día, considerando el flujo de 3.5 L/s.

$$TRH = \frac{(1500)(0.68)}{302.4} (1 - 0.1) = 3.03$$

El TRH individual de cada humedal es de 3 días aproximadamente; con el flujo de 3.5 L/s dividido en ambos humedales es de un poco más de seis días (~ 145 horas).

- 4) Dos lagunas de maduración (“A” y “B”) con crecimiento de algas para la desinfección del agua tratada. Cuentan con dos mamparas deflectoras que influyen en la trayectoria del flujo. Cada una con una superficie aproximada de 1800 m² (~ 60 x 30m) y un nivel de agua a una altura de 60 cm; este se controla en la salida del flujo, dentro de la caja de paso. El volumen aproximado de cada laguna es de 1,080 m³. El TRH considerando ambas lagunas es de ~ 7 días, para obtener el TRH se utilizó la misma ecuación del tanque séptico.

- 5) Dos humedales (“A” y “B”) de flujo subsuperficial plantados con la especie de tule común (*Typha sp.*) y rellenos a 60 cm con material pétreo de la región sobre una base de arcilla, llamados “Humedales de pulimento”. Estos tienen la función de limpiar los remanente orgánicos e inorgánicos de los procesos anteriores. Cada uno tiene una superficie aproximada de 1,250 m² (~ 60 x 21m) y un nivel de agua a una altura de 50 cm y se controla en la caja de paso. El TRH combinado de ambos humedales, calculado con la ecuación anteriormente utilizada para los humedales de sobrenadante, es de 2.5 días (~ 60 horas).

6) Dos celdas (“A” y “B”) de aproximadamente 1000 m² (~ 50 x 20m) cada una para el tratamiento de los lodos biológicos provenientes del tanque séptico, estas se denominan “Humedales de Lodos”; a diferencia del resto de los humedales estos son plantados con la especie carrizo común (*Phragmites sp.*). Su diseño es idéntico al de los demás humedales de flujo subsuperficial, con la diferencia de que las líneas de distribución se reparten a lo largo y ancho de la celda (ver Figura 12). Estos humedales reciben descargas semanales al abrir las válvulas de extracción de lodos, alternando las descargas entre las celdas “A” y “B”. Los líquidos que drenan de estas celdas se dirigen a los humedales de sobrenadante y continua la secuencia ya descrita.

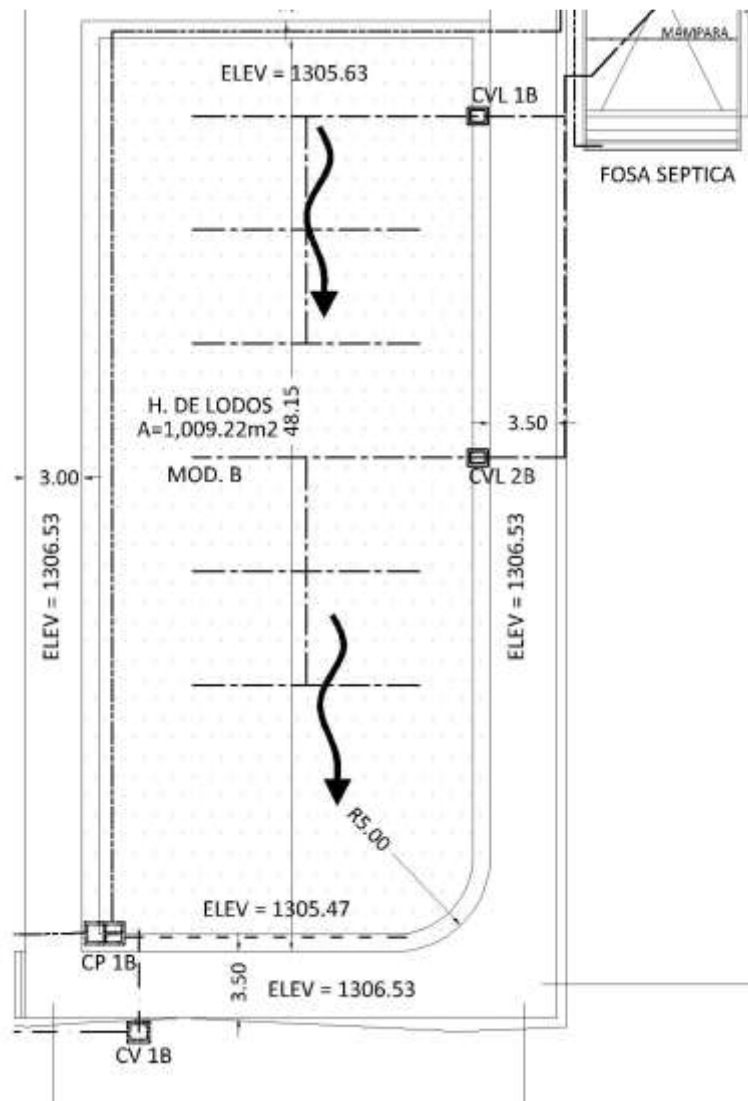


Figura 12. Humedal de lodos “B” (Fuente: *planos originales del proyecto*).

- 7) Un reservorio para el almacenamiento temporal del agua tratada con un área de 375 m² (~ 27 x 14m) y un volumen aproximado de 225 m³, el TRH, obtenido con el mismo cálculo que el de las lagunas y el tanque séptico, es de ~ 17.8 horas.

Para ilustrar la secuencia de los procesos del sistema de tratamiento original de la PTARM de Copala, Tolimán, estos se muestran en forma de diagrama de flujo en la Figura 13.

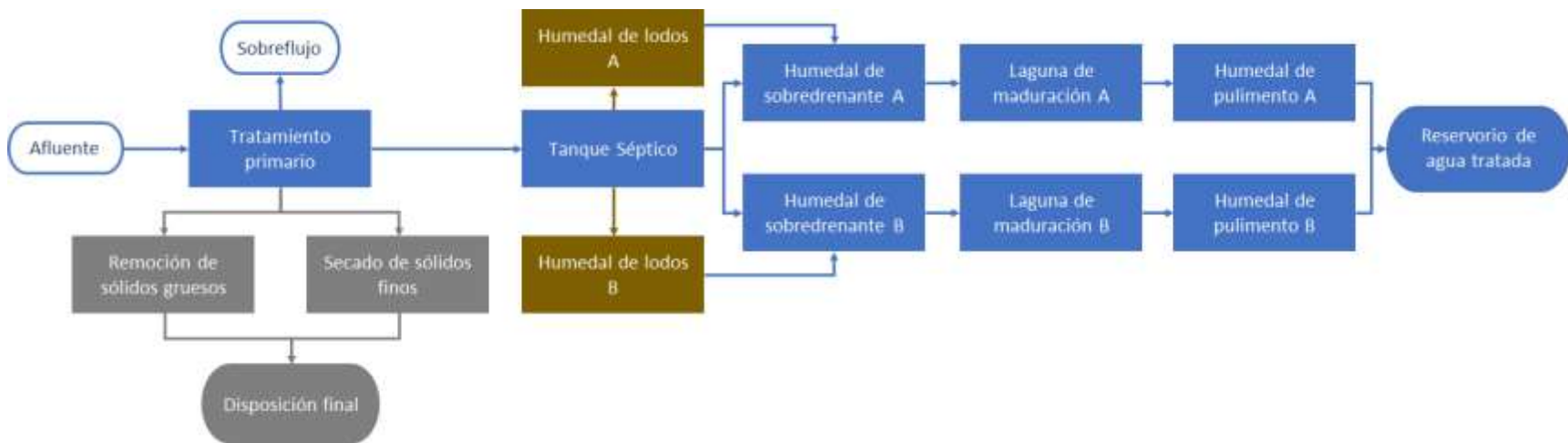


Figura 13. Diagrama del proceso de tratamiento del proyecto original (Fuente: Elaboración propia).

8.2 Revisión de la infraestructura existente

En las visitas que se realizaron al sitio se pudo observar la condición en la que se encontraban los diferentes componentes de la PTARM, comprobando el estado de abandono general de sus instalaciones y la operación deficiente del sistema de tratamiento. Al comparar lo observado en el sitio, con la información obtenida de la revisión de los planos del proyecto, se encontraron diferencias constructivas importantes que posteriormente se analizaron para encontrar los motivos del por qué el sistema de tratamiento de la PTARM había fallado. Los hallazgos que se hicieron tras un primer diagnóstico se clasifican de acuerdo con la afectación que tuvieron en la integridad o funcionamiento general de la PTARM, o a un componente en específico.

Afectaciones generales al sistema:

- No existía una división del flujo de sobrenadante proveniente del tanque séptico, como se planteaba en el proyecto original. El flujo solo circulaba por los componentes del sistema “A”. El estado de la vegetación en los humedales del sistema “B” hacía notar que el agua no corría por estos desde hace tiempo.
- La secuencia del tren de tratamiento no seguía los pasos del proyecto original. El flujo de sobrenadante proveniente del tanque séptico pasaba directamente al humedal de lodos, cuando este debía pasar directamente al humedal de sobrenadante. La caja de bifurcación se encontraba inundada y las conexiones que llegaban y salían de esta no eran visibles, sin embargo, era evidente que no estaba cumpliendo su función (Figura 14).



Figura 14. Caja de bifurcación inundada (Fuente: Archivo fotográfico de visitas al sitio).

- El control de nivel hidráulico de diferentes componentes del sistema había sido modificado. Los vertederos en algunas cajas de paso, que determinaban la altura del nivel del agua, estaban intencionalmente destruidos para bajar su altura. Esta situación afectaba los parámetros de operación, como es el TRH, descritos en el proyecto original (Figura 15).



Figura 15. Vertedero roto en la caja de paso (Fuente: Archivo fotográfico de visitas al sitio)

- En las celdas de los humedales el crecimiento del tule no estaba controlado a pesar de que aún se realizaban podas periódicas. La cantidad de follaje que se generaba saturaba la superficie del humedal, obstruyendo las tuberías perforadas de conducción de agua. El follaje seco obtenido de las podas se acumulaba en los pasillos perimetrales del predio de la PTARM (Figura 16).



Figura 16. Saturación de Tule en humedales (Fuente: Archivo fotográfico de visitas al sitio)

- La membrana de polietileno de alta densidad que se extiende en las celdas construidas para contener los humedales y lagunas del sistema presentaba desgarres, cortes y quemaduras por incendios. Estos daños en algunos casos provocaban infiltraciones al suelo y comprometían la integridad de toda la estructura de la celda (Figura 17).



Figura 17. Revisión de daños a la membrana entre humedales (Fuente: Archivo fotográfico de visitas al sitio).

- En la mayoría de los componentes del sistema se observó que las tuberías de distribución y recolección estaban dañadas o fueron removidas. La tubería y conexiones de todo el sistema se realizaron con PVC tipo sanitario, de un grosor mínimo.

Afectaciones por componentes:

- En un registro de la línea de drenaje próximo a la PTARM se instaló una válvula tipo “mariposa” que controla el ingreso al sistema o el desvío de las aguas residuales a un barranco. Esta válvula estaba dañada y ya no podía cerrarse.
- Las cribas del canal de desbaste se encontraban deterioradas por el óxido. El canal se encontraba azolvado de lodo en sus diferentes depósitos.
- La fosa de secado de lodos tenía una válvula de ingreso sin manija, de acuerdo con lo comentado por el operador, esta nunca funcionó. No parecía tener una

salida de desagüe ya que contenía agua estancada. La techumbre que se especificaba en planos para este elemento no se encontraba en su posición (Figura 18).



Figura 18. Fosa de lodos de la unidad de pretratamiento (Fuente: Archivo fotográfico de visitas al sitio).

- El tanque séptico se encontraba saturado de lodos biológicos. De acuerdo con lo medido en un principio, los lodos acumulados superaban las 3/4 partes de su nivel hidráulico.
- Las válvulas para la extracción de lodos biológicos del tanque séptico se instalaron afuera del registro designado en él proyecto. La manija de la válvula que controlaba las descargas al humedal de lodos “B” estaba rota (Figura 19).



Figura 19. Válvula de extracción de lodos dañada (Fuente: Archivo fotográfico de visitas al sitio).

- La tubería de distribución en el humedal de sobrenadante “A” había sido removida; el flujo de entrada se infiltraba por debajo de la membrana, sin embargo, daños a la membrana en uno de sus bordos permitían que el agua inundara el humedal. El flujo en este humedal era del tipo superficial y no subsuperficial como indicaba el proyecto (Figura 20).



Figura 20. Humedal de sobrenadante “A” con línea de distribución faltante y flujo superficial (Fuente: Archivo fotográfico de visitas al sitio).

- En el humedal de sobrenadante “B”, la vegetación silvestre había reemplazado gran parte de la plantación de Tule original (Figura 21).



Figura 21. Vegetación silvestre en Humedal de sobrenadante “B” (Fuente: Archivo fotográfico de visitas al sitio).

- La laguna de maduración “A” presentaba invasión de tule en una sección. Las mamparas deflectoras colgaban de la estructura que las sostenía.
- La laguna de maduración “B” presentaba daños importantes en la estructura de la membrana; esto provocaba infiltraciones de agua al suelo (Figura 22).



Figura 22. Laguna de maduración “B” con daños de la membrana en sus bordos (Fuente: Archivo fotográfico de visitas al sitio).

- En los humedales de lodos se observó crecimiento de plantas Tule y no de Carrizo, como lo especificaba el proyecto original.

8.3 Planteamiento del proyecto

El desarrollo del proyecto para la rehabilitación y reconversión tecnológica de la PTARM de Copala tuvo algunas limitantes que fueron consideradas en la planificación del proyecto. Una de las más importantes fue el presupuesto autorizado, que condicionó desde un principio el alcance de los trabajos que podrían realizarse. Por lo tanto, será necesario considerar una segunda etapa para que, más adelante, se asignaran los recursos necesarios para completar el sistema de tratamiento de acuerdo con el diseño patentado por CIATEJ (López-López y de Anda-Sánchez, 2016).

Debido a esto, fue necesario descartar la construcción del FAFA en una primera etapa; y trabajar solamente con uno de los dos trenes de tratamiento que funcionan de manera paralela. La selección de los componentes del sistema a intervenir (“A” o “B”) se basó en las condiciones generales en las que estos se encontraban, aprovechando aquellos que guardaban una mejor integridad física, sobre todo en cuanto a los daños de la membrana, pero también por la saturación de vegetación que tenían los humedales. Las estrategias planteadas y las partidas para esta primera etapa de intervención se dividen en dos categorías, el esquema general propuesto al sistema de tratamiento y las intervenciones puntuales en cada componente. La propuesta para el nuevo orden de procesos en la PTARM de Copala, Tolimán se ilustra en forma de diagrama de flujo en la Figura 23.

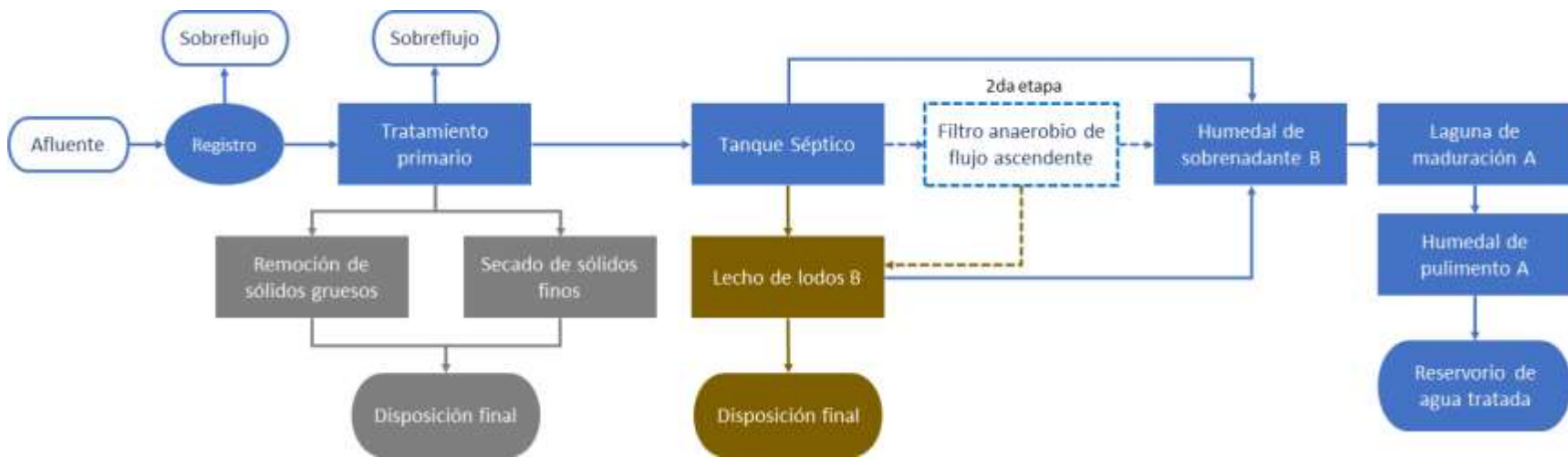


Figura 23. Diagrama de flujo del proceso de tratamiento propuesto (Fuente: Elaboración propia).

Esquema general propuesto del sistema de tratamiento:

- Se seleccionó para su intervención el humedal de lodos y humedal de sobrenadante del sistema “B”. Esta decisión responde a las circunstancias que se encontraron en el humedal de sobrenadante “B” al compararse con las de su contraparte del sistema “A”. Al seleccionar el humedal de sobrenadante “B”, por consecuencia, se debía intervenir también el humedal de lodos “B”.
- Se corrigió la secuencia original de los componentes del sistema de tratamiento, conectando directamente el flujo de sobrenadante que sale del tanque séptico con el humedal de sobrenadante B, sin pasar por el humedal de lodos.
- En las lagunas de maduración la situación era contraria a los humedales de sobrenadante. En este caso se decidió aprovechar la integridad de la laguna de maduración “A” y seguir por el humedal de pulimento “A”, para continuar el trayecto del flujo hacia el reservorio; con una conexión entre la línea de salida del humedal “B” y la línea de ingreso a la laguna “A”.

Intervenciones puntuales en los componentes del sistema:

- La rehabilitación del humedal de sobrenadante “B” como humedal de flujo subsuperficial con base en el modelo CIATEJ, que incluyó las siguientes partidas;
 - El desmonte desde la raíz de la vegetación existente utilizando maquinaria de construcción
 - La instalación de nuevas líneas de distribución y recolección del flujo con tubería hidráulica.
 - La reparación de los daños a la membrana en los bordos de la celda.
 - La sustitución de la vegetación con la plantación de una tercera parte de la superficie del humedal con la especie conocida como platanillo (*Canna Indica* L.).
- La reconversión del humedal de lodos “B” a un sistema de tratamiento de lodos biológicos por medio de un lecho de secado, esto incluyó las siguientes partidas;
 - El desmonte desde la raíz de la vegetación existente utilizando maquinaria de construcción.

- La instalación de una nueva línea de recolección de flujo con tubería hidráulica.
- La reparación de los daños a la membrana en los bordos de la celda.
- El desazolve completo de los lodos biológicos en el interior del tanque séptico.
- La instalación de nuevas líneas que conecten las tuberías internas de extracción de lodos del tanque séptico con los puntos de descarga al lecho de secado, incluyendo las válvulas en los registros designados en el proyecto original.
- La instalación de una nueva válvula tipo “compuerta” para controlar el flujo de ingreso a la planta en el registro externo a la PTARM.
- La sustitución de las cribas originales de acero al carbón del canal de desbaste, por cribas nuevas en acero inoxidable.

8.4 Modificaciones al proyecto

Con el avance en los trabajos definidos previamente en el desarrollo del proyecto para la intervención de los diferentes componentes seleccionados de la PTARM, se revelaron nuevas circunstancias sobre el estado de estos que no habían sido consideradas desde un principio. Estos descubrimientos modificaron el plan de acción inicial y representaron costos extraordinarios al proyecto. De estos hallazgos podemos destacar los siguientes:

- El desmonte de la vegetación en el humedal de sobrenadante “B” reveló que el material de relleno presentaba un grado importante de colmatación (*i.e.* saturación del material de relleno del humedal por partículas finas de materia orgánica y sedimentos).
- Excavaciones en diferentes puntos del humedal de sobrenadante “B” indicaron que el nivel del material de relleno no era de 60 cm como indicaban los planos del proyecto, si no cercano a los 40 cm.
- El desazolve de los lodos biológicos dentro del tanque séptico reveló que las tuberías de extracción en su interior estaban dañadas y necesitaban ser sustituidas.

Estas situaciones representaban un riesgo para la operación y mantenimiento del sistema de tratamiento, por lo que tuvieron que buscarse soluciones dentro de las posibilidades propias del proyecto. Estas se presentan en el mismo orden anterior:

- Para compensar el problema de colmatación en el humedal de sobrenadante, se realizaron en total 7 excavaciones en el material de relleno existente, estas abarcaban todo lo ancho del humedal, y se repartieron a lo largo del mismo. Estas se rellenan con nuevo material de filtrante con el objetivo de facilitar el flujo del agua (*i.e.* conductividad hidráulica) dentro del humedal (Figura 24 y 25). En el proyecto estas excavaciones se denominaron “zanjas de infiltración”.

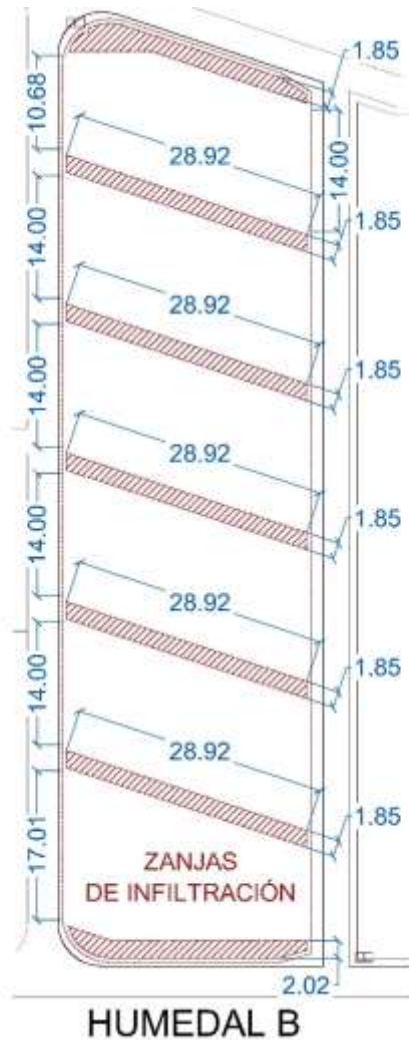


Figura 24. Detalle de las zanjas de infiltración en el humedal (Fuente: Planos del proyecto de rehabilitación).



Figura 25. Excavación de las zanjas de infiltración (Fuente: Archivo fotográfico del proyecto de rehabilitación).

- Para lograr subir al nivel requerido por la tecnología seleccionada fue necesario agregar más de 600 m³ de nuevo material de relleno en el humedal, esto es una capa de 20 cm en 3,000 m² de su superficie. Los trabajos para realizar la repartición y nivelación del tezontle se realizaron a máquina, estos incluyeron el material extraído de la excavación de las zanjas (Figuras 26 y 27)



Figura 26. Nuevo material añadido al relleno del humedal (Fuente: Archivo fotográfico del proyecto de rehabilitación).



Figura 27. Nivelación del material añadido en el humedal (Fuente: Archivo fotográfico del proyecto de rehabilitación).

- Una vez que se realizó el desazolve del tanque séptico, se habilitó la tubería interior de extracción de lodos para poder realizar las descargas en el lecho de secado “B” (antes humedal de lodos “B”).

Por otra parte, también se reportan circunstancias específicas que favorecieron o perjudicaron el progreso de las obras; de estas podemos mencionar las más relevantes:

- El uso de maquinaria para los trabajos dentro de las celdas de los humedales no representó ningún riesgo para la integridad de estas; la membrana en la base se mantuvo intacta a pesar del paso de vehículos pesados.
- El uso de la maquinaria redujo los tiempos estimados en los trabajos antes mencionados, sin embargo, su uso debe limitarse cuando se trabaja con el material de relleno en el humedal, para evitar la compactación de este. Se recomienda realizar estos trabajos de forma manual.
- El desazolve del tanque séptico sumó más de 50 horas de trabajo con un camión tipo “Vactor”. La posición de las entradas al tanque séptico hacía necesario utilizar extensiones para la tubería de succión (Figura 28).



Figura 28. Trabajos de desazolve del tanque séptico (Fuente: Archivo fotográfico del proyecto de rehabilitación).

- Para evitar esta situación a futuro, se realizaron cortes en la losa del tanque séptico para abrir nuevas entradas que permitan introducir la tubería de extracción sin necesidad de extensiones; las tapas instaladas son de un material ligero, que facilita la inspección del tanque, al contrario de las tapas de cemento existentes (Figura 29).



Figura 29. Nuevas tapas instaladas en el tanque séptico (Fuente: Archivo fotográfico del proyecto de rehabilitación).

8.5 Análisis sobre la gestión local de los recursos hídricos

El territorio en donde se sitúa la población de Copala, Toluimán es parte de la subcuenca río Ayuquila, que a su vez es parte de la cuenca hidrológica Pacífico que abarca gran parte del estado de Jalisco (CEA, s.f.-a). Debido a la amplitud que abarca en superficie la subcuenca río Ayuquila, es necesario buscar una unidad hidrológica que nos permita delimitar, en una escala más adecuada, el área de influencia en la que se encuentra la población. Para este fin, delimitar el área de estudio de acuerdo con los límites que marca una microcuenca resulta más adecuado para los alcances del proyecto. En este caso, se utilizó los límites ya establecidos en el Programa Nacional de Microcuencas, que data del 2002 (Casillas-González, 2007).

La población de Copala se ubica en la parte media alta de la microcuenca, en las llanuras rodeadas de barrancos que se han formado por los escurrimientos de agua que bajan del Volcán de Colima y desembocan en el cauce del río Ayuquila. Como ya se mencionó anteriormente, la población de Copala, y otras localidades se abastecen de los manantiales que afloran en los lomeríos del volcán. Se han detectado dos amenazas para la seguridad hídrica de la zona; las cuales pueden ser reguladas para asegurar que un mejor manejo del agua. Una de ellas es la expansión de los cultivos de riego intensivo, como es el de aguacate, y el otro, relacionado directamente con el primero, la deforestación de los bosques en las partes altas de la microcuenca.

Para entender como esta situación se ha desarrollado en la zona, se realizó un ejercicio de teledetección en una imagen satelital para identificar las áreas que están destinadas al cultivo de aguacate. Es importante mencionar que la imagen es de finales del año 2016 (Google Satellite), por lo que es probable que a la fecha se puedan encontrar nuevas áreas dedicadas a este cultivo. El ejercicio arrojó un aproximado de 539 hectáreas dentro del área definida de la microcuenca, que se reparten en la zona media y alta de la cuenca, estas se pueden diferenciar en la Figura 30.

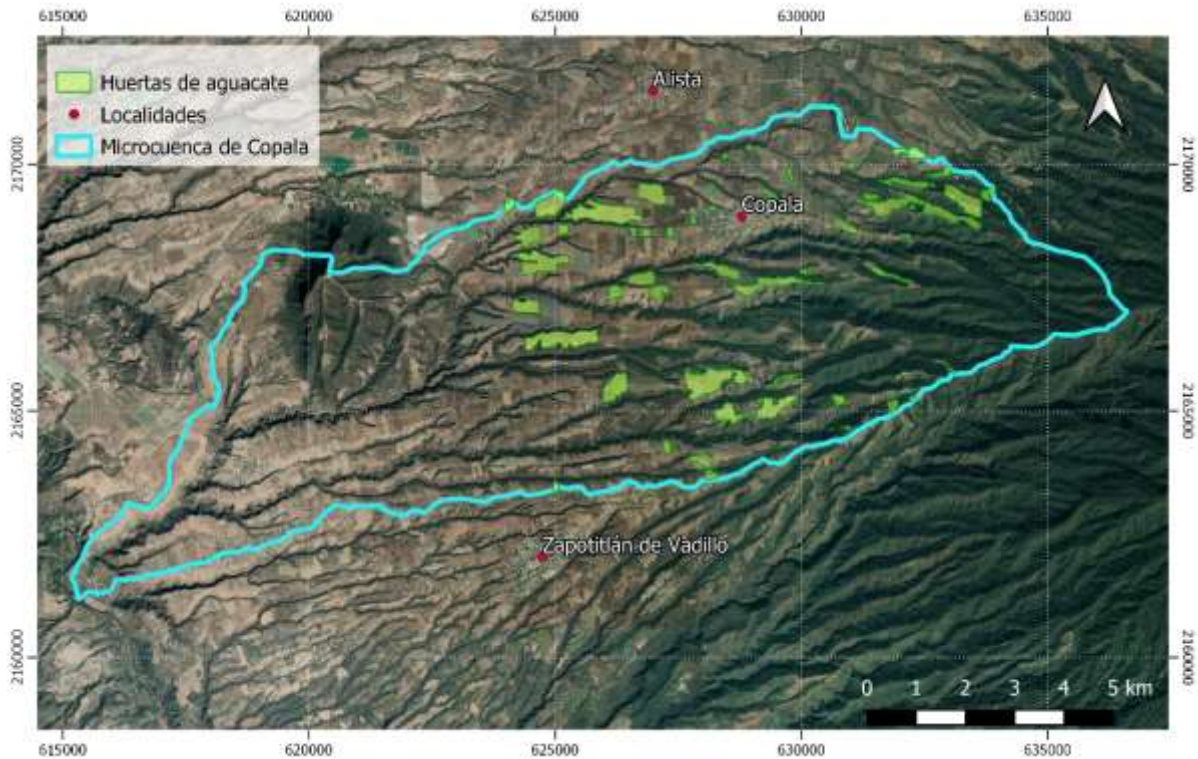


Figura 30. Cultivos de aguacate en la microcuenca de Copala (Fuente: Elaboración propia).

Para entender como ha sido la expansión de este cultivo, se revisó también el uso de suelos y la vegetación de la zona (INEGI, 2013). Esta información se basa en imágenes satelitales del año 2011 y según esta, gran parte de la zona estaba dedicada a agricultura de temporal. Las zonas de bosques de coníferas y encinos están claramente delimitadas en las faldas del volcán. Es evidente que se ha dado un cambio en la actividad agrícola, cambiando la de temporal por la de riego. Al anteponer las áreas identificadas para el cultivo de aguacate con la información de los usos de suelo, se encontró que algunas de estas invaden la zona de bosques (Figura 31).

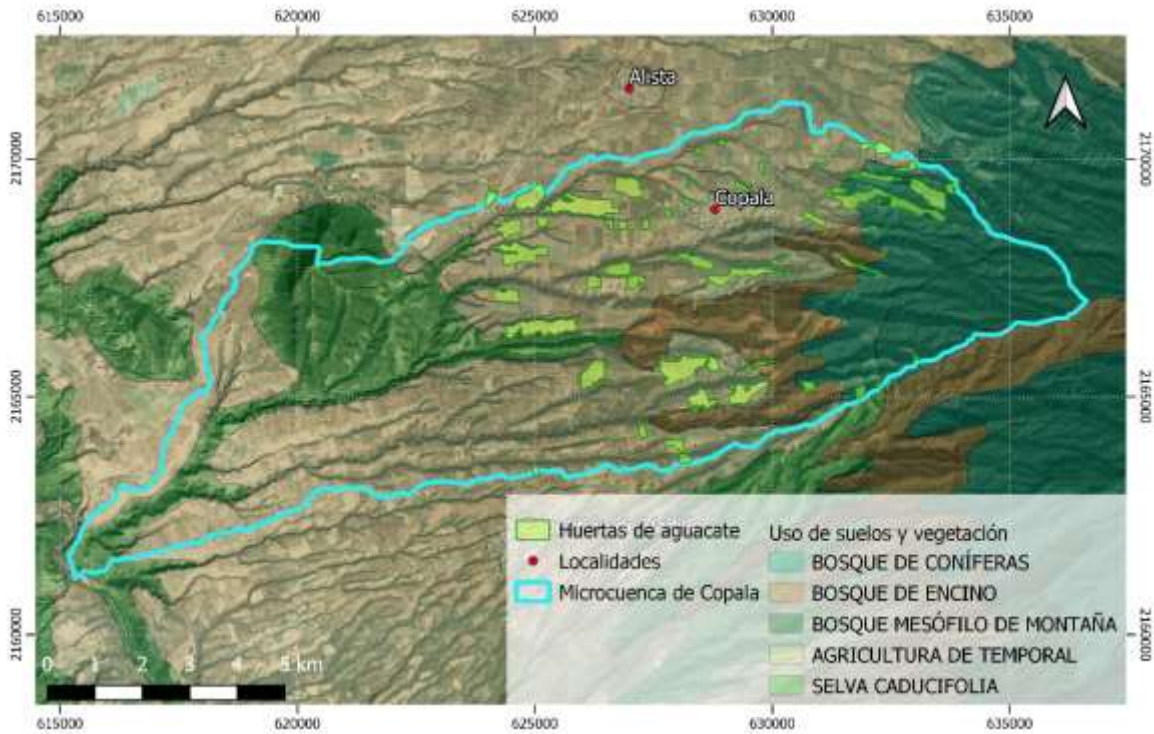


Figura 31. Usos de suelo y vegetación en la microcuenca de Copala [Fuente: Elaboración propia con información vectorial de INEGI (2013).]

9. EVALUACIÓN DE HALLAZGOS

9.1 Evaluación al diseño original de la PTARM

9.1.1 Capacidad del sistema

De los resultados obtenidos en el análisis de la documentación de la PTARM original se pueden hacer algunas observaciones sobre la ingeniería de diseño en su sistema de tratamiento. La capacidad de la planta, que se basó en las estimaciones proyectadas de crecimiento poblacional al año 2020 (2,500 habitantes) y el caudal que generarían de aguas residuales a tratar, se estableció en 3.5 L/s. De acuerdo con la información oficial, la población de Copala al año 2010 ya rebasaba esta cifra; y el crecimiento municipal en cinco años fue del 7.5% (2015) (IIEG, 2018). Por lo tanto, podemos estimar que, en la actualidad, la población de Copala ya supera los 3,000 habitantes y el caudal de aguas

residuales que generan está por arriba de la capacidad inicial instalada la cual se estima en ~ 4.2 L/s considerando un consumo promedio en el medio rural de 100-150 L/ (persona x día) (CONAGUA, 2015e; Delgado-García et al., 2017).

Por otra parte, los estudios de caracterización de la calidad del agua mostraron concentraciones altas en los valores promedio de DBO (>400 mg/L) y DQO (>1,000 mg/L). Estos niveles pueden tener su origen en la crianza y matanza de animales de traspatio, una práctica común en el pueblo. Los desechos de esta actividad se canalizan en el drenaje general que lleva a la PTARM. Mientras algunos componentes del sistema, como son los humedales de sobrenadante, cuentan con un TRH dentro de los rangos adecuados (Wood, 1995; Kadlec y Wallace, 2009), otros como el tanque séptico, se encuentran por debajo de los parámetros mínimos requeridos para asegurar su eficiencia en la remoción de la materia orgánica (CONAGUA, 2015b; OPS, 2005).

Por lo anterior se puede decir que el diseño del sistema de tratamiento general de la PTARM se encontraba desbalanceado, con un tratamiento anaerobio reducido en su capacidad. En este sentido, el añadir el FAFA como un proceso posterior al tanque séptico compensaría esta deficiencia y fortalecería una parte importante del sistema de tratamiento.

9.1.2 Tanque séptico

Como ya se mencionó, el tanque séptico fue uno de los puntos débiles detectados en el diseño original del sistema de tratamiento. No solo se encuentra por debajo de los TRH mínimos recomendados (24 hrs), sino que la capacidad del tanque séptico supera lo recomendado en algunos manuales de diseño que establecen un volumen máximo de 35,000 litros para poblaciones no mayores a 350 personas (CONAGUA 2015b; OPS 2005). En este caso es preferible dividir el flujo en dos o más tanques sépticos para evitar construir estos de un tamaño fuera de especificaciones; o buscar otras tecnologías para el tratamiento anaerobio tales como un reactor anaerobio de flujo ascendente o un filtro anaerobio de flujo ascendente (CONAGUA, 2015d).

Para facilitar la extracción de lodos biológicos y debido a la amplitud de este tanque en particular, se debieron contemplar múltiples líneas de extracción repartidas en

diferentes puntos de su base y con un diámetro mayor en sus tuberías. Para garantizar la extracción por carga hidráulica, la salida de las tuberías internas se debe mantener por lo menos 1.8 m abajo del nivel hidráulico (OPS, 2005). Estas modificaciones quedaron fuera del alcance del proyecto, por lo que será necesario incluir en el mantenimiento de la PTARM el desazolve anual del tanque séptico. El incluir entradas que facilitan el uso de camiones tipo “Vactor” para estos trabajos debe ser necesario en el diseño de este tipo de infraestructuras.

No se encontró en la literatura ninguna referencia a un sistema que utilizara un tratamiento de lodos con estas características. La tecnología es parecida a un sistema de humificación de lodos el cual es un tratamiento comprobado, sin embargo, carece de los elementos constructivos que dicho sistema requiere (Tilley *et al.*, 2014). Las descargas semanales de lodos que el proceso especifica tampoco son recomendables para un tanque séptico debido a que las extracciones frecuentes afectan el proceso de degradación (Strande *et al.*, 2018).

9.1.3 Humedales artificiales

En general, los humedales artificiales en la PTARM están diseñados para ofrecer un sistema de tratamiento robusto, con TRHs que garantizan una remoción eficiente de los contaminantes (Wood, 1995; Kadlec y Wallace, 2009). No obstante, el tamaño (área) de los humedales de sobrenadante excede las recomendaciones de diseño referentes al comportamiento hidráulico que se desarrolla dentro de un humedal, ya que se presta a formar flujos preferenciales y zonas muertas. Esto puede afectar la eficiencia del sistema de tratamiento con la que fue diseñado. Por otra parte, grandes superficies de humedales requieren de más trabajo de mantenimiento (CONAGUA, 2015).

Además, con la superficie de los dos humedales de sobrenadante, con aproximadamente 6,000 m² en total, se podría cumplir satisfactoriamente con las eficiencias de remoción requeridas por la normatividad, si estos fueran precedidos por un tratamiento primario adecuado. Esto se puede comprobar utilizando la ecuación de Kickuth (UN Habitat, 2008). Por consiguiente, se podría haber prescindido de los componentes que proceden a los humedales de sobrenadante (*i.e.* lagunas de

maduración y humedales de pulimento) en el tren de tratamiento original. Aunque estos últimos no afectan la eficiencia del sistema, existen algunas desventajas de exceder los requerimientos de área. Al disminuir los requerimientos de superficie, sin afectar la eficiencia de los procesos de tratamiento, aumenta las posibilidades de encontrar un sitio adecuado para nuevos proyectos y, sobre todo, se disminuyen los costos de inversión necesarios para construir las instalaciones (CONAGUA, 2015).

La selección de las especies que se plantaron en los humedales también repercutió en las afectaciones posteriores de la PTARM. De acuerdo con los operadores, la sustitución del carrizo por tule en los humedales de lodos fue intencional, debido a que el crecimiento del carrizo era difícil de controlar por sus tallos rígidos y la formación de rizomas difíciles de remover y complicaban las labores de mantenimiento. Por otro lado, la propagación de Tule resultó ser muy invasiva, generando grandes cantidades de follaje e incluso pasando a otros componentes como las lagunas de maduración. El uso de especies como el tule (*Typha sp.*) o el carrizo (*Phragmites sp.*) en humedales artificiales puede ser contraproducente si no existe un riguroso control en su propagación. Es preferible usar especies de menor follaje, de fácil remoción y, por ende, de menor mantenimiento (CONAGUA, 2015).

9.2 Evaluación de riesgos

Además, hay que añadir que el proceso de diseño debe considerar las amenazas que puedan existir en el contexto inmediato a la PTARM. En este caso, el predio se encuentra rodeado de parcelas donde son comunes las quemas agrícolas. Estos incendios alcanzaron los bordos de membrana provocando daños importantes a la infraestructura. La disposición de las celdas dentro del predio debe acatar ciertas medidas de mitigación de riesgos, como puede ser el mantener un perímetro libre de vegetación para evitar que las llamas se propaguen al interior.

Otro riesgo detectado fue el del saqueo. El sitio cuenta en su diseño y construcción original con una caseta equipada con servicios de luz y agua. Para esto fue necesario invertir en instalar la infraestructura eléctrica para proveer la energía necesaria, que posteriormente fue robado. Estos materiales eléctricos son comúnmente saqueados en

sitios que se encuentran alejados de las zonas urbanas. En este caso, los operadores de la PTARM son habitantes de Copala, por lo que la caseta nunca se ha utilizado. La construcción y la inversión para equipar este elemento puede ser innecesaria en ciertos contextos.

Existen otros riesgos y amenazas que son propios de las labores de mantenimiento. Los trabajos de poda y control de la vegetación dentro de los humedales deben realizarse con la herramienta adecuada, el uso de machetes provocó cortes en la membrana de los bordos. Además, en los humedales suelen habitar fauna que pone en riesgo la salud de los operadores, como pueden ser serpientes e insectos venenosos. Por lo mismo, se debe proveer el equipo adecuado y tener un protocolo de primeros auxilios en caso de ser necesario.

9.3 Evaluación de la etapa de construcción

Los errores que se detectaron que ocurrieron durante el proceso constructivo de la PTRAM original fueron la causa de que después de un tiempo ésta presentara problemas en su operación. Esto se debe en gran medida, a: 1) Limitaciones en la descripción técnica de los planos constructivos; 2) Errores en la interpretación de los planos constructivos por parte de los responsables de la obra de construcción; y 3) Falta de supervisión por parte de los responsables del diseño e ingeniería de la PTARM. Esta situación se podría haber evitado con la supervisión directa por parte de los diseñadores en obra durante el proceso constructivos, sin embargo, las evidencias muestran que no existió una comunicación efectiva entre las partes.

Las conexiones faltantes afectaron notablemente el funcionamiento del sistema. Al no existir una división de flujos después del tanque séptico (sistema "A" y "B") la eficiencia y los TRH de los componentes posteriores se redujo a la mitad. Sumado a esto, el iniciar la secuencia de procesos en el humedal de lodos, también disminuyó considerablemente la eficiencia de tratamiento, ya que, al mezclarse el flujo de sobrenadante con las descargas del interior del tanque se anulaba el proceso del tanque séptico. Esta situación también contribuyó a que se arrastraran los sólidos finos que llevaron a la

colmatación del humedal de sobrenadante; un problema común los humedales artificiales (CONAGUA, 2015; Kadlec y Wallace, 2009; Tilley *et al.*, 2014).

Otro detalle que demuestra los errores cometidos en obra fueron los vertederos rotos que controlaban el nivel hidráulico de los componentes del sistema; un elemento indispensable en la operación de la PTARM. Por otra parte, la elección de materiales de baja calidad, como la tubería sanitaria, se vio reflejada en su corta durabilidad. Estas decisiones pueden responder a que se buscó una reducción en los costos de obra; en este aspecto, la falta de material de relleno en el humedal de sobrenadante puede deberse a ese mismo motivo.

Algunas de las instalaciones faltantes que tiene la PTARM, se deben también a obstáculos administrativos que sucedieron durante la obra. De acuerdo con el testimonio de los operadores, durante el proceso de construcción, el proyecto se vio pausado en su etapa final, durante el cambio de administraciones municipales. Esto impidió que las obras concluyeran de acuerdo con el programa planteado. Los problemas que surgen como resultado de los periodos relativamente cortos en los municipios de México ya han sido mencionados por otros autores (Noyola *et al.*, 2013; de Anda Sánchez, 2017).

9.4 Evaluación al proyecto de rehabilitación y reconversión

9.4.1 Desarrollo del proyecto y ejecución de las obras

Aunque existieron limitantes económicas para el desarrollo del proyecto, la propuesta presentada se enfocó en intervenir los componentes estrictamente esenciales para un funcionamiento básico del sistema de tratamiento considerando las importantes limitaciones en el presupuesto. Las decisiones tomadas sobre qué componente del sistema intervenir y cuales dejar fuera del proyecto, proceden a un proceso previo de evaluación de su integridad física. La diferencia de daños entre algunos componentes puede significar un cambio importante en los costos del proyecto.

La corrección de las fallas detectadas, como la conexión directa entre el humedal y el efluente del tanque séptico, pretende lograr una importante mejora en las funciones

generales del sistema de tratamiento. Para continuar con la secuencia original, se realizó la conexión del humedal de sobrenadante “B” a la laguna de maduración “A”. Esta decisión aprovecho la integridad de este componente y evitó los costos de rehabilitar su contraparte del sistema “B”. A pesar de que en la tecnología seleccionada no se contempla un tratamiento posterior después de los humedales artificiales, el añadir el uso de lagunas de estabilización es una combinación de procesos aceptada y de eficiencia comprobada (CONAGUA, 2015)

Los hallazgos sobre el estado de algunos componentes, que se revelaron con el avance de las obras, representaron un problema en la administración de la obra pues modificaron la planificación del proyecto inicial y los costos contemplados para el mismo. De tal forma que se debe fortalecer el proceso de diagnóstico para evitar encontrar más adelante situaciones que no se contemplen desde un inicio. Es necesario invertir recursos en los trabajos necesarios para explorar lo que no se puede observar a simple vista. Esto puede implicar realizar excavaciones para revisar trayectorias ocultas de tuberías o la limpieza de un área de vegetación para verificar el estado del material de relleno de un humedal.

Por lo anterior, el atender el problema de colmatación detectado en el humedal requirió buscar soluciones viables dadas las limitaciones de tiempo y presupuesto del proyecto. Esta situación afecta los flujos internos del agua y baja el rendimiento general del sistema de tratamiento del humedal (CONAGUA, 2015; UN Habitat, 2008); comprometiendo los resultados esperados en cuanto a la calidad del agua tratada. Idealmente, se debe sustituir por completo con nuevo material de relleno considerando la granulometría correcta especificada en la tecnología base seleccionada para este proyecto. En este caso, el volumen total de material, al tratarse de un humedal de 3,000 m², hacía inviable una sustitución total del material por cuestiones de costo. La construcción de zanjas de infiltración fue una solución práctica para mejorar esta problemática, sin embargo, no se puede esperar un flujo óptimo debido a las condiciones del material existente.

Una desventaja de haber trabajado con el material existente es que se perdió el control de las capas que conforman el relleno del humedal. La limpieza de la vegetación

y la excavación de zanjas revolvió el material y su granulometría. En este aspecto, la estrategia establecida fue recuperar al máximo posible la funcionalidad del humedal haciendo uso de la máxima cantidad de material de relleno existente.

La decisión de replantar el humedal con la especie *Canna Indica* L., conocida localmente como platanillo, fue parte de la reconversión tecnológica del humedal. Esta especie ha sido utilizada por la tecnología de humedales artificiales del CIATEJ y su eficiencia en la remoción de nutrientes en este tipo de sistemas de tratamiento está comprobada por otros autores (Lihua *et al.*, 2010; Torres Bojorges *et al.*, 2017; Sandoval *et al.*, 2019). Asimismo, genera una menor cantidad de follaje y su valor estético, debido a su floración, mejora visualmente las instalaciones. La selección de la especie correcta puede mejorar notablemente los trabajos de mantenimiento y renovar el aspecto general de las instalaciones.

En el humedal de lodos, la reconversión tecnológica se vio limitada por la infraestructura existente. La opción más viable fue manejar el tratamiento de lodos en un lecho de secado; aunque este proceso requiere un manejo posterior para su disposición segura (CONAGUA, 2015a, Tilley *et al.*, 2014). Los escurrimientos que resultan de la deshidratación de los lodos biológicos (*i.e.* lixiviados), contienen una alta carga orgánica, y es conveniente volverlos a introducir al inicio del sistema de tratamiento. No obstante, esta posibilidad se pierde en un sistema que fluye por gravedad ya que sería necesario su captación en un cárcamo con un bombeo posterior. Sin embargo, las cantidades generadas de estos lixiviados son mínimas comparadas con el flujo regular de tratamiento de la planta por lo que se decidió que éstos se diluyeran con el flujo del sobrenadante que ingresa al humedal artificial para su fitodepuración.

Para la reparación de los daños en la membrana de las celdas que conforman el humedal de sobrenadante y el de lodos se partió del supuesto de que la base de las celdas, bajo el material de relleno, se encontraba en buen estado. En los bordos de la celda se sustituyeron secciones completas dañadas, y parcharon perforaciones puntuales; enfocándose en aquellas que se encontraban cercanas al nivel hidráulico para evitar infiltraciones de agua. Se descartaron cualquier daño en un nivel superior, salvo que representara un riesgo para la estructura y sostén de la instalación en conjunto. En

una segunda etapa se tiene contemplado el construir un pozo de observación cercano en un punto bajo del nivel del humedal con la finalidad de verificar que las aguas residuales no se estén infiltrando a través de alguna perforación no detectada en el fondo de la membrana plástica que contiene el humedal (CONAGUA, 2007a).

Una característica en el diseño y construcción de los humedales artificiales, que protegió la integridad de la membrana en el fondo y permitió los trabajos con maquinaria pesada, fue la capa base de arcilla. Para conformar esta capa base también puede utilizarse arena (CONAGUA, 2015). El haber trabajado con máquinas redujo los tiempos y costos del proyecto que de otra forma requerido muchas horas hombre, además, los trabajos de la limpieza de Tule requerían de medios mecánicos para la extracción desde la raíz, ya que es un trabajo que sobrepasa la fuerza manual de una persona.

En cuanto a los trabajos de desazolve en el tanque séptico, estos muestran que la acumulación de lodos biológicos es un problema que no debe ignorarse, especialmente en tanques de grandes dimensiones. Los lodos con el tiempo comienzan a compactarse y su remoción se dificulta. Cuando esto sucede, es necesario utilizar maquinaria especializada, con la que difícilmente cuentan los municipios en zonas rurales. Además, los costos de un trabajo de este tipo pueden representar un gasto importante en el presupuesto de mantenimiento de la PTARM.

Como ya se mencionó, algunos componentes del sistema se descartaron pues su intervención no era prioritaria para el funcionamiento básico de la PTARM. La fosa de secado de lodos no cumplía su propósito pues no tenía un sistema para drenar los lixiviados, además, al encontrarse enterrada, dificultaba las labores de extracción. Otro elemento que se omitió del proyecto de rehabilitación fue la caja de bifurcación, ya que esta fue construida incorrectamente y para esta primera etapa era innecesario, pues no habría división del flujo de sobrenadante.

Finalmente, es importante mencionar que una gran parte del tiempo que tomaron las obras de reconversión y rehabilitación de la PTARM se tuvo que desviar el ingreso de las aguas residuales provenientes del pueblo hacia un arroyo tributario del río Ayuquila con la finalidad de realizar las obras comprometidas. Esto se llevó a cabo mediante la instalación de una válvula de desvío en el registro de aguas residuales previo al ingreso

a la PTRAM. Evidentemente, estas descargas tienen un impacto ambiental temporal que no podía evitarse. La estrategia que se debe seguir en esta situación es minimizar los tiempos de ejecución de las obras para no prolongar de más las descargas de aguas residuales crudas al arroyo.

9.4.2 Eficiencia esperada del sistema propuesto

La revisión de la eficiencia del nuevo sistema de tratamiento implementado en el proyecto de rehabilitación y reconversión tecnológica de la PTARM toma en cuenta las características del afluente de las aguas residuales crudas, las cuales ya fueron presentadas anteriormente. Se descartaron los cálculos para los metales pesados ya que estos se encuentran en niveles muy bajos y no representan un impedimento para cumplir con la norma de descarga (ver Tabla 6). El caudal considerado para este ejercicio es el que previamente se estableció en 4.2 L/s.

De acuerdo con Chernicharo (2006), la eficiencia de remoción de la DBO en un tanque séptico puede estar entre un 35 – 60%. Cisneros (2011) menciona que la eficiencia de remoción de materia orgánica y de los sólidos suspendidos se encuentra cercana al 50%, con un TRH de 2 a 4 días. Por otra parte, la USEPA (2002) indica que el porcentaje de remoción de sólidos sedimentables, así como grasas, aceites y otros residuos flotantes, va de un 60 a un 80%; y la eficiencia de remoción de la DBO de un 30 a un 50%. En la planta de tratamiento de CIATEJ, el tanque séptico, con un TRH de 2.45 días, remueve en un 61% la DBO, 50% la DQO, 55% los SST, 67% las grasas y aceites (de Anda *et al.*, 2018). La remoción de fósforo total (PT), en un 20-30% (Lowe, 2007), y nitrógeno total (NT) en un 10% (Washington State Department of Health, 2014), sucede cuando se remueven los lodos que se acumulan al interior del tanque.

Sin embargo, el tanque séptico (TS) de la PTARM opera con un TRH menor a los ejemplos citados, con solamente 18.5 horas. Es de esperarse que la eficiencia de los procesos de tratamiento de este elemento se encuentre en los rangos bajos antes mencionados. Si a esto sumamos que el agua residual a tratar contiene altos niveles de carga orgánica; se vuelve indispensable reforzar el tratamiento anaerobio del sistema con el FAFA que será construido en una segunda etapa.

Según Chernicharo (2006), la eficiencia de remoción de DBO de un FAFA precedido por un tanque séptico aumenta a un 75 – 85%. De acuerdo con los resultados obtenidos en la planta de tratamiento de CIATEJ, a la salida del FAFA se registró una reducción en los niveles de DBO de 85%, DQO de 71%, SST de 77%, 21% del NT y un 25% del PT. Esto se consiguió con un TRH de 6.4 días (de Anda *et al.*, 2018). No obstante, se reportan eficiencias de remoción similares en la DQO con un TRH de solo 4 a 8 horas (Chernicharo, 2006). En la Tabla 8 se hace una comparativa entre los niveles registrados en el afluente y su disminución a la salida del TS (con una baja eficiencia), y las mejoras que podrían esperarse una vez instalado el FAFA.

Tabla 8. Comparativa de efluentes esperados en el TS y FAFA en la PTARM de Copala, Tolimán (Fuente: Elaboración propia).

Parámetro	Afluente	Efluente TS	Efluente FAFA
DBO (mg/L)	428.3	257(40%)	51.4 (80%)
DQO (mg/L)	1344	806.4 (40%)	241.9 (70%)
SST (mg/L)	356.7	214 (40%)	53.5 (75%)
NT	76.5	68.8 (10%)	55 (20%)
PT	15	12 (20%)	9 (25%)

El humedal de flujo subsuperficial, de una superficie aproximada de 3000 m², operando en circunstancias óptimas, tendría un TRH aproximado de 2.5 días, el cual se encuentra dentro de los tiempos adecuados para su operación (Wood, 1995; Kadlec y Wallace, 2009). Las eficiencias de remoción reportadas para el humedal de CIATEJ son del 68% en DBO, 81% en DQO, 55% en SST, un 44% en NT y un 21% en PT (de Anda *et al.*, 2018). Esto concuerda con lo documentado en el uso de procesos anaerobios eficientes seguidos por este tipo de humedales artificiales, con una remoción de la DQO de un 79 a 85% y de 48 a 71% en SST. Se reportó una alta remoción de fósforo, sin embargo, la de nitrógeno solamente fue parcial (Chernicharo, 2006). Sin embargo, no se puede considerar una eficiencia similar en un humedal como este, ya que no cuenta con todos los elementos de la tecnología seleccionada, por lo que se suponen eficiencias menores a las reportadas como referencia (Tabla 9).

Por lo tanto, se pueden suponer dos casos para el efluente del humedal artificial de la PTAR, en los que se utilizan los datos de la Tabla 7. Los resultados esperados para esta primera etapa de la rehabilitación (E1) utilizan los parámetros del efluente del TS; mientras que los resultados de la segunda etapa (E2) utilizan los parámetros del efluente del FAFA y mayores porcentajes de remoción para el humedal, ya que se contempla la reconstrucción completa del segundo humedal de sobrenadante como parte de la segunda etapa del proyecto. Ambos casos se reportan en la Tabla 9.

Tabla 9. Comparativa de efluentes esperados en la E1 y E2 en la PTARM de Copala, Tolimán (Fuente: Elaboración propia).

Parámetro	Efluente Humedal (E1)	Efluente Humedal (E2)
DBO (mg/L)	128.5 (50%)	18 (65%)
DQO (mg/L)	282.2 (65%)	48.4 (80%)
SST (mg/L)	117.7 (45 %)	26.7 (50 %)
NT	48.2 (30%)	33 (40%)
PT	10.8 (10%)	7.2 (20%)

Si observamos estos resultados, la E1 ofrece un agua tratada que cumple con la normatividad (NOM -001- SEMARNAT-1996) para su uso en riego agrícola y la E2 puede cumplir con los parámetros definidos para la protección de la vida acuática, a excepción de los niveles de NT y PT. En el caso de los coliformes fecales, la operación adecuada de estos sistemas de tratamiento asegura una remoción igual o mayor al 99.9% de estos y otros patógenos (Chernicharo, 2006; de Anda *et al.*, 2018); sin embargo, esto no garantiza cumplir con la norma en el efluente de salida del humedal (1000 NMP/100 mL en promedio mensual). El paso por la laguna de maduración y por el humedal de pulimento pueden ayudar a que estos sigan reduciendo, pero se propone el uso de algún método de desinfección como el uso de un sistema de cloración o lámparas UV.

9.5 Proceso de arranque y seguimiento de operación

El arranque de la operación de la PTARM inició con la reapertura del flujo, y con esto una serie de actividades que se deben realizar como parte de las labores de

mantenimiento para que el sistema alcance su mayor eficiencia posible. A partir de la entrega de las obras de rehabilitación, la responsabilidad de dar un seguimiento a la operación y mantenimiento pasa a manos del municipio, y es de gran importancia cumplir con las indicaciones que se mencionan en esta sección para garantizar el buen funcionamiento de la PTARM. Además, las autoridades del municipio deberán vigilar que sean únicamente aguas residuales domésticas las que se descarguen a la red de alcantarillado municipal y cualquier otra descarga no doméstica (por ejemplo, residuos de matanza de animales) deberá cumplir con la norma oficial mexicana NOM-002-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado (SEMARNAT, 2012).

La entrega de la primera etapa del proyecto de rehabilitación va acompañada de una capacitación a los operadores y la entrega de un manual de operación. A pesar de que la PTARM conserva la mayoría de los componentes originales de su sistema de tratamiento, se ha rediseñado por completo la operación del tanque séptico, del humedal y del sistema de disposición de lodos del tanque séptico, por lo que las nuevas condiciones de operación del sistema pretenden evitar los errores detectados en un inicio. Estas actividades se presentan a continuación y se dividen por componentes del sistema.

9.5.1 Control de flujo de ingreso

El flujo de entrada a la PTARM se controla mediante la válvula de compuerta instalada en un registro localizado en el exterior. Al cerrar la válvula, el agua se desvía al barranco cercano. El cierre de flujo de entrada solamente se justifica cuando se tengan que hacer trabajos de desazolve para el tanque séptico o del canal de desbaste (unidad de pretratamiento). Este cierre no debe prolongarse más de lo necesario debido a que las descargas de agua cruda en el barranco tienen un impacto negativo en el medio ambiente.

9.5.2 Canal de desbaste

Los sólidos separados a través de las rejillas en el canal de desbaste se deben retirar con cuidado y no permitir que estas se saturen, los sólidos se deben dejar secar en las charolas, que cuentan con perforaciones para que escurra el agua. La limpieza de las rejillas es una labor que deberá hacerse mínimo una vez al día. La limpieza se realiza de forma manual con la ayuda de un rastrillo y una pala. Los residuos se pueden depositar en un cubo de 20 litros o similar con la finalidad de disponerlos posteriormente como residuo sólido no peligroso en el vertedero municipal.

Normalmente los residuos sólidos capturados en las rejillas no están clasificados como peligrosos o que representen un riesgo para la salud; de acuerdo con la NOM-052-SEMARNAT-2005. Sin embargo, el operario designado para esta labor en la planta deberá tener un mínimo de precaución en su manejo. Para ello deberá portar cubrebocas desechable, lentes de seguridad, guantes y botas de hule a fin de realizar las maniobras de retiro de los sólidos capturados en la rejilla.

El desazolve de arenas en los canales desarenadores se debe de hacer mínimo una vez cada semana, para esto se debe cerrar la compuerta del canal que se va a limpiar y dejar las compuertas del otro canal abiertas para permitir que el flujo siga corriendo. La limpieza se debe hacer manualmente utilizando una pala para remover las arenas y una carretilla para transportarlas y descargarlas en el lecho de secado.

Por otra parte, el tanque de amortiguamiento del canal de desbaste (primera sección antes de las rejillas) también debe limpiarse, sin embargo, la profundidad de esta sección dificulta que se hagan los trabajos manualmente. Esta limpieza deberá complementarse con el apoyo de un camión Vactor. Los lodos que resulten de esta limpieza se pueden depositar en el lecho de secado de lodos.

9.5.3 Tanque séptico

La extracción de lodos en el tanque séptico, con la apertura de las válvulas en la línea de extracción, debe realizarse periódicamente. Se recomienda que las descargas de lodos se realicen una vez por mes, después de revisar los niveles de lodos en el interior

con una pértiga que se introduce hasta el fondo del tanque séptico. La señal que dejan los lodos en la pértiga es el indicativo de la altura que tienen los lodos y se podrá decidir si es necesario descargar el excedente (OPS, 2005a). La línea de extracción de lodos del tanque séptico debe mantenerse libre de obstrucciones. Para este propósito hay un registro (con tapón roscable) en la tubería que sale del tanque séptico. Por esta se puede introducir una sonda de acero para destapar la entrada de lodos de la tubería al interior del tanque.

Con la extracción mensual por medio de la línea de extracción se busca evitar la saturación de lodos biológicos, sin embargo, es importante señalar que, por la amplitud del tanque, no se podrá extraer todos los lodos que se acumulen en su interior con el uso de las tuberías de extracción. Por lo tanto, se debe contemplar el uso de camiones Vector para su desazolve completo mínimo una vez al año (OPS, 2005). Es importante señalar que, no se deberán extraer la totalidad de los lodos que se acumulen, ya que esto desestabiliza por completo el sistema de digestión anaerobia del tanque séptico (de Anda *et al.*, 2018). Se recomienda dejar una capa de lodos de 20 a 30 cm de espesor en la parte más profunda de la base para favorecer los procesos de tratamiento del tanque séptico.

9.5.4 Lecho de secado de lodos

Las descargas de lodos biológicos que provienen del tanque séptico, ya sea por su extracción por medio de la tubería interior o con el camión Vector; así como las descargas generadas por el desazolve del canal de desbaste (tanque de amortiguamiento y canales desarenadores), se depositarán en el lecho de secado de lodos. El lecho de secado de lodos permite la deshidratación de los lodos biológicos al sol, y el drenado de los lixiviados a través de su base de tezontle. Sin embargo, es importante mencionar que los lodos deshidratados no se han estabilizado y requieren ser composteados para su reutilización segura como material mejorador de suelos (CONAGUA, 2015a; Tilley *et al.*, 2014).

Los lodos biológicos o biosólidos retirados de forma periódica del tanque séptico están clasificados como residuos peligrosos de acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-

2002, por lo que pueden representar un riesgo para la salud. Es por ello que el operario de la planta deberá portar cubrebocas desechable, lentes de seguridad, guantes y botas de hule para realizar las maniobras de separación de los lodos biológicos que se descarguen en el lecho de secado.

Una vez que se acumule una cantidad suficiente de lodos deshidratados sobre el lecho de secado, será necesario removerlos para su disposición en un sitio designado para su composteo posterior. En este caso se recomienda utilizar maquinaria tipo bobcat y camión de carga para facilitar los trabajos. Se recomienda limpiar el lecho de secado una vez cada año durante la temporada de estiaje (temporada de secas). Durante la temporada de lluvias será normal observar el crecimiento de vegetación nativa, por lo que es necesario mantener el lecho libre de malezas y registrar los días de limpieza del lecho en la bitácora de mantenimiento.

9.5.5 Humedal de sobrenadante

Para mantener controlada la vegetación en el humedal artificial es necesario retirar periódicamente tanto la hoja como la flor que se produce a fin de controlar el volumen del follaje y evitar la contaminación del agua que pasa por debajo de la superficie del humedal debido a la descomposición de este material directamente sobre el lecho del humedal. La velocidad de producción de flor y hojas depende del clima y altitud de lugar (CONAGUA, 2015), por lo que solamente la experiencia que se vaya adquiriendo por los operarios de la planta de tratamiento puede establecer el periodo de frecuencia con la que se deba realizar las podas. Las podas deben realizarse cuidadosamente, y evitar el uso de machetes, sobre todo en las orillas pegados al bordo de la geomembrana, para evitar daños a la misma. La frecuencia de las podas se debe registrar en la bitácora de la PTARM.

El humedal de la PTARM se entrega con una tercera parte de su superficie cubierta con plantas, por lo que, parte de las labores que se deben realizar en un principio será el trasplante de los hijuelos a las partes no plantadas del humedal, hasta lograr cubrir toda la superficie del humedal. Las zonas cercanas a la tubería de distribución (inicio) y la tubería de recolección (final) se deben dejar libres de plantas para evitar que estas

bloqueen las tuberías. El trasplante de hijuelos se realizará en un arreglo denominado tresbolillo (de Anda *et al.*, 2018) cuidando dejar una distancia de 1 m entre las plantas (Figura 32).

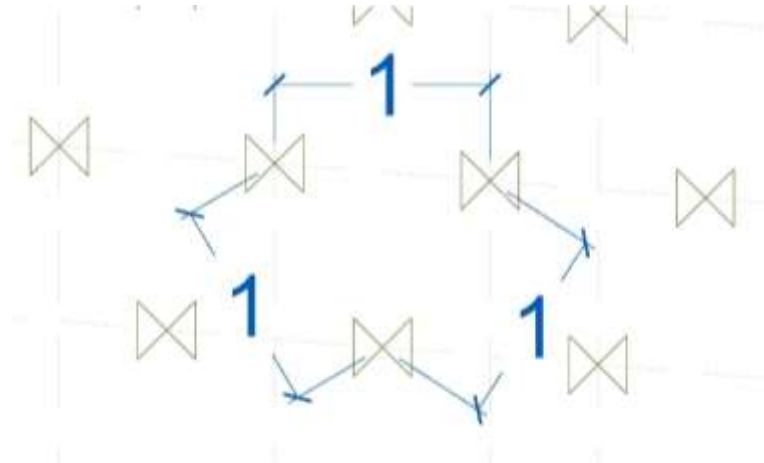


Figura 32. Acomodo de las plantas del humedal en arreglo tresbolillo (Fuente: Planos del proyecto de rehabilitación).

Por otra parte, se debe verificar cada día que los orificios del tubo perforado o flauta que distribuye el agua al ingreso del humedal artificial no estén obstruidos por sólidos o material externo al proceso que pudieran obstruir la salida del agua (CONAGUA, 2015; UN Habitat, 2008). En caso de que esto suceda se deberán destapar los orificios de forma manual o con la ayuda de herramienta apropiada para asegurar el flujo uniforme del agua. Si se llegarán a juntar demasiados sólidos dentro de la tubería se instaló al final de la tubería un tapón roscable para vaciar el interior del tubo de distribución. De igual manera, para evitar que la tubería de recolección se sature de sólidos finos, si instaló en un extremo una tubería con tapón roscable que sobresale de la superficie del relleno. Por este extremo se puede ingresar una sonda para destapar la tubería o introducir agua a presión para arrastrar los sólidos sedimentados en su interior hacia el depósito en la caja de paso.

El humedal cuenta con una capacidad máxima de salida y durante el temporal de lluvias esta capacidad se ve rebasada. Esto se debe a que gran parte de los drenajes pluviales del poblado se encuentran conectados a la red sanitaria Se han detectado flujos de ingreso cercanos a los 7 L/s, lo que forzosamente provoca que el nivel de agua dentro

del humedal rebase el nivel del material filtrante y por este motivo se pueden crear encharcamientos en la superficie de este. Es necesario realizar la segunda etapa del proyecto para la rehabilitación de todo el sistema, y con esto duplicar la capacidad de flujo a tratar para absorber los sobre flujos entre ambos humedales.

9.5.6 Resto de la PTARM

Para los demás componentes que forman parte del sistema de tratamiento, se hacen recomendaciones mínimas para preservar su funcionalidad. El mantenimiento de la laguna de maduración es prácticamente es nulo. Se debe verificar que el flujo de agua corra por este componente sin obstrucción alguna y mantener libre de vegetación, cuidando la integridad de la geomembrana que contiene el agua. En el caso del humedal de pulimento, de igual forma que con el humedal de sobrenadante, se deben realizar podas periódicas para mantener el crecimiento controlado de la vegetación y retirar el follaje seco de su superficie.

En el reservorio de agua tratada se debe verificar que el flujo de agua corra por este componente sin obstrucción alguna. Se debe mantener libre de vegetación y cuidar la integridad de la geomembrana que contiene el agua. La toma de muestras de agua para su posterior análisis en el laboratorio se obtiene de este componente. Por último, se debe realizar una limpieza general del follaje seco en el resto de los componentes que quedaron fuera de funcionamiento en el nuevo sistema de tratamiento de la PTARM.

9.5.7 Mitigación de riesgos

Los trabajos de mantenimiento también deben considerar las amenazas que puedan existir en el contexto inmediato a la PTARM. En este caso, el predio se encuentra rodeado de parcelas donde son comunes las quemas agrícolas. Estos incendios, en el pasado, alcanzaron los bordos de membrana provocando daños importantes a la geomembrana de plástico. Para evitar que ocurran daños en las celdas de los humedales y demás componentes de la PTARM se debe dejar en el exterior un espacio de aproximadamente 5 metros libre de vegetación y follaje seco y asimismo evitar el crecimiento de plantas en las cercanías de la malla perimetral de la PTARM. Este trabajo

se debe realizar con cierta frecuencia particularmente durante el estiaje (temporada de secas).

Existen otros riesgos y amenazas que son propios de las labores de mantenimiento. Por ejemplo, en los humedales suelen habitar fauna, como serpientes o insectos venenosos que pueden poner en riesgo a los operarios (CONAGUA, 2015). Por lo mismo, se debe proveer el equipo de protección adecuado para garantizar la integridad física de los operadores y tener un botiquín de primeros auxilios disponible.

Otro riesgo detectado fue el del saqueo, un problema común en sitios que se encuentran alejados de las zonas urbanas. El sitio cuenta en su diseño y construcción original con una caseta. Las herramientas de trabajo y otros materiales que puedan ser sustraídos ilegalmente del sitio se deben resguardar en la caseta y asegurar la misma mediante candados de seguridad.

9.5.8 Monitoreo del agua residual tratada

Tras completar los trabajos del proyecto de rehabilitación de la PTARM, los resultados esperados en cuanto a la calidad del agua se verán reflejados pasando un tiempo de iniciada su operación. Se recomienda empezar a monitorear la calidad del agua tratada a los tres meses de haber iniciado su operación, cuando los procesos de tratamiento de cada componente biológico del sistema se hayan estabilizado (de Anda *et al.*, 2018). Aunque algunos autores mencionan un tiempo mucho más largo para establecer la digestión anaerobia en el caso del tanque séptico (CONAGUA, 2015b).

El dejar correr el flujo durante este tiempo en el humedal artificial ayudará a que se arrastren las partículas finas que normalmente se encuentran en el material del lecho del humedal, y de esta manera se espera que la calidad del agua mejore con el paso del tiempo. Sumado a esto, se debe completar la plantación de toda la superficie del humedal para que la presencia de las plantas mejore la remoción de los nutrientes (de Anda-Sánchez, comunicación personal, 2020, junio 01).

Lo mencionado anteriormente se ve reflejado en los resultados obtenidos en los estudios iniciales sobre la calidad del agua en diferentes puntos de la PTARM, realizados

un par de semanas después de haber realizado el último desazolve al tanque séptico. El muestreo se realizó en temporada de lluvias, por lo que se debe considerar esta variante en la interpretación de los resultados. Las muestras corresponden a cuatro etapas del sistema de tratamiento; la entrada del flujo en el canal de desbaste (*i.e.* agua cruda), la salida del tanque séptico, la salida del humedal de sobrenadante y la entrada al reservorio de agua tratada.

Se realizaron pruebas rápidas para obtener el pH y la turbidez de las muestras; del primero se obtuvieron resultados que se encuentran dentro de los rangos establecidos (promedio de 7.5) para las aguas residuales municipales (CONAGUA, 2015a). La turbidez muestra una reducción general del 70% (501-144) en todo el sistema, siendo el tanque séptico el punto en el cual se vio una mayor reducción (46%). Este parámetro sirve como referencia para determinar los sólidos suspendidos en el agua (Secretaría de economía, 2001).

Las pruebas a la muestra del agua cruda, bajo el indicador DQO, dieron como resultado (1354 mg/L) un agua residual de ingreso fuertemente contaminada (CONAGUA, 2015a). Después de pasar por el tanque séptico hubo una reducción mínima del 16.5% (1130 mg/L), esto se debe en parte al TRH insuficiente, que disminuye aún más con el incremento del caudal debido a las lluvias; y la falta de un proceso anaerobio maduro debido a la reciente limpieza del tanque. La muestra a la salida del humedal tuvo una reducción similar del 17.5% (932 mg/L) con respecto a la salida del tanque séptico, la cual está muy por debajo de la eficiencia de reducción esperada, que debería estar cercana al 80% (de Anda *et al.*, 2018; Chernicharo, 2006). Al igual que en el tanque séptico, el incremento de caudal afecta la eficiencia de este componente, adicionalmente el humedal debe estar sembrado en su totalidad para obtener la mayor eficiencia de remoción posible. Sin embargo, no se puede ignorar el hecho de que el material filtrante de este humedal no cuenta con los criterios de diseño establecidos por la tecnología CIATEJ, en términos de granulometría y saturación, por lo que es posible que no se alcance las eficiencias reportadas anteriormente.

En el último punto de muestreo, la entrada al reservorio de agua tratada, se obtuvo un valor de DQO de 773 mg/L, lo que significa una reducción del 17% en las últimas

etapas del sistema, la laguna de maduración y el humedal de pulimento, con respecto a los valores de la salida del humedal. En total, el agua residual, desde su entrada hasta la salida del sistema de tratamiento, tuvo una reducción de la DQO del 46%. A pesar de que la normatividad vigente (NOM-001-SEMARNAT-1996) no especifica los límites permisibles de DQO para las descargas de aguas residuales tratadas, el proyecto de modificación a está (SEMARNAT, 2017) si establece los valores de DQO a cumplir. De acuerdo con esta última, los promedios mensuales de DQO no deben exceder los 150 mg/L para las descargas a ríos o arroyos; como es el caso de la PTARM de Copala, Tolimán.

Por lo anterior, es evidente que, al momento de realizar las pruebas preliminares de calidad del agua, el sistema de tratamiento se encuentra aún en proceso de estabilización. Sin embargo, se espera que la eficiencia de algunos componentes tenga una mejora importante conforme se dé el seguimiento a las indicaciones hechas para su operación y mantenimiento; y con la maduración y estabilización de la biomasa en el proceso anaerobio y en el humedal artificial.

9.6 Aprovechamiento del agua residual tratada

De acuerdo con lo observado, la expansión del cultivo de aguacate es una de las mayores amenazas a la seguridad hídrica en el territorio; tan solo en el área delimitada por la microcuenca de Copala, encontramos más del doble de hectáreas de las que supone el estudio del CCMSS para todo el municipio (CCMSS, 2018). Esto ha traído consigo un cambio importante en la demanda de los recursos hídricos en la zona. De acuerdo con algunas entrevistas, los agricultores disponen de agua de primer uso con la compra de pipas directamente a los operadores del sistema de agua potable, SAPAC, quien ha adquirido cierta autonomía del municipio para administrar los recursos de la zona.

Según los rendimientos estimados para el cultivo de aguacate con riego, una hectárea de aguacate produce en promedio 13 toneladas de producto al año (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura, 2007). El consumo de agua en riego para el cultivo de aguacate, calculado en metros cúbicos por tonelada producida, es de 283

m³/ton (Mekonnen y Hoekstra, 2011). De las 539 hectáreas de cultivo de aguacate detectadas en el área de la microcuenca, no se ha podido determinar cuántas de estas son de riego y cuantas de temporal. Sin embargo, si consideramos que solo una cuarta parte de estas cuentan con infraestructura de riego, tendríamos una demanda de casi medio millón de m³ al año.

La PTARM de Copala, con su caudal de entrada recalculado a 4.2 L/s, puede proveer 362.9 m³ de agua tratada al día. Esto equivale a 132,451.2 m³ al año. Algunas estrategias que podrían implementarse para aprovechar este recuso son:

- Incrementar la capacidad de almacenamiento de la PTARM.
- La venta de agua tratada a bajo costo a los agricultores de la zona por medio de pipas. El control de las pipas y de los recursos obtenidos debe pasar a manos del municipio. Los recursos obtenidos pueden utilizarse para financiar nuevos proyectos de infraestructura para beneficio de los habitantes
- Canalizar el flujo de aguas tratadas para que su conducción por gravedad permita abastecer otros reservorios aguas abajo y evitar el costo de transporte.
- Utilizar el agua tratada para el mantenimiento de áreas verdes, como canchas de futbol en áreas deportivas

10. CONCLUSIONES

El proceso que tuvo el desarrollo de este trabajo de investigación, desde la evaluación previa de sitios, la de gestión del proyecto, la etapa de diagnóstico, la elaboración del proyecto y la documentación completa de las obras de rehabilitación, ofrecen una amplia perspectiva de las causas y circunstancias que influyen en la compleja problemática del abandono de una PTARM, y el reto que implica su correcta implementación y su operación a largo plazo. Aunque existe un elemento técnico y de diseño que es fundamental para estas infraestructuras, se han descrito otros factores que influyen en el proceso de su ejecución.

El uso de los sistemas pasivos de tratamiento, como son los humedales artificiales, ha demostrado ser viable por sus bajos costos de operación y mantenimiento (de Anda

et al., 2018); sin embargo, el éxito de estos depende en gran parte de su correcta construcción y diseño. En este aspecto, los hallazgos reportados de este trabajo evidencian errores y omisiones que se deben evitar en su planificación, así como también se ofrecen algunas alternativas para corregirlos. Además, con la descripción de este proceso, se busca contribuir al estado del conocimiento en México en el campo del diseño de PTARMs localizadas en zonas rurales, periurbanas y desarrollos ecoturísticos (CONAGUA, 2015).

El diagnóstico de la PTARM de Copala, Toluca muestra los errores de diseño que llevaron a implementar un sistema desbalanceado en proporciones y capacidades, el cual comprometía de por sí la eficiencia y la vida útil del sistema de tratamiento. Esto, sumado a las omisiones en su proceso constructivo, llevaron a que la infraestructura instalada no cumpliera con el propósito original de saneamiento de las aguas residuales de la comunidad de Copala, Jalisco. Este caso en particular muestra la falta de previsión en lo que respecta a la capacidad instalada, ya que se subestimó el crecimiento poblacional de Copala. La proyección de una PTARM debe considerar en sus bases de diseño un aforo mayor al registrado o la posibilidad de una ampliación a futuro, para evitar que esta se vea rebasada (CONAGUA, 2015e).

El uso de humedales artificiales debe ser precedido por un tratamiento eficiente en la reducción de sólidos suspendidos para evitar la colmatación a corto plazo de estos elementos. Una correcta selección de componentes en el tren de tratamiento asegura la funcionalidad y durabilidad de la PTARM. Como ya se discutió anteriormente con el tanque séptico y los humedales de sobrenadante, cada componente debe seguir los parámetros ya establecidos para su correcta operación y facilitar las labores de mantenimiento.

Por lo tanto, es indispensable que, al proyectarse este tipo de sistemas, el diseño se deje en manos de especialistas, que cuenten con la experiencia que garantice su correcto funcionamiento. La descripción del sistema, plasmada en los planos y detalles constructivos, debe ser clara y específica, para evitar errores de interpretación; asimismo, su construcción debe ser supervisada directamente por los responsables del diseño.

Además, para garantizar la integridad de la infraestructura construida y la funcionalidad del sistema de tratamiento a largo plazo, es necesario llevar a cabo un mantenimiento riguroso de los componentes y se minimicen los riesgos que están presentes en la PTARM. Las evidencias que se obtuvieron de este proyecto demuestran que no se tomaron en cuenta muchos factores externos que afectaron las instalaciones y que las labores de mantenimiento no fueron suficientes, o se realizaron inadecuadamente. Estos hallazgos destacan la importancia de cumplir con los trabajos y la supervisión de MyO para evitar que el sistema colapse y se necesite considerar una rehabilitación de la PTARM.

Por otra parte, la experiencia que se expone sobre el proyecto de rehabilitación y reconversión tecnológica de la PTARM de Copala, Tolimán, Jalisco, puede ser tomada como un referente para la recuperación de infraestructura de saneamiento en estado de abandono. Este proyecto piloto aporta nuevas perspectivas, no solo para la rehabilitación de PTARM existentes, sino también para el diseño y construcción de nuevas instalaciones; en especial para aquellas que utilizan sistemas pasivos de tratamiento y que se encuentran en un contexto rural.

La intervención de una PTARM para su rehabilitación y reconversión tecnológica solamente se debe considerar después un riguroso análisis sobre la infraestructura existente y que evalúe la factibilidad de llevarla a cabo. Por lo mismo, se debe enfatizar la importancia de realizar una evaluación y diagnóstico correcto. Con esto se puede tener una imagen más clara de la ejecución del proyecto, definiendo los recursos económicos necesarios y la administración de la obra.

El recuperar la infraestructura existente cobra relevancia cuando se compara como alternativa a la construcción de una PTARM nueva. Los costos de una rehabilitación se reducen drásticamente, en este caso, el presupuesto ejercido en una primera fase es una décima parte de la inversión total que se necesitó para su construcción a precios actuales. Sin embargo, como ya se ha visto en el desarrollo de este trabajo, esto depende en gran medida del estado de conservación en que se encuentren sus componentes; ya que es posible que en algunos componentes no exista otra alternativa más que reconstruirse completamente y los costos del proyecto sean mayores. Por otra parte, el

límite económico obligó a posponer para una segunda etapa, elementos que mejoraran notablemente la eficiencia del sistema para garantizar cumplir con la normatividad en las descargas y reúsos.

Los supuestos realizados sobre la eficiencia del sistema de tratamiento rehabilitado deben ser comparados con los resultados obtenidos de los análisis de calidad del agua, una vez que se cumplan con todas las condiciones necesarias para la operación del sistema, que son parte del programa de seguimiento al proyecto. Este monitoreo será indispensable para conocer en qué grado se cumplieron los objetivos planteados en la primera etapa del proyecto y definir los trabajos y recursos necesarios para una segunda etapa.

La población de Copala y su contexto territorial cuentan con circunstancias y características que se deben considerar para la evaluación de los beneficios esperados en la implementación del proyecto de rehabilitación de su PTARM. La rehabilitación, acompañada de la planificación en la reutilización de sus aguas tratadas, podría disminuir la problemática detectada en torno a la gestión hídrica del territorio analizado; aunque se debe revisar más allá de los límites establecidos en este trabajo y evaluar el ordenamiento territorial en la región para tener un panorama más completo de la situación.

Bajo criterios ambientales, el proyecto puede mejorar la disponibilidad de agua a nivel local; frenando la dependencia de las aguas subterráneas y permitiendo la recarga de los acuíferos, así como mejorando la calidad de las aguas superficiales evitando su contaminación por descargas de aguas sin tratamiento. La reutilización de las aguas tratadas y sus subproductos en los campos agrícolas cercanos a la PTARM tiene un enorme potencial para mejorar la productividad en sus cosechas y los ingresos del municipio; trayendo consigo un desarrollo socio económico en la región y disminuyendo el consumo de agua de primer uso con el objetivo de garantizar la seguridad hídrica de la población.

Los esfuerzos para cambiar el paradigma tecnológico a un nuevo enfoque sustentable en el tratamiento de las aguas residuales, mediante el uso de sistemas alternativos de bajos costos de MyO y baja huella de carbono, deben ir acompañados por un fuerte

compromiso por parte de los responsables en su operación. En este aspecto, la reutilización de las aguas tratadas es indispensable para la revalorización de este recurso y la apropiación de los sistemas que lo generan.

REFERENCIAS CITADAS

2030 Water Resources Group. (2009). *Charting our water future: Economic frameworks to inform decision-making*. Autoedición. <https://www.2030wrg.org/charting-our-water-future-economic-frameworks-inform-decision-making/>

Abdel-Halim, W., Weichgrebe, D., Rosenwinkel, K. H., y Verink, J. (2008). Sustainable Sewage Treatment and Re-Use in Developing Countries. En *IWTC 2008: Twelfth International Water Technology Conference 2008; Alexandria, Egypt, March 27 – 30, 2008 / organized by: Water Technology Association (WTA), Egypt; Vol. 2* (pp 1397-1409). Belal Pr. http://www.iwtc.info/2008_pdf/15-2.PDF

Animal Político. (2017, Julio 27). *70% de lagos, lagunas y acuíferos de México están contaminados, revela informe*. <https://www.animalpolitico.com/2017/07/acuiferos-contaminados-informe/>

Casillas-González, J.A. (2007). Programa Nacional de Microcuencas: Una estrategia de desarrollo integral. En Cotler, H. (Comp.), *El manejo integral de cuencas en México: Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental* (2ª ed., pp. 259-275). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/528.pdf>

Chernicharo, C. A. L. (2006). Post-Treatment Options for the Anaerobic Treatment of Domestic Wastewater. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 5, 73-92. <https://doi.org/10.1007/s11157-005-5683-5>

Cisneros, B. J. (2011). Safe Sanitation in Low Economic Development Areas. En Wilderer, P. (Ed.), *Treatise on Water Science*. (Vol. 4, p.147-200). Elsevier Science. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00082-8>

Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible A.C. (2020, Marzo 25). *Avanzan las plantaciones de aguacate en Nayarit y Jalisco.*

<https://www.ccmss.org.mx/mapa/avanzan-las-plantaciones-de-aguacate-en-nayarit-y-jalisco/>

Comisión Estatal del Agua del Estado de Jalisco. (2015). *Ficha técnica hidrológica del municipio de Tolimán.* Gobierno del Estado de Jalisco.

https://www.ceajalisco.gob.mx/doc/fichas_hidrologicas/region9/toliman.pdf

Comisión Estatal del Agua del Estado de Jalisco. (s.f.). *Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.* Recuperado el 30 junio 2020 de

http://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/plantas_tratamiento/

Comisión Estatal del Agua del Estado de Jalisco. (s.f.-a). *Conoce tu cuenca.*

Recuperado el 30 junio 2020 de

https://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/cuencas_conoce/

Comisión Estatal del Agua del Estado de Jalisco. (2018). *Acuíferos.* Recuperado el 30 junio 2020 de <https://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/acuiferos/>

Comisión Nacional del Agua. (2007). *Estadísticas Agua en México 2007.* Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/publicaciones-estadisticas-y-geograficas-60692>

Comisión Nacional del Agua. (2007a). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Diseño, construcción, operación y mantenimiento de pozos de observación para el control de la calidad de los acuíferos.* Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional del Agua. (2012). *Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento.*

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-37-12.pdf>

Comisión Nacional del Agua. (2015). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro30.pdf>

Comisión Nacional del Agua. (2015a). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro25.pdf>

Comisión Nacional del Agua. (2015b). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Saneamiento básico*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro37.pdf>

Comisión Nacional del Agua. (2015c). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Zonas Rurales, Periurbanas y Desarrollos Ecoturísticos*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro31.pdf>

Comisión Nacional del Agua. (2015d). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Procesos Anaerobios*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro49.pdf>

Comisión Nacional del Agua. (2015e). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro4.pdf>

Comisión Nacional del Agua. (2017). *Inventario de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) (2016)* [Archivo Excel]. Agua.org.mx.

<https://agua.org.mx/biblioteca/catalogo-plantas-tratamiento-aguas-residuales-ptar-2016/>

Comisión Nacional del Agua. (2018). *Estadísticas Agua en México 2018*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf

Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo. (2013). *Programa para el Desarrollo de Zonas Prioritarias. Unidad de microrregiones. Ficha de monitoreo 2013*. Secretaría de Desarrollo Social.

https://www.coneval.org.mx/Informes/Evaluacion/Ficha_Monitoreo_Evaluacion_2013/SEDESOL/20_S216.pdf

de Anda-Sánchez, J. (2017). Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México. *Sociedad y Ambiente*, 14, 119-143.

<https://doi.org/10.31840/sya.v0i14.1770>

de Anda, J., y Shear, H. (2016). Searching a sustainable model to manage and treat wastewater in Jalisco, Mexico. *International Journal of Development and Sustainability*, 5(6), 278-294. <https://isdsnet.com/ijds-v5n6-3.pdf>

de Anda, J., López-López, A., Villegas-García, E., y Valdivia-Aviña, K. (2018). High-Strength Domestic Wastewater Treatment and Reuse with Onsite Passive Methods. *Water*, 10(2), 99, 1-14. <https://doi.org/10.3390/w10020099>

de la Peña, M. E., Ducci, J., y Zamora, V. (2013). *Tratamiento de aguas residuales en México*. Banco Interamericano de Desarrollo.

<https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Tratamiento-de-aguas-residuales-en-M%C3%A9xico.pdf>

Delgado-García, S. M.; Trujillo-González J. M., y Torres-Mora M. A. (2017). Gestión del agua en comunidades rurales; caso de estudio cuenca del río Guayuriba, Meta-Colombia. *Luna Azul*, 45, 59-70. <https://doi.org/10.17151/luaz.2017.45.5>

Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano (2015). *Definición de las modalidades de Trabajo de Obtención de Grado*. ITESO.

- Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano (2015a). *Líneas de Generación y Aplicación del Conocimiento*. ITESO.
- Duryea, S., y Robles, M. (2016) *Perspectivas y Realidades: Pulso social de América Latina y el Caribe 2016*. Banco Interamericano de Desarrollo.
<https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Pulso-social-de-Am%C3%A9rica-Latina-y-el-Caribe-2016-Realidades-y-perspectivas.pdf>
- Ellen Macarthur Foundation (2015). *Towards a Circular Economy: Business rationale for an accelerated transition*. Autoedición.
https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/TCE_Ellen-MacArthur-Foundation_9-Dec-2015.pdf
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (2007). *Aguacate. Análisis de rentabilidad del ciclo 2006-2007 y costos de cultivo para el ciclo 2007-2008*.
https://www.fira.gob.mx/Nd/AGUACATE_Michoacan_-_Rentabilidad_2006-2007_Costos_2007-2008.pdf
- Flores Elizondo, R. (2014). Consejo Tarifario del Sistema Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado: contexto, mandato y gobernanza. *Carta Económica Regional*, 114, 117-147. <https://doi.org/10.32870/cer.v0i114.5480>
- Galindo, J.A. y Jiménez, A. (2015). *Gobernanza del Agua en México*. ANEAS.
<http://aneas.com.mx/gobernanza-del-agua-en-mexico/>
- Gobierno del Estado de Jalisco (2019). *Plan Estatal de Gobernanza y Desarrollo de Jalisco 2018 – 2024, visión 2030*. Secretaria de Planeación y Participación Ciudadana. <https://stps.jalisco.gob.mx/content/plan-estatal-de-gobernanza-y-desarrollo-de-jalisco>
- Gobierno del Estado Jalisco (2020, Abril 30). *¿Qué es MIDE? Monitoreo de Indicadores del Desarrollo de Jalisco*. Recuperado el 30 junio 2020 de <https://seplan.app.jalisco.gob.mx/mide/panelCiudadano/inicio>

- Global Water Partnership South America (2011, Diciembre 21). *¿Qué es la GIRH?*
<https://www.gwp.org/es/GWP-Sud-America/ACERCA/por-que/PRINCIPALES-DESAFIOS/Que-es-la-GIRH/>
- Google Earth V. 7.0 (2016, Diciembre 30). [Image Landsat/Copernicus, 12/30/2016, 19°35'15.67"N-103°47'33.86"W, elev 4115 ft, eye alt. 13.44 mi].
- Instituto de Información Estadística y Geográfica del Estado de Jalisco (2018). *Tolimán. Diagnóstico de municipio. Mayo 2018*. Gobierno del Estado de Jalisco.
<https://iieg.gob.mx/contenido/Municipios/Toliman.pdf>
- Instituto Nacional de Geografía y Estadística (2013). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000 serie V Conjunto Nacional Colima* [Archivo shp].
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825568405>
- Instituto Nacional de Geografía y Estadística (2016). *Zona Hidrogeológica Ciudad Guzmán – Colima – Armería* [Archivo pdf].
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463651048>
- Junta intermunicipal de medio ambiente para la gestión integral de la cuenca baja del río Ayuquila (2017). *Informe anual*. Autoedición
<http://www.jira.org.mx/imagenes/informes/INFORME%20ANUAL%20POA%202017.pdf>
- Kadlec, R.H., y Wallace, S.D (2009). *Treatment Wetlands* (2nd Ed.). CRS Press.
https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/KADLEC%20WALLACE%202009%20Treatment%20Wetlands%202nd%20Edition_0.pdf
- Kaminsky, J., y Javernick-Will, A. (2013). Contested Factors for Sustainability: Construction and Management of Household On-Site Wastewater Treatment Systems. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(2), A4013004.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000757](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000757)
- Kleerebezem, R., y Macarie, H. (2003). Treating industrial wastewater: anaerobic digestion comes of age: anaerobic treatment systems offer important advantages

over conventionally applied aerobic processes for removing organic pollutants from water-based streams. (Cover Story). *Chemical Engineering*, 110(4), 56+.

<https://go.gale.com/ps/anonymous?id=GALE%7CA100485643&sid=googleScholar&v=2.1&it=r&linkaccess=abs&issn=00092460&p=AONE&sw=w>

Lihua, C., Ying, O., Qian, L., Fengle, Y., Ying, C., Wenling, Z., y Shiming, L. (2010) Removal of nutrients from wastewater with *Canna Indica* L. under different vertical-flow constructed wetland conditions. *Ecological Engineering*, 36 (8) 1083-1088. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.04.02>

López-López, A., y de Anda-Sánchez, J. (2016). México. *MX/2016/037236*. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.

Lowe, K.S. (2007). *Influent Constituent Characteristics of the Modern Waste Stream from Single Sources: Literature Review*. Water Environment Research Foundation-IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781843397731>

Mara, D. (2003). *Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries*. Earthscan. https://www.pseau.org/outils/ouvrages/earthscan_ltd_domestic_wastewater_treatment_in_developing_countries_2003.pdf

Massoud, M.A., Tarhini, A., y Nasr, J.A. (2009). Decentralized Approaches to Wastewater Treatment and Management: Applicability in Developing Countries. *Journal of Environmental Management*, 90 (1), 652-659. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.001>

Mekonnen, M.M., y Hoekstra, A.Y. (2011) The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 1577-1600. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>

Mijangos Pulido, V.M., y de Anda Sánchez, J. (2019). *Metodología multicriterio para la selección de sitios elegibles para la reconversión tecnológica de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales*. Manuscrito sometido a revisión para su publicación.

- Miller, G.W. (2006). Integrated Concepts in Water Reuse: Managing Global Water Needs. *Desalination*, 187 (1-3), 65-75. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.068>
- Noyola, A., Morgan-Sagastume, J.M., y Güereca, L.P. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*. Universidad Nacional Autónoma de México. http://www.pronatura-sur.org/web/docs/Tecnologia_Aguas_Residuales.pdf
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. (2015). *Principios de Gobernanza del Agua de la OCDE*. Autoedición. <https://www.oecd.org/cfe/regional-policy/OECD-Principles-Water-spanish.pdf>
- Organización Mundial de la Salud. (2017). *Progresos en materia de agua potable, saneamiento e higiene: informe de actualización de 2017 y línea de base de los ODS*. Organización Mundial de la Salud, Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia. https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/jmp-2017/es/
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2011). *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura: Cómo gestionar los sistemas en peligro*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Mundi-Prensa. <http://www.fao.org/3/a-i1688s.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2000). *Nomenclatura Internacional Normalizada Relativa a la Ciencia y la Tecnología, UNESCO*. Autoedición. https://www.epn.edu.ec/wp-content/uploads/2017/03/codigos_unesco.pdf
- Organización Panamericana de la Salud. (2005). *Guía para el diseño de Tanques Sépticos, Tanques Imhoff y Lagunas de Estabilización*. Organización Panamericana de la Salud, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/OPS%202005.%20Gu%C3%ADa%20para%20el%20dise%C3%B1o%20de%20tanques%20s%C3%A9pticos.pdf

Organización Panamericana de la Salud. (2005a). *Guía para la Operación y Mantenimiento de Tanques Sépticos, Tanques Imhoff y Lagunas de Estabilización*. Organización Panamericana de la Salud, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. <https://es.slideshare.net/rogeliovallalta/guia-para-la-operacion-y-mantenimiento-de-tanques-septicos-tnaques-imhoff-y-lagunas-de-estabilizacion>

Perero Van Hove, E. (Coord.). (2019). *Agua y Economía Circular*. Fundación CONAMA. <http://www.fundacionconama.org/wp-content/uploads/2019/09/Agua-y-Economi%CC%81a-Circular.pdf>

Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas (2015). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2015: Agua para un mundo sostenible*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/2015-water-for-a-sustainable-world/>

Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2017: Aguas residuales: El recurso desaprovechado*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/2017-wastewater-the-untapped-resource/>

Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas (2019). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2019: No dejar a nadie atrás*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. <https://es.unesco.org/water-security/wwap/wwdr/2019#:~:text=La%20edici%C3%B3n%20del%202019%20del,%C3%ADdricos%20y%20el%20acceso%20al>

Rozkošný, M., Kriška, M., Šálek, J., Bodík, I., y Istenič, D. (2014). *Natural Technologies of Wastewater Treatment*. Global Water Partnership Central and Eastern Europe.

https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cee_files/regional/natural-treatment.pdf

Sandoval, L., Zamora-Castro, S.A., Vidal-Álvarez, M., y Marín-Muñiz, J.L. (2019). Role of Wetland Plants and Use of Ornamental Flowering Plants in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Review. *Applied Sciences*, 9 (4), 685.

<https://doi.org/10.3390/app9040685>

Secretaría de economía (2001). *DECLARATORIA de vigencia de las normas mexicanas NMX-AA-034-SCFI-2001, NMX-AA-036-SCFI-2001, NMX-AA-038-SCFI-2001, NMX-AA-039-SCFI-2001, NMX-AA-044-SCFI-2001, NMX-AA-045-SCFI-2001 y NMX-AA-050-SCFI-2001*. Diario Oficial de la Federación.

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=761733

Secretaría de Gobernación (2014). *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. Autoedición.

http://www.dof.gob.mx/constitucion/marzo_2014_constitucion.pdf

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2012). *Normas Oficiales Mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996 NOM-002-SEMARNAT-1996 NOM-003-SEMARNAT-1997*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua

<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2017). *Proyecto de Modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 (Diciembre, 2017)*. Diario Oficial de la Federación. <https://agua.org.mx/biblioteca/proyecto-modificacion-la-norma-oficial-mexicana-nom-001-semarnat-1996-diciembre-2017/>

Shen, L., Wu, Y., y Zhang, X. (2011). Key Assessment Indicators for the Sustainability of Infrastructure Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(6), 441-451 [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000315](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000315)

- Sistema Nacional de Información del Agua. (2017). *Calidad del agua* (Nacional). Comisión Nacional del Agua. Recuperado el 30 junio 2020 de <http://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php>
- Strande, L., Schoebitz, L., Bischoff, F., Ddiba, D., Okello, F., Englund, M., Ward, B., y Niwagaba, C. (2018). Methods to reliably estimate faecal sludge quantities and qualities for the design of treatment technologies and management solutions. *Journal of Environmental Management*, 223, 898-907. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.100>
- Tilley, E., Ulrich, L., Luethi, C., Reymond, P., y Zurbruegg, C. (2014): *Compendium of Sanitation Systems and Technologies* (2nd Ed.). International Water Association, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. <https://www.iwa-network.org/wp-content/uploads/2016/06/Compendium-Sanitation-Systems-and-Technologies.pdf>
- Torres Bojorgues, A.X., Hernández Razo, N.A., Fausto Urquieta, A.A., y Zurita Martínez, F. (2017). Evaluación de tres sistemas de humedales híbridos a escala piloto para la remoción de nitrógeno. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 33 (1),37-47. <http://dx.doi.org/10.20937/rica.2017.33.01.03>
- UNDP-SIWI Water Governance Facility. (2016). *Issue sheet: Water Governance*. International Water Institute. <https://www.watergovernance.org/resources/water-governance/>
- United Nations. (2014, Febrero 07). *Decenio del agua. El derecho humano al agua y al saneamiento*. http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/human_right_to_water.shtml
- United Nations. (2018). *Sustainable Development Goal 6: Synthesis report 2018 on Water and Sanitation*. United Nations Publications. https://www.unwater.org/publication_categories/sdg-6-synthesis-report-2018-on-water-and-sanitation/

- United Nations Environment Programme. (2018). *Progress on integrated water resources management. Global baseline for SDG 6 Indicator 6.5.1: degree of IWRM implementation*. United Nations Environment Programme, UN Water.
<https://www.unwater.org/publications/progress-on-integrated-water-resources-management-651/>
- United Nations Human Settlements Programme (2008). *Constructed Wetlands Manual*. Autoedición. <http://unhabitat.org.np/?publications=constructed-wetland-manual>
- United States Environmental Protection Agency. (2002). *Onsite Wastewater Treatment Systems Manual*. Autoedición. <https://www.epa.gov/septic/onsite-wastewater-treatment-and-disposal-systems>
- United States Environmental Protection Agency. (2018, Agosto 10). *Wetlands protection and restoration*. <https://www.epa.gov/wetlands>
- Washington State Department of Health. (2014, Agosto). *How Nitrogen from Septic Systems Can Harm Water Quality*. Autoedición.
<https://www.doh.wa.gov/Portals/1/Documents/4450/337-142-Nitrogen-Removal-from-OSS-FactSheet.pdf>
- Water Environment Federation. (2010). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants. WEF Manual of Practice No. 8. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 76, Fifth Edition*. Autoedición.
- Wood, A. (1995). Constructed wetlands in water pollution control, Fundamentals to their understanding. *Water Science and Technology*, 32 (3), 21-29.
[https://doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)00601-X](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00601-X)
- World Resources Institute México (2019, Agosto 22). *Boletín de prensa: Crea WRI calculadora financiera de infraestructura natural para la recarga de acuíferos*.
<https://wrimexico.org/news/bolet%C3%ADn-de-prensa-crea-wri-calculadora-financiera-de-infraestructura-natural-para-la-recarga-de>
- World Resource Institute (2019a). *Acueduct. Water Risk Atlas* Recuperado el 30 junio 2020 de <https://www.wri.org/aqueduct#aqueduct-tools>

- Wu, H., Zhang, J., Ngo, H.H., Guo, W., Zhen, H., Hub, Z., Liang, S., Fan, J., y Liu, H. (2015). A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. *Bioresource Technology*, 175, 594–601. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.068>
- Yigitcanlar, T., y Dur, F. (2010). Developing a Sustainability Assessment Model: The Sustainable Infrastructure, Land-Use, Environment and Transport Model. *Sustainability*, 2(1), 321-340. <https://doi.org/10.3390/su2010321>
- Yin, R.K. (1994). *Case Study Research: Design and Methods* (2nd Ed.) (Summary). Sage. <https://fba.aiub.edu/Files/Uploads/OPM110045.pdf>