



Universidad Autónoma del Estado de México



Facultad de Planeación Urbana y Regional

**MONITOREO DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUA EN
PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
DOMÉSTICAS DEL MUNICIPIO DE TEPEJI DEL RÍO, HIDALGO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

PRESENTA:

MARLENE ANAHÍ SANTANA MONROY

DIRECTORES DE TESIS:

DRA. BELINA GARCÍA FAJARDO

ING. CARLOS ANTONIO PAILLÉS BOUCHEZ

Toluca de Lerdo, Estado de México; Diciembre de 2020

Contenido

Resumen.....	6
Introducción.....	8
Capítulo 1. Fundamentos de la investigación.....	9
1.1 Planteamiento del problema.....	9
1.2 Preguntas de investigación.....	12
1.3 Hipótesis.....	12
1.4 Objetivo general.....	12
1.5 Objetivos específicos.....	12
1.6 Justificación.....	13
Capítulo 2. Marco Teórico y Conceptual.....	16
2.1 Calidad de agua.....	16
2.2 Aguas residuales y su clasificación.....	17
2.3 Antecedentes del uso de aguas residuales en la agricultura.....	21
2.4 Monitoreo y parámetros de calidad de agua.....	25
2.5 Tecnologías de medición de parámetros de calidad de agua.....	33
2.5.1 Tecnología S::CAN.....	34
Capítulo 3. Metodología.....	36
3.1 Introducción al estudio de caso.....	37
3.2 Caracterización del proyecto “Saneamiento Integral de aguas residuales en el Municipio de Tepeji del Río de Ocampo, Hidalgo”.....	38
3.2.1 Características de las PTARs monitoreadas en el caso de estudio.....	44
3.2.2 Complementos del Proyecto.....	53
3.3 Trabajo de campo.....	54
3.3.1 Monitoreo de parámetros.....	56
3.4 Normatividad de parámetros hídricos en aguas residuales.....	65
3.4.1 Antecedentes internacionales.....	65
3.4.2 Normatividad Mexicana.....	67
3.5 Trabajo de gabinete.....	72
Capítulo 4. Resultados y discusión.....	73
4.1 Resultados de la prueba piloto.....	74
4.2 Validación del método.....	79
4.3 Resultados del monitoreo.....	83
4.4 Eficiencia de remoción de carga orgánica en las nueve PTARs estudiadas.....	92
Capítulo 5. Conclusiones.....	98

Bibliografía.....	104
-------------------	-----

Índice de Imágenes

Imagen 1. Ubicación del Valle del Mezquital.....	24
Imagen 2. Proceso metodológico	36
<i>Imagen 3. Papiro en PTAR Tlaxinacalpan.....</i>	<i>41</i>
<i>Imagen 4. Platanillo en PTAR Tlaxinacalpan.....</i>	<i>41</i>
Imagen 5. Alcatraz en PTAR Tlaxinacalpan	42
<i>Imagen 6. PTAR Benito Juárez.....</i>	<i>44</i>
Imagen 7. PTAR Caracol	45
Imagen 8. PTAR Ojo de Agua II	46
Imagen 9. PTAR Ojo de Agua III.....	47
<i>Imagen 10. PTAR San Buenaventura I.....</i>	<i>47</i>
Imagen 11. PTAR San Buenaventura II.....	48
Imagen 12. PTAR San Ildefonso II.....	49
Imagen 13. PTAR San Ildefonso III	50
<i>Imagen 14. PTAR Santa Ana Atzacapotzaltongo.....</i>	<i>50</i>
Imagen 15. Mapa de localización de PTARs.....	52
Imagen 16. Vista de la página web con SIG de FIAVHI	54
Imagen 17. Proceso de monitoreo.....	58
Imagen 18. Sensor spectro::lyser para afluentes.	61
Imagen 19. Sensor spectro::lyser para efluentes	61
Imagen 20. Vista general de un sensor espectrofotométrico de S::CAN.....	63
Imagen 21. Vista general de con::cube y moni::tool.....	63
Imagen 21. Vista general de con::cube y moni::tool.....	64
Imagen 22. Sensor muestreando en afluente. PTAR San Ildefonso III. Fuente: Tomada de trabajo de campo (2020).....	85

Índice de Tablas

Tabla 1. Fuentes de las aguas residuales	19
Tabla 2. Componentes principales de las aguas residuales domésticas.....	20
Tabla 3. Cultivos agrícolas más comunes que usan aguas residuales	22
Tabla 4. Datos de población en México	22
Tabla 5. Tipos de monitoreo.....	26
Tabla 6. Composición típica de aguas residuales domésticas sin tratar	31
Tabla 7. Parámetros de calidad de agua a monitorear	32
Tabla 8. Características de las PTARs del Municipio de Tepeji del Río.....	43
Tabla 9. Plan de rutas de monitoreo	56
Tabla 10. Efectos del uso de aguas residuales en suelos y cultivos	66
Tabla 11. LMP NOM-032-ECOL-1993.....	68
Tabla 12. LMP NOM-001-SEMARNAT-1996.....	70

Tabla 13. LMP NOM-003-SEMARNAT-1996.....	71
Tabla 14. LMP PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017	72
Tabla 15. Resultados del primer análisis de laboratorio certificado.....	79
Tabla 16. Resultados obtenidos con los sensores de la UMPA respecto al primer análisis de laboratorio	79
Tabla 17. Resultados del segundo análisis de laboratorio certificado	81
Tabla 18. Resultados obtenidos con los sensores de la UMPA respecto al segundo análisis de laboratorio certificado	81
Tabla 19. Porcentajes de Eficiencia, PTAR Benito Juárez.....	92
Tabla 20. Porcentajes de Eficiencia, PTAR Caracol.....	92
Tabla 21. Porcentajes de Eficiencia, PTAR Ojo de Agua II.....	93
Tabla 22. Porcentajes de Eficiencia, PTAR Ojo de Agua III	94
Tabla 23. Porcentajes de Eficiencia, PTAR San Buenaventura I.....	94
Tabla 24. Porcentajes de Eficiencia, PTAR San Buenaventura II	95
Tabla 25. Porcentajes de Eficiencia, PTAR San Ildefonso II.....	95
Tabla 26. Porcentajes de Eficiencia, PTAR San Ildefonso III.....	96
Tabla 27. Porcentajes de Eficiencia, PTAR Santa Ana Atzacapotzaltongo	97

Índice de Gráficas

Gráfica 1. Niveles de DQO en primer muestreo (prueba piloto)	74
Gráfica 2. Niveles de DBO en primer muestreo (prueba piloto).....	75
Gráfica 3. Niveles de SST en primer muestreo (prueba piloto)	76
Gráfica 4. Niveles de pH en primer muestreo (prueba piloto).....	77
Gráfica 5. Niveles de Temperatura en primer muestreo (prueba piloto).....	78
Gráfica 6. Primera comparación de resultados Laboratorio-UMPA.....	80
Gráfica 7. Segunda comparación de resultados Laboratorio-UMPA.....	82
Gráfica 8. Niveles de DQO en segundo muestreo (ajuste local).....	84
Gráfica 9. Niveles de DBO en segundo muestreo (ajuste local)	86
Gráfica 10. Niveles de SST en segundo muestreo (ajuste local).....	87
Gráfica 11. Niveles de pH en segundo muestreo (ajuste local).....	89
Gráfica 12. Niveles de Temperatura en segundo muestreo (ajuste local).....	90

Resumen

Este trabajo de tesis se desarrolla como un estudio de caso dentro del Proyecto “*Saneamiento Integral del Municipio de Tepeji del Río, Hidalgo*” implementado por el Gobierno Municipal en colaboración con el Fideicomiso de Infraestructura Ambiental de los Valles de Hidalgo (FIAVHI). Dentro de este proyecto y como respuesta a la problemática de aguas residuales generadas a nivel doméstico, se han construido 18 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTARs) en diferentes localidades del Municipio, con características propias según las características del terreno donde están ubicadas. El objetivo de esta investigación es monitorear la calidad del agua en nueve PTARs con una estación móvil conformada por dos sensores espectrofotométricos de tecnología austríaca que dan resultados en tiempo real y un transmisor de datos que sube la información a la página web de FIAVHI para su visualización y manejo, lo anterior es para determinar si los efluentes están dentro de los límites establecidos en las Normas Mexicanas vigentes y comprobar si son aptos para los usos a los que están destinados que son el riego agrícola, de campos deportivos y áreas verdes.

La metodología se dividió en trabajo de gabinete y trabajo de campo con visitas prospectivas y visitas en las cuáles se realizó el monitoreo. Los parámetros estudiados son cinco: Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Temperatura y pH. Se realizaron monitoreos tanto de los afluentes como de los efluentes para conocer también la eficiencia de las PTARs.

La suma de efluentes en las nueve PTARs estudiadas es de 315´360,000.00 litros (315,360 m³) anuales de aguas residuales que no llegan a las corrientes de agua de las comunidades ni mucho menos al Río Tepeji o a la Presa Requena ubicada en el municipio y que es conocida como una de las más afectadas en términos de contaminación ambiental del país.

Dentro de los resultados obtenidos, se observaron en su mayoría eficiencias de más del 70% en la disminución de concentración de los parámetros monitoreados.

Por otra parte, se observaron diferencias en los resultados de los parámetros muestreados entre una PTAR y otra, lo que llevó a la conclusión, entre otras, que si bien las PTARs están trabajando con valores de eficiencia por arriba del 70%, la calidad de los efluentes varía dependiendo de las fases de tratamiento que tiene cada PTAR, el sitio en el que están ubicadas

y la organización de los diferentes actores que están involucrados en su manejo y mantenimiento.

Palabras clave: PTARs, calidad de agua, monitoreo, parámetros, sensores espectrofotométricos.

Abstract

This work is developed as a case study within the Project "*Integral Sanitation of the Municipality of Tepeji del Río, Hidalgo*" implemented by Municipal Government in collaboration with the Environmental Infrastructure Trust of the Valleys of Hidalgo (FIAVHI). Within this project and in response to the problem of wastewater generated at the domestic level, 18 Wastewater Treatment Plants (WWTPs) have been built in different locations in the Municipality, with specific characteristics according to the land where they are located. The objective of this research is to monitor the water quality in nine WWTPs with a mobile station made up of two spectrophotometric sensors of Austrian technology that give results in real-time and a data transmitter that uploads the information to FIAVHI's website for its visualization and management, this is to determine if the effluents are within the limits established in the current Mexican Standards and check if the effluents are suitable for the uses they are destined, which are agricultural irrigation, sports fields and green areas.

The methodology was divided into office work and field-work with prospective visits and visits in which monitoring was carried out. The parameters studied are five: Biological Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solids (SST), Temperature and pH. Monitoring of both tributaries and effluents was carried out to also know the efficiency of the WWTPs.

The sum of effluents in the nine WWTPs studied is 315'360,000.00 liters (315,360 m³) per year of wastewater that does not reach the water bodies of the communities, much less the Tepeji River or the Requena Dam located in the Municipality and that It is known as one of the most affected in terms of environmental pollution in the country.

Among the results obtained, efficiencies of more than 70% were observed in the concentration decrease of the monitored parameters.

On the other hand, some differences were observed in the results of the sampled parameters, which led to the conclusion, among others, that although the WWTPs are working with efficiency values up 70%, the quality of the effluents varies depending on the treatment phases that each WWTP has, the site where they are located and the organization of the different actors that are involved in their management and maintenance.

Keywords: WWTPs, water quality, monitoring, parameters, spectrophotometric sensors

Introducción

Esta tesis está conformada por cinco capítulos los cuáles están conformados de la siguiente manera: En el Capítulo 1 se exponen los fundamentos de la investigación que se componen del planteamiento del problema, las preguntas de investigación, la hipótesis, el objetivo general y los objetivos específicos, así como la justificación para el desarrollo de este trabajo.

El Capítulo 2 reúne los conceptos relevantes para el entendimiento del tema y también incluye antecedentes importantes del uso de las aguas residuales en la agricultura y algunos métodos de monitoreo que se utilizan para estudiar su calidad, haciendo énfasis en las nuevas tecnologías que se han desarrollado y que buscan optimizar tiempo y recursos en el desarrollo de esta tarea.

El tercer Capítulo expone todo el proceso metodológico empleado para el desarrollo de la investigación; desde el trabajo de gabinete y las visitas prospectivas a las plantas para su reconocimiento y caracterización, hasta el trabajo de validación de datos emitidos por los sensores para realizar el monitoreo y la revisión de la normatividad vigente utilizada al momento de analizar los resultados y obtener las conclusiones correspondientes.

Es en el Capítulo 4 en dónde se muestran los resultados obtenidos en el monitoreo y también se hace un análisis de eficiencia en la disminución de los cinco parámetros estudiados comparando los valores recibidos en los afluentes con respecto a los resultados de los efluentes. Tomando en cuenta el conjunto de información recabada y generada es como en el Capítulo 5 se desarrollan las conclusiones obtenidas y algunas recomendaciones para el desarrollo de nuevas investigaciones.

Capítulo 1. Fundamentos de la investigación

En este Capítulo se muestra el planteamiento del problema, en el cual se mencionan datos y cifras que dan a conocer problemáticas relacionadas con el uso y manejo del agua a nivel internacional y nacional, para así llegar al tema específico de las aguas residuales recibidas y generadas en el municipio de Tepeji del Río.

Posteriormente se señalan tanto las preguntas de investigación, como la hipótesis, el objetivo general y los objetivos específicos que este trabajo tiene como fin, para así dar paso a la justificación del por qué es importante su desarrollo tanto a nivel local como a nivel internacional en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

1.1 Planteamiento del problema

El recurso agua es indispensable en las actividades para el desarrollo humano. Factores como el crecimiento demográfico, la urbanización, la industrialización y el aumento de producción y consumo generan una presión diaria cada vez más grande en la demanda de este recurso (UNESCO, 2015, pág. 1) dando como resultado que el empleo del agua se haya triplicado desde el año 1950 (Jiménez, 2015).

Los usos del agua en el mundo se pueden dividir de manera general en tres grupos: uso agrícola, uso industrial y abastecimiento público (CONAGUA, 2011). Cada uno de dichos usos, al final de su aprovechamiento altera la calidad del recurso y genera aguas negras o residuales.

En la mayoría de las ciudades de los países en desarrollo no se asignan recursos necesarios para el manejo de las aguas residuales, dando como resultado que el 90% de las generadas por estos países se viertan directamente sin ningún tipo de tratamiento a cuerpos receptores como ríos, lagos o el mar (UNESCO, 2015). Por otro lado, la Organización de las Naciones Unidas refiere que en los países de ingresos medios-altos como México se trata solamente el 28% de las aguas residuales municipales e industriales generadas (WWAP, 2017), dejando entonces un 72% que llega contaminada y sin ningún tratamiento a los cuerpos receptores, deteriorando su calidad y poniendo en riesgo la salud humana y los ecosistemas.

Cabe destacar que la actividad humana con mayor consumo de agua es la agricultura ya que anualmente a nivel mundial representa el 69% de extracción y está creando una gran tensión en la disponibilidad de los recursos hídricos (FAO, 2002).

Específicamente en México, el porcentaje de agua utilizado en la agricultura es el 76% (CONAGUA, 2018) y de manera particular la zona del Valle del Mezquital en el Estado de Hidalgo se caracteriza por la gran cantidad de descargas de aguas residuales recibidas. Hoy en día “es la zona más grande del mundo de riego agrícola con agua residual” (Torres, 2012). Uno de los Municipios pertenecientes al Valle del Mezquital que está afectado por estas descargas es Tepeji del Río de Ocampo debido a que recibe aguas residuales provenientes de las zonas industriales aledañas y de la Ciudad de México a través de los conductos: “Interceptor Poniente (1789), el Gran Canal (1898) y el Emisor Central (1975), que llegan a la Presa Requena del municipio con el doble propósito de desalojar rápidamente los excedentes de agua de lluvia para evitar inundaciones y desalojar las aguas negras” (Jiménez, C., Siebe G., & Cifuentes G., 1994, pág. 35).

Además de las descargas mencionadas en el párrafo anterior, la CONAGUA en su Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) enlista 33 permisos de descargas de aguas residuales en el Municipio de Tepeji que suman un total de 7,599.09 m³/día de los cuáles no se hace mención de recibir algún tipo de tratamiento antes de llegar a los cuerpos receptores (CONAGUA, 2020).

La suma de las aguas recibidas y vertidas en el mismo municipio, son principalmente utilizadas sin ningún tratamiento previo para el riego agrícola, y por más de cien años esta práctica ha ayudado a los agricultores a incrementar sus cultivos con bajos costos de producción pero con graves repercusiones ambientales y para la salud humana (UNU-FLORES, 2017, pág. 3).

Ante tal problemática, el Municipio de Tepeji del Río en conjunto con el Fideicomiso de Infraestructura Ambiental de los Valles de Hidalgo (FIAVHI), han trabajado desde hace varios años en el tratamiento y saneamiento de agua en Tepeji, logrando instalar 18 Plantas

de Tratamiento de Aguas Residuales (PTARs) en distintas localidades del municipio con el objetivo de disminuir la carga de contaminantes que llegan a cuerpos de agua más grandes como La Presa Requena; el agua tratada representa una fuente importante de nutrientes lo que permite que sea aprovechada en las áreas verdes y/o agrícolas que se encuentran en los alrededores de cada Planta. Estas PTARs se denominan tipo FIAVHI ya que su diseño permite que

Sin embargo, la problemática actual de dichas PTARs es la falta de monitoreo de los parámetros de calidad de agua tanto en los afluentes como en los efluentes. Al ser varias Plantas en diferentes localidades del municipio, hacer análisis de laboratorio para cada una de ellas resulta costoso y demanda mucho tiempo. La forma más tradicional para monitorear la calidad del agua es la toma de muestra en campo y su traslado a laboratorio para conocer los resultados, sin embargo, hoy en día existen otros instrumentos móviles que permiten el análisis *in situ* y pueden representar un ahorro de tiempo y dinero a largo plazo. Por tal motivo, el FIAVHI adquirió un equipo especializado y de alta tecnología para realizar mediciones de DBO, DQO, SST, pH y temperatura en el sitio de ubicación de las PTARs y que además da resultados en cuestión de minutos.

El objetivo de este trabajo es llevar a cabo, con el equipo mencionado anteriormente, las mediciones de diferentes parámetros de calidad de agua en nueve PTARs seleccionadas para verificar su eficiencia y así aportar información confiable al manejo integral del agua municipal, además se establecerán antecedentes para fortalecer e incentivar el empleo de nuevos métodos en la medición de parámetros de agua.

1.2 Preguntas de investigación

- ¿Cuál es la calidad de los efluentes de las PTARs domésticas tipo FIAVHI ubicadas en el Municipio de Tepeji del Río, Hidalgo? Y ¿Cumplen con la normatividad mexicana vigente para los reusos a los que es destinada el agua residual tratada?

1.3 Hipótesis

El efluente de las PTARs monitoreadas cumple con la normatividad mexicana vigente para el uso que es destinada en los parámetros DBO, DQO, SST, Temperatura y pH

1.4 Objetivo general

Monitorear la calidad del agua de los afluentes y efluentes de las PTARs domésticas tipo FIAVHI en el Municipio de Tepeji del Río, Hidalgo a través de la estación de móvil UMPA, para determinar si los efluentes cumplen con las normas mexicanas vigentes para los reusos a los que son destinados.

1.5 Objetivos específicos

- Describir la problemática de aguas residuales en las zonas agrícolas del municipio de Tepeji del Río, Hidalgo.
- Caracterizar el funcionamiento de las PTARs tipo FIAVHI ubicadas en el municipio de Tepeji del Río.
- Evaluar y comparar el funcionamiento y eficiencia de las PTARs a través del monitoreo de parámetros de calidad de agua con sensores de la estación móvil UMPA.
- Analizar el uso y potencial de nuevas tecnologías para el monitoreo de parámetros de calidad de agua en el caso de estudio.

1.6 Justificación

La contaminación del agua está totalmente involucrada con la salud y nutrición de todos los seres vivos, desafortunadamente se ha ido agravando con el paso de los años debido al incremento de la población humana, la extensa actividad industrial y agrícola y el cambio climático (ONU, 2014).

Buscar soluciones viables es una materia urgente hoy en día y muestra de ello es que el recurso agua está implícito en la mayoría de los 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) publicados por la ONU en 2015, siendo los principales el objetivo 2: hambre cero, 3: salud y bienestar, 6: agua limpia y saneamiento, 7: energía asequible y no contaminante, 9: industria, innovación e infraestructura, 11: ciudades y comunidades sostenibles, 12: producción y consumo responsables, 13: acción por el clima, 14: vida submarina y 15: vida de ecosistemas terrestres.

La búsqueda de alternativas para lograr los ODS arriba mencionados está compuesta por inmensas variables, pero se puede afirmar que el monitoreo de la calidad del agua es una de las imprescindibles para describir el estado de los medios hídricos y parte importante al momento de realizar planes, programas o propuestas para su manejo (Ministerio Español de Medio Ambiente, 2000). Llevar a cabo estos monitoreos se ha convertido en una prioridad ya que, de acuerdo al uso planeado o destinado, los resultados mostrarán si el agua tiene una calidad apropiada para ello o no. Por ejemplo, si se desea utilizar para consumo humano, debe tener muy bajos niveles de compuestos relacionados con el Nitrógeno y el Fósforo, mientras que, si se busca emplear para el riego de cultivos, el agua debe tener un alto contenido de los elementos mencionados ya que funcionan como nutrientes para las plantas. (García Hidalgo, 2015).

Con base al Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos (2017, pág. 21) “las aguas residuales domésticas tratadas adecuadamente fomentan la seguridad alimentaria y pueden generar importantes beneficios para la salud, incluyendo un mayor valor nutricional” por lo cual el tema de esta investigación se considera pertinente y relevante para abordar el problema del tratamiento y reuso del agua residual

Las PTARs diseñadas por FIAVHI representan una nueva tecnología ambiental que permite vislumbrar un escenario futuro con mayor disponibilidad de agua apta para el riego y otros usos ambientales, además involucran la participación de diferentes sectores de la población al tiempo que reducen la problemática del uso de aguas negras en el sector agrícola.

Los cultivos regados con el agua tratada por estas PTARs han registrado mayor rendimiento y producción de proteínas en comparación los riegos con agua dulce. Por ejemplo, en cultivos de maíz se reportaron porcentajes de proteína en biomasa seca de entre 15.91% y 16.66% en parcelas regadas con agua residual tratada comparados con los entre 6.39% y 11.72% reportados en parcelas regadas con agua dulce (Velasco Cruz, 2018). Lo anterior demuestra la viabilidad y beneficios de estas PTARs.

Sin embargo, al realizar visitas prospectivas a las diferentes PTARs se observó que la problemática que enfrentan hoy en día es que hay insuficientes estudios de calidad de agua tanto en los afluentes como en los efluentes de cada una de ellas, por lo cual se están buscando alternativas para su diario monitoreo.

Esta falta de datos que comprueben su eficiencia ha generado incertidumbre en la población aledaña a las instalaciones de las PTARs sobre su funcionamiento y confiabilidad, por tal motivo, en este trabajo se busca llevar a cabo el monitoreo de cinco parámetros de calidad de agua en nueve de las 18 PTARs del Municipio de Tepeji del Río con un equipo de sensores adquirido por el FIAVHI. Se tomarán muestras tanto de los afluentes como de los efluentes para realizar una comparación y evaluar el funcionamiento de las Plantas.

Se espera que los resultados obtenidos contribuyan de apoyo para el Programa “*Saneamiento Integral del Municipio de Tepeji del Río*” que se está implementando actualmente y desde el 2014 (Fideicomiso de Infraestructura Ambiental de los Valles de Hidalgo, 2019), al mismo tiempo que se analiza la fiabilidad de llevar a cabo monitoreos de calidad de agua con el uso de nuevas tecnologías y en tiempo real, lo cual significaría un posicionamiento de los análisis con sensores, que brindan mayor disponibilidad de información, en menor tiempo y con menos costos a largo plazo buscando la viabilidad funcional y financiera de las instituciones

interesadas y por último, inferir la contribución que este proyecto tiene para el logro de los ODS.

Capítulo 2. Marco Teórico y Conceptual

Este Capítulo se divide en cinco apartados en los que se abordan los aspectos teóricos más relevantes que sirven como base para entender los diferentes temas y conceptos que son claves en el desarrollo de este trabajo de investigación.

En la primera parte se mencionan diversas definiciones que existen sobre calidad de agua y como es que, al final todas están relacionadas. Posteriormente se muestra también el concepto de aguas residuales y su clasificación según su fuente y los componentes que están presentes en la misma. En la tercera parte del Capítulo se habla sobre el papel que ha tenido el agua residual en la agricultura a nivel mundial, aterrizando el tema en el caso específico del Valle del Mezquital y del Municipio de Tepeji del Río. La cuarta parte está enfocada en cuáles son los tipos de monitoreo más utilizados en el tema de calidad de agua, desde los tradicionales de laboratorio hasta los más actuales e innovadores, así es como, para finalizar este Capítulo se mencionan las nuevas tecnologías empleadas en el tema y el papel que tienen los sensores de S.CAN para llevar a cabo monitoreos *in situ* y en tiempo real.

2.1 Calidad de agua

Este concepto tiene diferentes acepciones. Según el Libro Blanco del Agua, publicado por el Ministerio Español de Medio Ambiente (2000) se puede definir desde un punto de vista funcional, químico o ambiental. El primero hace referencia a la capacidad del agua para satisfacer las demandas que se tienen de su uso, el segundo se refiere al conjunto de sus características físicas, químicas y microbiológicas, mientras que desde una perspectiva medioambiental se define como “las condiciones que deben darse en el agua para que ésta mantenga un ecosistema equilibrado y para que cumpla unos determinados objetivos de calidad ecológica” (pág. 196).

Por otra parte, Rigola Lapeña (1990) la define como “el grupo de concentraciones, especificaciones, sustancias orgánicas e inorgánicas y la composición y estado de la biota encontrada en el cuerpo de agua... que muestra variaciones espaciales y temporales debido a factores internos y externos del cuerpo de agua” (pág. 13).

Una tercera definición es la publicada por la OMS, que indica que es un término para expresar la idoneidad del agua para sostener diferentes usos o procesos, según sus diferentes y

particulares requerimientos en sus características físicas, químicas o biológicas (PNUMA/OMS, 1996).

Por lo anterior, se puede afirmar que la calidad del agua es definida según el uso para el que sea destinada la misma ya que si bien, varios usos pueden tener requerimientos en común, cada uno tendrá también sus propias demandas y necesidades específicas.

Un cambio en la calidad del agua se puede presentar por procesos naturales o antrópicos. Las actividades humanas que tienen un mayor impacto en estos cambios son el aumento y la concentración de la población, las descargas por actividades productivas, domésticas o municipales sin tratar, el uso inadecuado de la tierra y la carencia de sistemas adecuados de saneamiento (Ojeda Guerrero & Santacruz Mallama, 2017).

Por otra parte, los procesos naturales que pueden modificar la calidad de las cuencas hidrográficas son la erosión del sustrato material, los procesos atmosféricos de evapotranspiración y sedimentación de lodos y sales, la lixiviación de la materia orgánica y nutrientes del suelo, así como los procesos biológicos en los cuerpos de agua que puedan alterar su composición fisicoquímica (ONU, 2015).

Conocer los datos de calidad de un cuerpo de agua es entonces importante ya que representan una variable descriptora fundamental del recurso; son necesarios para realizar caracterizaciones ambientales o planificaciones de uso y son indispensables también para llevar a cabo gestiones hidrológicas debido a que dan a conocer la aptitud para mantener los ecosistemas, para seguir satisfaciendo las diferentes demandas (Ministerio Español de Medio Ambiente, 2000) o en su caso, para implementar proyectos de mejoramiento y recuperación de ecosistemas.

2.2 Aguas residuales y su clasificación

Las aguas residuales son también conocidas como aguas servidas o efluentes y se pueden definir como:

“Aguas de composición variada provenientes de descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general cualquier otro uso así como la mezcla de ellas” (DOF, 1997, pág. 9).

Otra definición de aguas residuales es la siguiente:

Una combinación de uno o más de los siguientes: efluentes domésticos que consisten en aguas negras (excremento, orina y lodos fecales) y aguas grises (aguas servidas de lavado y baño); agua de establecimientos comerciales e instituciones, incluidos hospitales; efluentes industriales, aguas pluviales y otras escorrentías urbanas; y escorrentías agrícola, hortícola y acuícola” (Raschid-Sally y Jayakody, 2008, p.1 como se cita en WWAP, 2017, pág. 17)

Ambas definiciones dejan entrever que existen varias fuentes de aguas residuales; en la Tabla 1 se exponen las principales de ellas con sus características básicas:

Tabla 1. Fuentes de las aguas residuales

Fuente	Características principales
Aguas residuales domésticas	Excrementos humanos, nutrientes, materia orgánica; pueden contener productos farmacéuticos, fármacos y disruptores endocrinos.
Aguas residuales municipales	Contienen una gran variedad de contaminantes como microorganismos patógenos, nutrientes y materia orgánica, metales pesados y contaminantes emergentes
Escorrentía urbana	Entre los principales contaminantes contenidos en esta fuente están: productos de combustión incompletos (hidrocarburos aromáticos, carbón negro/hollín resultado de la combustión de combustibles fósiles), caucho, aceite de motor, metales pesados, basura no degradable, partículas suspendidas y fertilizantes/pesticidas de césped.
Escorrentía agrícola superficial	Microorganismos patógenos, nutrientes de fertilizantes de suelos, pesticidas e insecticidas de prácticas agrícolas.
Acuicultura terrestre	Alta presencia de materia orgánica, partículas sólidas en suspensión, nutrientes disueltos metales pesados y contaminantes emergentes.
Aguas residuales industriales	Los contaminantes presentes en estas fuentes dependerán del tipo de industria. Algunos de los más comunes son los que se caracterizan por alterar gravemente los niveles de DBO, DQO, sólidos en suspensión, toxicidad y color
Actividades mineras	Los desechos de la actividad minera pueden contener sólidos en suspensión, nutrientes disueltos y metales pesados.
Generación de energía	La generación de electricidad representa una fuente de contaminación térmica y normalmente contiene nitrógeno en forma de amoníaco o nitrato, sólidos disueltos, sulfatos y metales pesados.
Lixiviados de vertedero	Contienen contaminantes orgánicos e inorgánicos con altas concentraciones de metales y químicos orgánicos peligrosos.

Fuente: Elaboración propia con base en WWAP (2017) pág. 40

Este trabajo está enfocado al manejo de las aguas residuales domésticas que generalmente están libres de sustancias peligrosas, y entre sus características principales se encuentra la presencia de nutrientes como Nitrógeno y Fósforo que pueden provocar eutrofización en las masas de agua o, si son manejadas de una forma adecuada, se pueden recuperar para su uso en la agricultura (WWAP, 2017).

Generalmente, la fuerza y composición de este tipo de aguas residuales cambia según la hora, el día o la estación del año y depende en gran medida del uso per cápita del agua, hábitos, alimentación y nivel de vida ya que, por ejemplo, en los hogares de países desarrollados hay un mayor consumo de agua que en los de países en desarrollo.

En la Tabla 2 se muestran los principales componentes que se pueden encontrar en las aguas residuales domésticas:

Tabla 2. Componentes principales de las aguas residuales domésticas

Componente	Son de especial interés	Efectos medioambientales
Microorganismos	Bacterias patógenas, virus y huevecillos de gusanos	
Materiales orgánicos biodegradables	Agotamiento de Oxígeno en ríos y lagos	Peces muertos, malos olores
Otros materiales orgánicos	Detergentes, pesticidas, grasa, aceites, colorantes, solventes, fenoles, cianuro	Efectos tóxicos y antiestéticos, bio acumulación en la cadena alimenticia
Nutrientes	Nitrógeno, fósforo, amonio	Eutrofización, agotamiento de Oxígeno, efectos tóxicos
Metales	Mercurio, Plomo, Cadmio, Cromo, Cobre, Níquel	Efectos tóxicos, bioacumulación
Otros materiales inorgánicos	Ácidos como Sulfuro de Hidrógeno	Corrosión y efectos tóxicos en seres vivos
Efectos termales	Agua caliente	Cambio en las condiciones de vida de la flora y fauna
Olor	Sulfuro de Hidrógeno	Efectos antiestéticos, efectos tóxicos en seres vivos

Fuente: Elaboración propia con base en Universidad Técnica de Hamburgo (2019) párrafo 4

2.3 Antecedentes del uso de aguas residuales en la agricultura

Según Parreiras (2005), la utilización de aguas residuales en la agricultura se ha presentado desde civilizaciones antiguas como Atenas, sin embargo no fue hasta mitades del Siglo XIX que países como Australia, Francia, Alemania, Inglaterra, India, Polonia, Estados Unidos y México empezaron a utilizar sistemas de aplicación de aguas residuales domésticas para la producción de alimentos debido a que eran descargadas directamente a los cuerpos receptores sin ningún tratamiento, por lo que la alternativa fue transportarlas a las zonas rurales en dónde se utilizaron para el riego de los cultivos propios de cada zona (pág. 6).

El mismo autor menciona que en el Siglo XX se presentó una reducción del riego con aguas residuales principalmente por el temor a la falta de saneamiento y además debido al desarrollo de sistemas modernos de tratamiento, sin embargo a mitades del Siglo, después de la Segunda Guerra Mundial volvió a surgir la misma práctica debido a la necesidad de optimización de recursos hídricos por la escasez resultante de la Guerra; los países que tomaron dicha práctica fueron: Argentina, Australia, Chile, China, Alemania, India, Israel, Kuwait, México, Perú, Arabia Saudita, Sudáfrica, Sudán, Túnez y Estados Unidos (pág. 6).

Hoy en día se ha reforzado el uso del agua residual doméstica o municipal en los cultivos ya que la demanda mundial hídrica ha ido incrementando al paso del crecimiento demográfico y por consiguiente, a la necesidad de alimentar a más personas con recursos naturales cada vez más limitados

Uno de los factores que han influido en el reforzamiento de esta práctica es el hecho de que las aguas residuales domésticas y municipales tienen un alto contenido de nutrientes como el Nitrógeno y el Fósforo que son fundamentales para la fertilización, por lo cual ha resultado ser una opción atractiva para los agricultores (WWAP, 2017), dando como resultado que en la actualidad por lo menos 44 países utilizan agua residual tratada para el riego agrícola representando un total de más de $15\text{hm}^3/\text{d}$ (Jiménez y Asano, 2008, como se cita en FAO, 2013, pág 14).

Con un tratamiento adecuado y utilizándose de manera segura, las aguas residuales domésticas constituyen una importante fuente de agua y de nutrientes, al tiempo que fomenta la seguridad alimentaria y un mayor valor nutricional en productos agrícolas (WWAP, 2017).

En la Tabla 3 se muestran los cultivos más comunes en el mundo en los que se utilizan aguas residuales sin tratamiento o tratamiento parcial

Tabla 3. Cultivos agrícolas más comunes que usan aguas residuales

Tipo de cultivo	Ejemplos
Agrícola	Cebada, maíz, avena, trigo
Fibras y semillas	Algodón, semillas de flores
Hortalizas que pueden consumirse crudas	Brócoli, col, coliflor, apio, ají, tomate, jitomate, lechuga
Hortalizas que se procesan antes del consumo	Alcachofa, frijol, cebolla, cacahuate, papa, espinaca, betabel
Forraje	Alfalfa, cebada, trébol, heno, maíz, pasto
Huertos y viñedos	Vides, árboles frutales como manzanos, cítricos, limoneros, duraznos, ciruelos
Invernaderos	Flores

Fuente: Elaboración propia con base en FAO (2013) pág. 18

En México, como en muchos otros países del mundo, el aumento poblacional (Tabla 4) ha tenido repercusiones negativas muy graves en el sector hídrico ya que se deben satisfacer las demandas de uso doméstico y de las actividades productivas, entre ellas la agricultura.

Tabla 4. Datos de población en México

Año	Población rural (millones de habitantes)	Población urbana (millones de habitantes)	Total de población (millones de habitantes)
1900	9.8	3.8	13.6
2000	24.7	72.8	97.2
2015	27.5	92	119.5

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2015) sección de tabulados

A nivel nacional, CONAGUA reportó en 2017 una extracción total de 216,593 m³ de agua en todo el año, de ese total, el 39% del agua que retornó al ambiente en forma de descarga directa que no recibió ningún tipo de tratamiento y sólo 6,292 m³ pasaron por una Planta de Tratamiento.

CONAGUA (2017) tiene registradas un total de 2,536 Plantas de Tratamiento Municipales y 3,041 Plantas de Tratamiento Industriales que en su conjunto tratan 199.5 m³ de agua por segundo

Algunos Estados de la República Mexicana de los que se tiene registro de uso de aguas residuales para el cultivo son: Morelos, específicamente los Municipios de Temixco, Xochitepec, Puente de Ixtla, Zacatepec y Jojutla en dónde el cultivo principal es la cebolla; Colima, Puebla y el Norte de México debido a la escasez del recurso y la presencia predominante de suelos áridos y semiáridos (Lugo Morin, 2009).

Caso de estudio. Valle del Mezquital

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2016) menciona que uno de los factores que más influyó en el uso de las aguas residuales para fines agrícolas en el País fue la necesidad de desalojar aguas pluviales y residuales de la Ciudad de México como forma de evitar inundaciones en la Capital. Fue en 1579 que se propuso la idea de crear un desagüe desde la Ciudad hasta el río Tula en Hidalgo, sin embargo, fue hasta 1894 que se concluyó el proyecto.

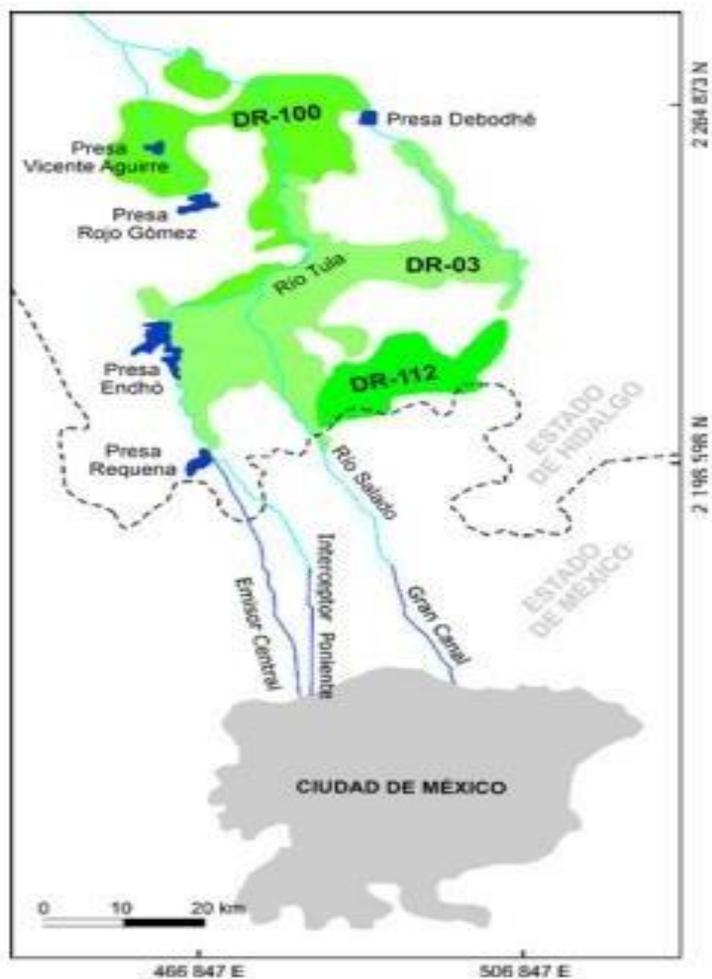
De acuerdo con la misma fuente, en 1953, con la creación de la Comisión Hidrológica del Valle de México dependiente de la Secretaría de Recursos Hidráulicos se dio a conocer la obra complementaria de drenaje profundo, el cual comprendía la construcción de un emisor central y dos interceptores profundos que permitirían el desagüe por gravedad desde la Ciudad hasta la desembocadura en el Río El Salto, cercano a la Presa Requena en el Estado de Hidalgo. Entre las justificaciones del proyecto se incluyeron: mantener en servicio la red de alcantarillado y aprovechar las aguas residuales que llegaban a Hidalgo para riego agrícola y usos industriales.

Al final, las obras juntan las aguas pluviales y residuales de la Ciudad de México, las canalizan por el emisor central el cual desemboca en el Río El Salto, que es un afluente del Río Tula, continua hasta llegar a la Presa Endhó y se distribuye por una red de canales para ser utilizadas en los terrenos agrícolas de los distritos de riego hidalguenses más cercanos como son el Distrito de Riego (DR) 003 Tula y 100 Alfajayucan (IMTA, 2016).

Fue así como el Valle del Mezquital en Hidalgo se ha convertido en un ejemplo único de reutilización de aguas residuales, ya que tiene una antigüedad de más de 100 años y hoy en día abarca un área de 90,000 Ha.

Actualmente, los 52 m³/s de aguas residuales que llegan de la Ciudad de México representan un recurso hídrico importante en la región semiárida del Valle y permite el cultivo de maíz, alfalfa, avena forrajera, colza, centeno y algunos vegetales como calabacín, coliflor y chiles, entre otros, con una producción promedio de 10 Ton/Ha que ha superado la media nacional. Su uso para riego se autorizó en 1912 y a partir de ese año, a medida que incrementa el agua vertida, también lo hace la superficie de tierra regada (UNU-FLORES, 2017).

Imagen 1. Ubicación del Valle del Mezquital



En la **¡Error! No se encuentra el rigen de la referencia.** se observa la Zona del Valle del Mezquital (Verde) y como a través del Gran Canal, Interceptor Poniente y Emisor Central llegan las aguas residuales desde la Ciudad de México.

La llegada de las aguas residuales al Valle del Mezquital ha representado dos ventajas principalmente: se evita el riesgo de pérdida de cultivos por sequía y gracias a su infiltración se logra una recarga de más del 90% del acuífero que se encuentra más cerca de la superficie ya que se ha calculado una recarga artificial de $25\text{m}^3/\text{s}$ lo que representa 2.16 millones de m^3 por día (UNU-FLORES, 2017).

Por otra parte, se han realizado varios estudios en la zona en busca de determinar impactos negativos en el ambiente o en la salud humana derivados del riego con este tipo de recurso. Al final de las investigaciones, se asoció al riego con aguas residuales a un mayor riesgo de contraer infecciones intestinales por helmintos y protozoarios de vida libre como *Entamoeba histolytica*, así como un factor que influye en la prevalencia de infecciones gastrointestinales (ídem).

2.4 Monitoreo y parámetros de calidad de agua

De acuerdo con el United Nations Environmental Programme (UNEP), el monitoreo de la calidad del agua es una herramienta fundamental en el manejo de los recursos hídricos; se puede definir como un proceso de análisis, interpretación y comunicación de aquellas propiedades dentro del contexto de la actividad humana y el uso y conservación del medio ambiente. No es un proceso fijo, sino que se adapta a las necesidades, instituciones, prioridades y recursos locales, nacionales o internacionales.

Se menciona también que dentro de sus objetivos están: proporcionar información útil para una correcta gestión y verificar si la calidad del agua observable es adecuada para los usos previstos. Al mismo tiempo un buen monitoreo es útil para determinar tendencias en la calidad del medio acuático y cómo es afectado por la emisión de contaminantes ya sea derivados de la actividad humana o de la descarga de aguas residuales. Recientemente el monitoreo también ha sido utilizado para estimar nutrientes o flujos de contaminantes descargados desde los ríos o aguas subterráneas hacia lagos u océanos.

Por otra parte, se especifica que el monitoreo de la calidad del agua puede ser conducido desde diferentes perspectivas y dependiendo de los objetivos particulares entre los cuáles se pueden incluir los mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5. Tipos de monitoreo

Tipos de monitoreo	Cuestionamientos que responde
<i>Usos de agua</i>	¿El agua cumple con los requerimientos de cantidad y calidad de agua?
<i>Influencias del uso directo por seres humanos o procesos naturales</i>	¿Cuáles son esas influencias?
<i>Impactos en la calidad de agua</i>	¿Cuáles son los cambios registrados y su magnitud de afectación?
<i>Control y regulación de calidad de agua</i>	¿Cuál es la capacidad del agua para asimilar contaminantes? ¿son apropiadas y efectivas las estrategias de control?
<i>Posición geográfica y usos</i>	¿Cómo cambia la calidad del agua geográficamente en relación con los usos dados?
<i>Histórico</i>	¿Cómo influyen las tendencias pasadas y las políticas a la calidad del agua en el presente?
<i>Tendencias futuras</i>	¿Cómo los factores de calidad de agua en el pasado y presente, así como las actividades planeadas proporcionan una imagen de tendencias futuras? ¿Cuáles serán esas tendencias?
<i>Influencia</i>	¿Cómo la calidad del agua influye en otras partes del medio, como las costas marinas, suelos, biota, humedales?

Fuente: Elaboración propia con base en UNEP, 1996

Lo que se puede medir en los monitoreos es la calidad de agua en función del control de un conjunto de parámetros (UICN, 2018). Según la Real Academia de Lengua Española (RAE) un parámetro es “un dato o factor que se toma como necesario para analizar o valorar una situación” (Real Academia Española, 2019).

Por otra parte, la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los Límites Máximos Permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, dicta que un parámetro es una “variable que se utiliza como referencia para determinar la calidad física, química y biológica del agua” (DOF, 1997, pág. 12).

Para determinar si el agua tiene la calidad adecuada para determinado uso, se establecieron en las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes, Límites Máximos Permisibles (LMP), que son los valores máximos a los que puede llegar cada parámetro para ser considerado apto para el uso que se le planea dar.

Los parámetros de interés en lo que a aguas residuales domésticas se refiere se dividen, según Eriksson, Henze, Auffarth, & Ledin, en 2001, de la siguiente manera:

1. Parámetros físicos: Temperatura, Color, Contenido de Sólidos Suspendidos Totales y Turbidez.
2. Parámetros químicos: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), presencia de nutrientes como Nitrógeno (N) y Fósforo (F) y Contenido de Metales pesados como Aluminio (Al), Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Plomo (Pb), Mercurio(Hg), Zinc (Zn), Níquel (Ni) o Cromo (Cr).

Parámetros físicos

- Temperatura.

La temperatura es la medida de la “cantidad de calor que está contenida en el agua residual influye en gran medida en la composición física, química y biológica de cualquier cuerpo de agua” (Ramos Olmos, Sepúlveda Marqués, & Villalobos Moreto, 2003, pág. 74), favorece el crecimiento microbiano y puede inducir precipitación en aguas super saturadas (Eriksson, Auffarth, Henze, & Ledin , 2001).

Ramos Olmos *et al* (2003) mencionan que un ejemplo de afectación por cambios de temperatura es cuando ésta se incrementa y al mismo tiempo aumenta la velocidad de biodegradación de los compuestos orgánicos pero la solubilidad del oxígeno en el agua disminuye. Los mismos autores hacen énfasis en que, dependiendo de varias condiciones externas, es común que la temperatura del agua residual sea mayor que la del agua suministrada debido a las descargas de agua caliente derivado de actividades domésticas, afirman que generalmente la temperatura media anual que se registra en las aguas residuales tiene un rango que va de los 10° C a los 21.1° C, con un valor medio de 15.6° C, de tal forma que concluyen que dentro del tratamiento del agua residual doméstica, son importantes los efectos de la temperatura en los procesos de autopurificación de los desechos orgánicos ya que tales efectos repercuten en la rapidez de estabilización de la materia orgánica, el nivel de saturación de oxígeno disuelto y la velocidad de aeración.

- Color.

Las aguas residuales domésticas son usualmente caracterizadas por su color ocre debido a las heces y SST. Sin embargo, también puede presentar colores amarillos como consecuencia de la orina, colores grises si hay mayor presencia de agua usada en la cocina, lavabos, baños o lavandería (Universidad Técnica de Hamburgo, 2019) o colores negros cuando el tiempo de recolección no es tan inmediato y se desarrollan condiciones anaerobias. Si la coloración del agua residual es debida a sustancias naturales en descomposición no se considera como tóxica o perjudicial, pero si representa un efecto antiestético (Ramos Olmos, Sepúlveda Marqués, & Villalobos Moreto, 2003).

- Contenido de Sólidos Suspendidos Totales (SST).

Los sólidos suspendidos comprenden la fracción de partículas sostenidas en la columna de agua, pueden ser sedimentables, flotantes y no sedimentables y se componen de sustancias orgánicas volátiles o inertes no volátiles. En el control de la contaminación de efluentes todos los sólidos suspendidos se consideran sedimentables ya que con el paso del tiempo y por descomposición bacteriana o floculación esos sólidos serán precipitados y sedimentados (Ramos Olmos, Sepúlveda Marqués, & Villalobos Moreto, 2003).

Los efectos de los SST en los cuerpos receptores varían según su composición, sin embargo, los efectos más notables son la interferencia de la luz solar/turbidez y el azolve de los cuerpos de agua (Delgadillo, Camacho, F. Pérez, & Andrade, 2010).

En Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, los SST son importantes como indicadores de la efectividad de los procesos de tratamiento del agua (Ramos Olmos, Sepúlveda Marqués, & Villalobos Moreto, 2003) ya que un decremento en los niveles de salida respecto a los de entrada dejan claro que el sistema de tratamiento está funcionando.

- Turbidez.

Es la “nubosidad en el agua causada por partículas suspendidas como arcillas y limos... o por partículas orgánicas como restos de plantas y organismos” (OMS, 2017, pág. 3). A medida que la turbidez incrementa, se reduce la claridad del agua, y aunque por sí sola no siempre representa un riesgo directo para la salud pública, si puede indicar la presencia de microorganismos patógenos (*ídem*).

Este parámetro “se mide al hacer a travesar un haz de luz a una muestra, y cuantificar la concentración de partículas suspendidas. Entre más partículas estén presentes en una solución, mayor será la turbidez” (Hanna Instruments, 2020, párrafo 2).

Junto con los SST, las mediciones de turbidez también contribuyen a dar información sobre el contenido de partículas y coloides que pueden provocar el atascamiento de cañerías (Eriksson, Auffarth, Henze, & Ledin , 2001) o en su caso de PTARs, por lo cual es importante realizar mediciones de turbidez del agua antes y después del tratamiento para que los operadores puedan reconocer si es necesario realizar algún tipo de mantenimiento o limpieza (OMS, 2017).

Parámetros químicos

- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).

Es la “estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua” (DOF, 2001, pág.1).

El Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA) de Uruguay indica que la DBO “mide la cantidad de oxígeno consumido por los microorganismos en la oxidación química de la materia orgánica contenida en la muestra de agua, durante un intervalo de tiempo específico (5 días) y a una temperatura determinada ($20\text{ °C} \pm 1$)” (MVOTMA, 2019, párrafo 3).

Este parámetro es ampliamente usado en el control de contaminantes acuíferos ya que permite conocer el oxígeno requerido por la carga orgánica de descargas domésticas para su oxidación si esos desechos son vertidos a cuerpos de agua naturales con condiciones aeróbicas (Ramos Olmos, Sepúlveda Marqués, & Villalobos Moreto,

2003) y es también uno de los parámetros básicos usados en el manejo y planeación de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.

Básicamente, la DBO se debe a: 1) Materiales orgánicos que son utilizados como alimento por organismos aeróbicos, 2) Nitrógeno oxidable debido a la presencia de nitritos, amoníaco y compuestos orgánicos nitrogenados en general, dando como resultado la formación de nitritos y nitratos, y 3) Compuestos químicos reductores que se oxidan por Oxígeno disuelto (Ramos Olmos, Sepúlveda Marqués, & Villalobos Moreto, 2003).

- Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Es una medida aproximada de la cantidad de Oxígeno consumida en el proceso de oxidación química, tomando en cuenta tanto constituyentes orgánicos como productos inorgánicos finales (DOF, 2013). Por lo anterior, es común que los valores de DQO sean más altos que los de DBO.

La DQO se utiliza como indicador de la presencia de sustancias contaminantes en el agua (SEMARNAT, 2014). Sin embargo “en México y de manera general en América Latina se tiene poca información sobre el padrón típico de las fracciones de DQO en Aguas Residuales Domésticas y Municipales” (Fall *et al.*, 2011 en Vazquez , Ortega , Esparza , & Fall, 2013, pág 22).

- Concentración de nutrientes.

Nitrógeno (N), Fósforo (F) y Carbono (C)), son nutrientes esenciales para el crecimiento de especies vegetales, sin embargo en medios acuáticos pueden favorecer el crecimiento de una vida acuática no deseada y cantidades excesivas en el suelo también pueden provocar contaminación del agua subterránea (Ramos Olmos, Sepúlveda Marqués, & Villalobos Moreto, 2003).

- El Nitrógeno puede estar presente en sus diferentes formas por lo que utiliza como referencia el Nitrógeno Total que “es una medida de todas las varias formas de nitrógeno que se encuentran en una muestra de agua ... consiste en formas inorgánicas y orgánicas. Las formas inorgánicas incluyen el nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-), el amoníaco (NH_4^+)” (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2011, pág. 1).

- El Fósforo existe “en aguas naturales y residuales principalmente en forma particulada inorgánica u orgánica y en una menor fracción en forma disuelta” (MVOTMA, 2019, párrafo 4) por lo que se utiliza la medida del Fósforo Total para medir la “cantidad de fósforo disponible en forma orgánica e inorgánica, disuelta y particulada en los sistemas acuáticos” (*idem*).
- El Carbono. Puede estar presente de forma disuelta o suspendida, por lo que se utiliza el Carbono Orgánico Total (COT) para caracterizar el contenido de este elemento en tales formas en aguas naturales y residuales (Ramos Olmos, Sepúlveda Marqués, & Villalobos Moreto, 2003).
- Contenido de metales pesados.

De acuerdo con un estudio realizado cerca del Municipio de Tepeji, el Cd, Pb, Cr y Zn presentes en el agua residual usada para riego en la zona, pueden acumularse en la capa arable de los suelos al pasar del tiempo; pasados 80 años, la presencia de estos metales en las plantas será moderada debido a la capacidad amortiguadora y de filtración del suelo. Por otra parte, también menciona el comportamiento del Cu que presentó menor disponibilidad de absorción por las plantas debido a que es inmovilizado por la materia orgánica del suelo (Siebe, 1994).

En la Tabla 6 se hace una comparación de la composición de las aguas residuales domésticas típicas sin tratar tomando en cuenta algunos parámetros anteriormente mencionados

Tabla 6. Composición típica de aguas residuales domésticas sin tratar

Parámetro	Concentración (mg/l)		
	Fuerte	Media	Débil
Sólidos Suspendidos Totales	350	220	100
Temperatura	21.1°C	15.6°C	10°C
Demanda Bioquímica de Oxígeno	400	220	110
Demanda Química de Oxígeno	1000	500	250
Nitrógeno total	85	40	20
Orgánico	35	15	8

Amoniaco libre	50	25	12
Nitratos y nitritos	0	0	0
Fósforo total	15	8	4
Orgánico	5	3	1
Inorgánico	10	5	3
Carbono Orgánico Total	290	160	180

Fuente: *Elaboración propia con base en Ramos Olmos, Sepúlveda Marqués, & Villalobos Moreto, (2003)*

De los parámetros arriba mencionados, en la Tabla 7 se enlistan los que serán estudiados en este trabajo

Tabla 7. Parámetros de calidad de agua a monitorear

Nombre del parámetro
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)
Demanda Química de Oxígeno (DQO)
Sólidos Suspendidos Totales (SST)
Temperatura en °C
pH

Fuente: *Elaboración propia (2020)*

Se eligieron estos parámetros ya que, al tratarse de aguas residuales domésticas es relevante conocer la carga de sólidos y materia orgánica presente en las distintas etapas del tratamiento y en el efluente. Diferencias importantes entre DBO y DQO pueden evidenciar presencia de materia orgánica no degradable biológicamente y dar pauta al desarrollo de nuevas investigaciones para su determinación; los datos de SST aportarán información sobre el contenido de materia inorgánica que llega a los cárcamos, mientras que cambios bruscos en la temperatura y pH pueden ser indicadores de algún fenómeno particular que requiera atención. En su conjunto, la determinación de estos parámetros brinda un panorama general del tipo de contaminación que se tiene y sobre todo del papel que tienen las PTARs para su remoción, además se tiene la oportunidad de observar el comportamiento de estos cinco parámetros en las diferentes localidades del municipio dónde están ubicadas las Plantas, lo cual permite ampliar los resultados del estudio y conocer si hay variaciones importantes entre un lugar y otro.

2.5 Tecnologías de medición de parámetros de calidad de agua

Bhardwaj, Gupta, & Gupta (2015) mencionan que los métodos tradicionales de laboratorio como medición UV, Espectrometría de masas, técnicas ion-electrodo y sensores amperométricos representan un gasto importante de tiempo, así como pérdida de sensibilidad y selectividad y por lo tanto se considera que el uso de dichos métodos tradicionales ya no es asequible en la actualidad. Desde un punto de vista personal, los métodos mencionados han servido y permitido el desarrollo de investigaciones y conocimientos en diferentes ramas de la ciencia; específicamente en las ciencias ambientales tienen aplicaciones importantes para el estudio de diversas matrices, sin embargo, es verdad que hoy en día la demanda de mediciones y monitoreos crece a medida que lo hacen también las problemáticas y nuevos cuestionamientos sobre el comportamiento de la naturaleza.

Para responder a lo anterior, Bhardwaj, Gupta, & Gupta (2015) destacan el desarrollo de varias tecnologías con equipos modernos de detección de calidad de agua en tiempo real como los sensores ópticos, sondas y bio-sensores los cuáles han presentado alta sensibilidad, selectividad y respuesta de tiempo rápida brindando la posibilidad de llevar a cabo análisis in situ y en tiempo real con alta confiabilidad y mínimos requerimientos de preparación de muestra.

Paralelamente, la Comisión Europea ha afirmado que existe una necesidad de incrementar los monitoreos en línea, debido a que los existentes métodos de laboratorio consumen demasiado tiempo en desarrollar respuestas operacionales lo que se traduce en una falta de protección a la salud pública en tiempo real (Comisión Europea, 2013)

Bhardwaj, K. Gupta, & Gupta, (2015) mencionan también que los sensores ópticos se caracterizan generalmente porque miden los cambios en las propiedades visibles del agua. Consisten en la combinación de sensores ópticos e indicadores activos, éstos últimos cambian sus propiedades según la concentración del parámetro que se va a medir.

Los mismos autores afirman que estos sensores ópticos son aptos para la detección de impurezas visibles o de impurezas que responden con el cambio de luz; el Oxígeno Disuelto, pH, Turbidez y el cloro residual pueden ser medidos por estos sensores ya que responden con cambios de luz.

Si bien hoy en día no es la técnica más usada para darle seguimiento a la calidad de agua en nuestro país, varios autores afirman que su uso está incrementando a nivel mundial y este aumento, así como los avances continuos en el monitoreo remoto en tiempo real y en la tecnología de sensores para ello, se convertirá progresivamente en una herramienta cada vez más importante para evaluar la calidad de agua ya que permite detectar y responder rápidamente a los problemas ambientales que se presenten (B. Glasgow, M. Burkholder, Reed, Lewitus, & Kleinman, 2004).

2.5.1 Tecnología S::CAN

Dentro de la creciente gama de nuevas empresas y equipos disponibles para el monitoreo de parámetros de agua, se encuentra S::CAN, una empresa de origen Austríaco que ha desarrollado innovadores instrumentos para dicho fin y es considerada como la empresa líder mundial en espectrometría UV remota por la Unión Europea (S::CAN, 2020)

Actualmente S::CAN tiene presencia internacional ya que ofrece sistemas de monitoreo y software para fines medioambientales de calidad de agua potable o residual industrial o municipal.

Esta empresa ha lanzado al mercado diferentes equipos como sondas espectrales, sensores, así como las terminales y su software para la lectura de los análisis en sitio, de tal forma que hoy en día es la empresa líder mundial en sondas espectrofotométricas sumergibles para aplicaciones medioambientales, de agua potable y residual urbana e industrial (S::CAN, 2020)

Para la realización del monitoreo del aguas de las PTARs se utilizarán los siguientes equipos de la empresa S::CAN: Spectro::lyser INFLUXXXV1xx de 2 mm para mediciones en los afluentes, Spectro::lyser EFFLUXXXV1xx de 5 mm para realizar monitoreos en los efluentes, así como el con::cube y moni::tool para la conexión de los sensores y el almacenamiento y visualización de la información. Estos equipos son descritos con mayor detalle en el Capítulo 3.

Trabajos de medición de calidad de agua con equipos de la empresa S::CAN

Actualmente existen en diferentes partes del mundo, estaciones de monitoreo de aguas residuales industriales y municipales tanto en los afluentes como en los efluentes de cuerpos

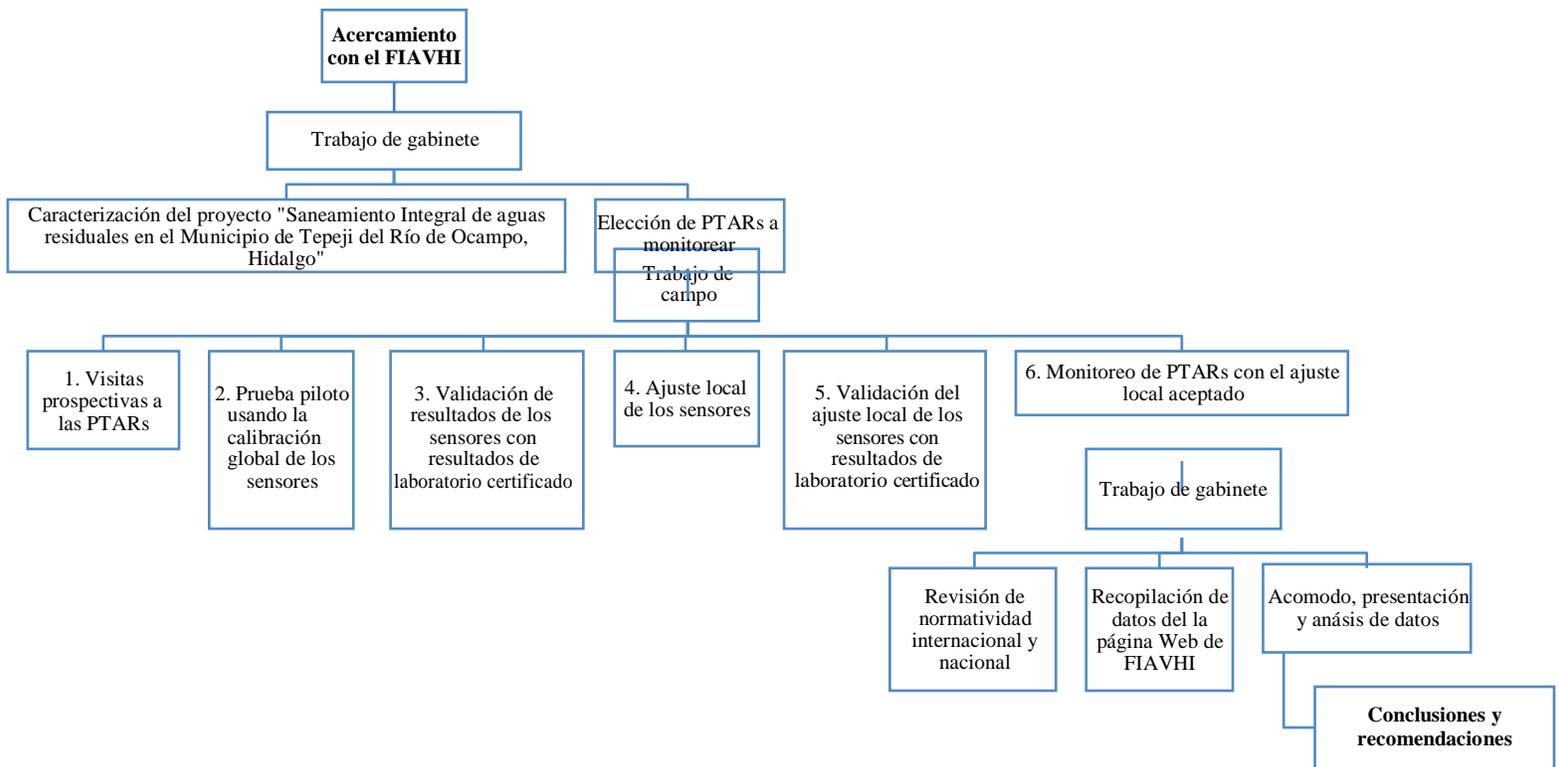
de agua que están equipadas con productos S::CAN, algunos de los mencionados en su página web www.s-can.at son:

- Monitoreo del Río Ganges, India. Se han instalado 36 estaciones de monitoreo a lo largo y ancho del río, lo que permite que el Gobierno tenga conocimiento de los datos de calidad de agua ya que se ha visto alterada por descargas industriales, aumento poblacional y costumbres locales.
- Monitoreo industrial, Suiza. Monitoreo con cuatro sondas s-can en una Planta de Tratamiento de agua construida dentro de las instalaciones de la industria lechera Mittelland Molkerei que es conocida como la empresa más grande de su ramo en Suiza.
- Escorrentía de aguas pluviales, Malasia. La escorrentía de agua de lluvia trae consigo fuentes importantes de contaminación a las aguas superficiales, por ello, en las zonas más urbanizadas de Kuala Lumpur se ha dado seguimiento a parámetros de DQO, DBO, DQO filtrado, nitratos, nitritos, SST, turbidez, Carbono Orgánico Disuelto y Carbono Orgánico Total de dichas aguas de escorrentía con una sola sonda de s-can que es el *spectro:lyser*. Este monitoreo ha permitido el desarrollo de mejores prácticas de manejo y tratamiento.
- Monitoreo del Río Atoyac, México. Con el objetivo de identificar las fuentes de la contaminación que llega a este río, en el 2012 se instalaron nueve diferentes estaciones de monitoreo que obtienen datos de 20 parámetros diferentes que aportan a la toma de decisiones para su control y saneamiento.

Capítulo 3. Metodología

En este Capítulo se explica el proceso metodológico que se siguió para el desarrollo de esta investigación. Al ser un estudio de caso, con variables cuantitativas, cualitativas y distintos actores involucrados, existieron diferentes etapas tanto de trabajo de gabinete como de trabajo de campo, que resultaron en un compendio de diferentes puntos tales como la caracterización de todas las PTARs que conforman el proyecto del FIAVHI pero con información ampliada de las nueve PTARs monitoreadas, la planeación y los pasos seguidos durante los monitoreos, la legislación mexicana que se tomó como base para elaborar el análisis de resultados y las conclusiones presentadas. Con el fin de proporcionar una visión integral del proceso, se muestra la Imagen 2 que representa de manera esquemática todo el proceso metodológico:

Imagen 2. Proceso metodológico



Fuente: Elaboración propia (2020)

3.1 Introducción al estudio de caso

Para la realización de este trabajo de tesis se utilizará el método de Estudio de Caso, con un enfoque metodológico mixto ya que se trabaja con parámetros cualitativos y cuantitativos debido a las características del caso que se describen a continuación:

Debido a la problemática de aguas residuales del Municipio de Tepeji del Río, desde el 2015 se puso en marcha el proyecto “*Saneamiento Integral de aguas residuales en el Municipio de Tepeji del Río de Ocampo, Hidalgo*” impulsado por el Gobierno Municipal y el Fideicomiso de Infraestructura Ambiental de los Valles de Hidalgo.

El proyecto consistió en primera instancia en la implementación de PTARs en diferentes comunidades del municipio, al día de hoy se han construido 18 de ellas en diferentes localidades seleccionadas por el Gobierno Municipal tomando en cuenta su orografía, el sistema de drenaje y por supuesto, sus problemáticas y necesidades sociales por lo tanto, cada una de ellas tiene características propias aunque con el mismo principio de tratamiento.

Además de las PTARs, actualmente se está desarrollando un Sitio Web con Sistema de Información Geográfica que permite tener acceso a la información de los monitoreos de la calidad del agua de cada una de las Plantas de Tratamiento de forma remota y en tiempo real. Por último, desde el año 2018 se inició la construcción de un proyecto piloto de Edificio Verde Cero descarga único en su tipo en el país por sus características: 1) manejo integrado de agua potable, agua residual gris, agua residual negra, agua pluvial y agua de riego, 2) estacionamiento verde, 3) Construido con acero ligero de alta resistencia, 4) Manejo de Residuos y 5) Energías eléctricas alternativas.

Como se observa, el proyecto del FIAVHI tiene muchas vertientes, sin embargo, este trabajo se centra en las primeras que son las PTARs, el monitoreo y el seguimiento de los datos de forma remota a través de la página web.

Se eligió este caso para su estudio debido a que presenta la oportunidad de conocer y evaluar el funcionamiento de diferentes PTARs que son únicas en su tipo y tienen sus características propias de acuerdo con su localización. También se tiene la oportunidad de realizar las

mediciones de parámetros del agua con el uso de nuevos instrumentos como las sondas de tecnología S-CAN que es poco conocida en México, pero ha demostrado su viabilidad en otras partes del mundo y se va haciendo presente poco a poco en nuestro país. Por último, este caso es relevante ya que están totalmente involucrados aspectos sociales, económicos, políticos y por supuesto medioambientales que deben funcionar en conjunto para el éxito del proyecto.

3.2 Caracterización del proyecto “*Saneamiento Integral de aguas residuales en el Municipio de Tepeji del Río de Ocampo, Hidalgo*”

El punto de inicio para este trabajo fue la recopilación de literatura con el fin de ahondar en el tema del uso de aguas residuales en la agricultura, comenzando por la problemática de la escasez del recurso, su contaminación por diversas fuentes y el uso inseguro o seguro según el caso, de las aguas residuales para el cultivo de alimentos dando como resultado la formación del primer Capítulo de esta tesis.

En esta primera fase, también se logró el acercamiento directo con FIAVHI para conocer el proyecto que se está desarrollando en Tepeji y tener oportunidad de realizar y analizar los resultados del monitoreo de las PTARs.

Para la identificación y caracterización de las PTARs del Municipio de Tepeji del Río y con el fin de fundamentar este estudio, se realizó trabajo de gabinete para recabar información acerca del funcionamiento y localización de cada una de las Plantas, una vez estudiada la información teórica se programaron 3 primeras visitas prospectivas, programadas según la cercanía en su ubicación para recorrerlas todas en los días estipulados para ello.

Resultado de la investigación teórica, las visitas prospectivas y de acuerdo con el “*Manual de operación para las plantas de tratamiento de aguas residuales, con diversos reusos, Tepeji del Río, Hgo.*” elaborado por el Fideicomiso de Infraestructura Ambiental de los Valles de Hidalgo (2019) las PTAR funcionan de la siguiente manera:

Es importante mencionar que todas las PTAR en principio funcionan como un tratamiento en donde el agua corre por gravedad y sólo es necesario el uso de equipo electromecánico para mover el agua en sitios en donde no se tienen las características del terreno para hacerlo de dicha forma.

Tratamiento Primario.

Sistema de cribas

Esta primera fase del tratamiento consiste en un sistema de cribas con diferentes grosores ubicado en el “*canal de entrada o recepción*” del agua residual. Dicho canal puede tener una longitud de 1.5 a 3.0 m de longitud con una separación en el centro que propicia la sedimentación de arenas. En esta etapa se logran eliminar envolturas, papeles, cabellos, jabones, maderas y otros objetos grandes o gruesos para que no pasen a las siguientes fases y sea posible la biodigestión de la materia orgánica.

Tratamiento Secundario.

Sedimentación

Cada PTAR tiene varios “*tanques de sedimentación*”. El diseño de las PTARs tipo FIAVHI permite que el agua llegue desde el canal de recepción al primer sedimentador por efecto de gravedad y a través de tuberías y válvulas que en la mayoría de los módulos tiene un flujo de 0.33 L/s.

El primer tanque de sedimentación está además equipado con estructuras laminares que permiten que al caer el agua, vaya subiendo y llenando el tanque lentamente favoreciendo la sedimentación.

El producto de este proceso son los lodos, que se dividen en orgánicos y residuales; los primeros, debido a su menor densidad, suben lentamente para llegar al proceso de biodigestión y son los que contienen los nutrientes de interés para su aplicación en las zonas agrícolas. Por otra parte, los lodos residuales son más pesados y quedan depositados en el fondo del tanque, logrando una primera reducción de SST y materia orgánica, posteriormente, estos son retirados de las PTARs mediante una válvula integrada en los tanques sedimentadores y son llevados al patio de lodos para su posterior composteo.

Biodigestión

Otra fase del tratamiento secundario es la biodigestión. El agua con los lodos orgánicos que poco a poco fue subiendo por los tanques sedimentadores cae por gravedad a través de un sifón invertido a los tanques llamados “*biodigestores*”. Al igual que en los primeros tanques,

el agua va ascendiendo a la vez que recorre los conductos laminares presentes en los biodigestores y que son hospederos de las colonias bacterianas anaeróbicas. Es en esta etapa del tratamiento en donde las bacterias anaeróbicas digieren la materia orgánica para liberar elementos como el potasio, fósforo y nitrógeno que serán posteriormente aprovechados como nutrientes para el riego de zonas agrícolas.

Llegar a la estabilización de estos lechos de bacterias requiere aproximadamente 6 meses y una vez constituidos, las PTARs empiezan a registrar eficiencias mayores al 70%.

El agua resultante de esta etapa es conocida como agua biodigerida y es recomendada por OMS como apta para riego agrícola, incluso sin ser necesario que pase por un tratamiento terciario.

Tratamiento terciario.

Sistema de Humedales Artificiales

Es la última etapa de tratamiento en las PTARs tipo FIAVHI. El agua biodigerida llega a un sistema de tres bloques rectangulares recubiertos con material impermeable y que contienen diferentes tipos de sustrato como tezontle, gravas y arenas que son el primer filtro para el agua en esta fase. Estos sustratos además son la base para el crecimiento de diversas especies de macrófitas que tienen la capacidad de adsorber y absorber metales pesados y algunos pesticidas, entre las más utilizadas en estos humedales son:

- Papiro (*Cyperus papyrus*). Entre los autores que mencionan la utilidad de esta especie en el tratamiento de agua residual están Luna Pabello & Aburto, que en 2014 la incluyeron en su lista de clasificación de especies depuradoras de agua en humedales de flujo subsuperficiales. Se ha registrado también su aplicación en PTARs con una eficiencia en la remoción de DBO (84%), DQO (72%), SST (73 %), coliformes fecales (reducción de 3 a 4 logaritmos) y un margen de pH y temperatura (Torres Guerra, Magno Vargas, Pineda Aguirre, & Cruz Huaranga , 2018).

El ejemplo del uso del Papiro en las PTARs tipo FIAVHI se puede ver en la Imagen 3

Imagen 3. Papiro en PTAR Tlaxinalcalpan



Fuente: Archivo FIAVHI (2018)

- Achira o platanillo (*Canna indica*). Esta especie es también apropiada para el tratamiento del agua mediante humedales ya que Hernández Vásquez (2019), usando un sistema de humedales con esta especie, reportó una remoción del 85.09% de DBO5, 91.92% de DQO, 89.23% de SST, 69.16% de grasas y aceites y 99.93% de coliformes. (Ver Imagen 4)

Imagen 4. Platanillo en PTAR Tlaxinalcalpan



Fuente: Archivo FIAVHI (2018)

- Alcatraz blanco (*Zandechia aethiopica*). Diversos autores mencionan la aplicación de esta especie en el tratamiento de aguas residuales con humedales artificiales. Escamilla y Morgado en su diseño experimental de humedal de flujo vertical para aguas negras y jabonosas reportaron en 2014 un decremento en los niveles de fósforo total, conductividad eléctrica, sólidos totales, sólidos suspendidos, coliformes fecales, DBO, DQO, ortofosfatos y nitritos utilizando especies de alcatraz, además de que se logró una estabilización de pH y buena adaptación y propagación (Escamilla Campos & Morgado Aguilar, 2014).), (ver Imagen 5).

Imagen 5. Alcatraz en PTAR Tlaxinacalpan



Fuente: Archivo FIAVHI (2018)

No todas las PTARs tienen el tratamiento terciario de humedales, la mayoría llegan al tratamiento secundario, tal y como se indica en la Tabla 8 de especificaciones de las PTARS, en donde además se muestran los litros por segundo que puede tratar cada una, los reusos para los que son destinados, su ubicación geográfica y si se encuentran actualmente activas o no.

Tabla 8. Características de las PTARs del Municipio de Tepeji del Río

Nombre por ubicación de las PTAR'S	m ³ /día*	BD*	SD*	Reuso destinado	H*	PS*	Estado
1. San Buenaventura 1	34.56	12	4	áreas verdes	No	No	Activa
2. San Buenaventura 2	51.84	9	3	Agrícola (parcelas aladañas)	Si	Si	Activa
3. Tlapanaloya 1	103.68			Agrícola (parcelas aladañas)			
4. Tlapanaloya 2	103.68	18	6	Agrícola (Invernadero y parcelas)			
5. El Carmen	69.12	9	3	Parque ecológico y campo deportivo	No	Si	Rehabilitación
6. Tlaxinalcalpan	69.12	9	3	Agrícola (Parcelas aladañas) y campo deportivo	Si	Si	Activa
7. Caracol	77.76	9	3	áreas verdes	Si	Si	Activa
8. Santa Ana Atzacapotzaltongo	51.84	9	3	Agrícola (Parcelas aladañas) y campo deportivo	Si	Si	Activa
9. Santiago Tlautla	86.4	9	3	áreas verdes	No	No	Activa
10. Magdalena 1	207.36	18	6	Agrícola (Parcelas aladañas)	No	Si	Rehabilitación
11. Magdalena 2	207.36			Agrícola (Parcelas aladañas)			
12. San Ildefonso 1	34.56	9	3	Áreas verdes	No	No	Saqueada
13. San Ildefonso 2	17.28	6	2	Áreas verdes	No	No	Activa
14. San Ildefonso 3	432			Agrícola (Parcelas aladañas)	No	Si	Activa
15. Ojo de Agua 1	69.12	4	2	Agrícola (Parcelas aladañas)	No	No	Activa
16. Ojo de Agua 2	34.56	3	3	Agrícola (Parcelas aladañas)	No	No	Activa
17. Ojo de Agua 3	34.56			Agrícola (Invernadero)	No		Activa
18. Benito Juárez	69.12			Agrícola (Parcelas aladañas)	No	Sí	Activa

*m³/día= metros cúbicos por día (capacidad de tratamiento), BD= Número de Biodigestores en la PTAR, SD=Número de Sedimentadores en la PTAR, H= Humedal, PS= Paneles Solares

Fuente: Elaboración propia (2020) adaptación del Manual de procedimientos largo, FIAVHI, 2018

3.2.1 Características de las PTARs monitoreadas en el caso de estudio

En la tabla 8 se exponen los datos de todas las PTARs construidas por el FIAVHI y como se puede observar hay algunas que se encuentran saqueadas o en rehabilitación, mismas que fueron descartadas para el monitoreo y sólo nueve cumplieron los requisitos para el presente trabajo. Estas Plantas seleccionadas son las que se contextualizan de manera general a continuación:

1. PTAR Benito Juárez:

Esta PTAR, ubicada en la localidad El Salto, comenzó a operar en el año 2019. Fue construida en el espacio anteriormente ocupado por una fosa de drenaje, la cual estaba saturada y era un foco de contaminación ambiental y factor de riesgo para la salud humana.

La PTAR Benito Juárez tiene una capacidad de tratamiento de 1.2 L/s. Actualmente está tratando 0.8 L/s, lo que resulta en 69,120 litros de agua tratados en un día y 25,228.80 m³ anuales.

La última fase de tratamiento en esta PTAR son los biodigestores y el caudal tratado está destinado para el riego de una parcela agrícola y arbolado existente en los alrededores de la Planta. (Ver Imagen 6)

Imagen 6. PTAR Benito Juárez



Cárcamo. PTAR Benito Juárez



Biodigestores. PTAR Benito Juárez



Vista general PTAR Benito Juárez

2. PTAR Caracol

Ubicada en la localidad del mismo nombre, esta PTAR inició operaciones en 2017 y está tratando 0.8 L/s lo que resulta en 69,120 litros tratados en un día y 25,228.80 m³ en un año.

Esta PTAR tiene humedales instalados, sin embargo, no se obtuvieron mediciones de dicha fase del tratamiento debido a que el día del muestreo se encontraron fuera de operación sin previo aviso.

Antes de la construcción de esta PTAR, el terreno en dónde está ubicado era un espacio baldío descuidado e incluso un foco rojo en cuestiones de seguridad de la comunidad. En el proceso de construcción de la Planta, se rehabilitó por completo todo el terreno y hoy en día es un área verde con diversidad de especies vegetales bajo el proyecto de consolidarse como área recreativa familiar en un futuro próximo. Todo el efluente es utilizado para el riego de las áreas verdes mencionadas.

En esta PTAR, aunque tiene el perímetro cercado, se han presentado diversos robos de material, por lo que se trabaja en conjunto con el comité encargado para encontrar solución a este problema. (Ver Imagen 7)

Imagen 7. PTAR Caracol.



Biodigestores. PTAR Caracol



Cárcamo. PTAR Caracol

Fuente: Tomada de trabajo de campo (2020)

3. PTAR Ojo de Agua II

Esta Planta de la Localidad de Ojo de Agua fue construida y puesta en marcha en 2014. Tiene una capacidad de tratamiento de 0.8 L/s, de los que actualmente sólo está recibiendo 0.4 L/s, resultando 34,560 litros tratados en un día y 12,614.4 m³ anuales.

El agua tratada de esta PTAR no está siendo aprovechada para el riego agrícola que fue planeado derivado de cuestiones sociales, por lo tanto, el efluente se está descargando en las áreas verdes más aledañas a su ubicación. (Ver Imagen 8)

Imagen 8. PTAR Ojo de Agua II



Cárcamo. PTAR Ojo de Agua II

Fuente: Tomada de trabajo de campo (2020)

4. PTAR Ojo de Agua III

La tercera Planta de Ojo de Agua comenzó a trabajar en 2019, al igual que la Planta II de esta comunidad, está tratando diariamente 0.4 L/s que representan 12,614.4 m³ anuales de aguas residuales tratadas utilizadas, en este caso para el riego de un invernadero de hortalizas, principalmente de jitomate

La suma de agua tratada por las dos PTARs en esta comunidad es de 25,228.8 m³ anuales. (Ver Imagen 9)

Imagen 9. PTAR Ojo de Agua III



Vista general PTAR Ojo de Agua III



Interior de biodigestores. PTAR Ojo de Agua III

Fuente: Tomada de trabajo de campo (2020)

5. PTAR San Buenaventura I

Inició a operar en el año 2015 y el efluente reportado hoy en día es de 0.4 L/s que significan un total de 12,614.4 m³ de aguas residuales domésticas tratadas por esta Planta en un año, aunque está diseñada para tratar lo doble.

El afluente de esta Planta está ocupado para el riego de árboles, principalmente fresnos cercanos a la Planta. (Ver Imagen 10)

Imagen 10. PTAR San Buenaventura I



Cárcamo y Biodigestores. PTAR San Buenaventura I



Cárcamo, Biodigestores y área verde regada con Agua Residual Tratada. PTAR San Buenaventura I

Fuente: Tomada de trabajo de campo (2020)

6. PTAR San Buenaventura II

La segunda planta de esta comunidad comenzó el tratamiento de agua en 2017. Con diseño para tratar 1.2 L/s, está operando a la mitad de su capacidad, es decir 0.6 L/s, que resultan en 51,840 litros diarios y 18,921.6 m³ cada año, las diferencias principales con la PTAR I es que esta segunda obra cuenta con paneles solares y sistema de humedales. Esta planeado utilizar el efluente de esta PTAR para el riego de una parcela propiedad de un agricultor aledaño a la ubicación de la Planta, sin embargo, aún no se tienen todos los arreglos materiales y técnicos para hacerle llegar el agua por lo que se ha estado utilizando para el riego de áreas verdes. (Ver Imagen 11)

La suma de agua tratada en esta comunidad es de 31,536 m³ anuales.

Imagen 11. PTAR San Buenaventura II.



Vista general PTAR San Buenaventura II



Paneles solares y biodigestores. PTAR San

Fuente: Tomada de trabajo de campo (2020)

7. PTAR San Ildefonso II

Puesta en marcha en 2015, la capacidad de tratamiento instalada en esta Planta es de 0.4 L/s, actualmente trabaja con 0.2 L/s, es decir 17,280 litros diariamente y 6,307.2 m³ cada año. Esta Planta trabaja a la mitad de su capacidad ya que los vecinos que pueden ser beneficiarios de este servicio no han decidido conectar su drenaje a la Planta, convirtiéndose de esta forma, en la PTAR que menor aforo tiene actualmente. (Ver Imagen 12)



Biodigestores PTAR San Ildefonso 2



Cárcamo y biodigestores. PTAR San Ildefonso 2

Fuente: Tomada de trabajo de campo (2020)

8. PTAR San Ildefonso III

Iniciando operaciones en 2019 con un caudal de 05 L/s, y al contrario de la PTAR I de esta comunidad, es la de mayor capacidad de tratamiento construida hasta ahora. Los 05 L/s se convierten en 432,000 litros diarios y 157,680 litros anuales. Sumados a los datos de la Planta 2, esta comunidad recibe el beneficio de 163,987.2 m³ de aguas residuales que no se descargan los cuerpos de agua de la localidad.

Esta PTAR es la que reporta los valores más grandes tanto en los afluentes como en los efluentes. Estos datos se relacionan al hecho de que es la Planta con mayor aforo, pero sobre todo al contenido de materia presente en el agua que es recibida. Se ha observado en el cárcamo de entrada una mayor carga de materiales orgánicos e inorgánicos suspendidos en comparación con la recibida en otras PTARs, a simple vista se observa que dicha carga está compuesta principalmente por semillas y residuos agrícolas que se atribuyen al estilo de vida, hábitos y las ocupaciones principalmente agrícolas de los habitantes conectados a la Planta. (Ver Imagen 13)

Imagen 13. PTAR San Ildefonso III.



Vista general PTAR San Ildefonso III

Fuente: Tomada de trabajo de campo (2020)

9. PTAR Santa Ana Atzacapotzaltongo

Esta PTAR, que comenzó a operar en 2018 fue diseñada para tratar 1.2 L/s de agua, hoy en día las casas conectadas representan un flujo de solamente 0.6 L/s, que resultan en 51,840 litros diarios y 18,921.6 m³ cada año.

Todo el efluente es utilizado para el riego del campo de fútbol que se encuentra ubicado al lado del sistema de humedales y es un caso de éxito en cuanto al trabajo con los agentes sociales que se involucran, en este caso el comité de futbol ya que es el encargado del riego y cuidado del material usado. (Ver Imagen 14)

Imagen 14. PTAR Santa Ana Atzacapotzaltongo.



Cárcamo, biodigestores y paneles solares. PTAR Santa Ana Atzacapotzaltongo

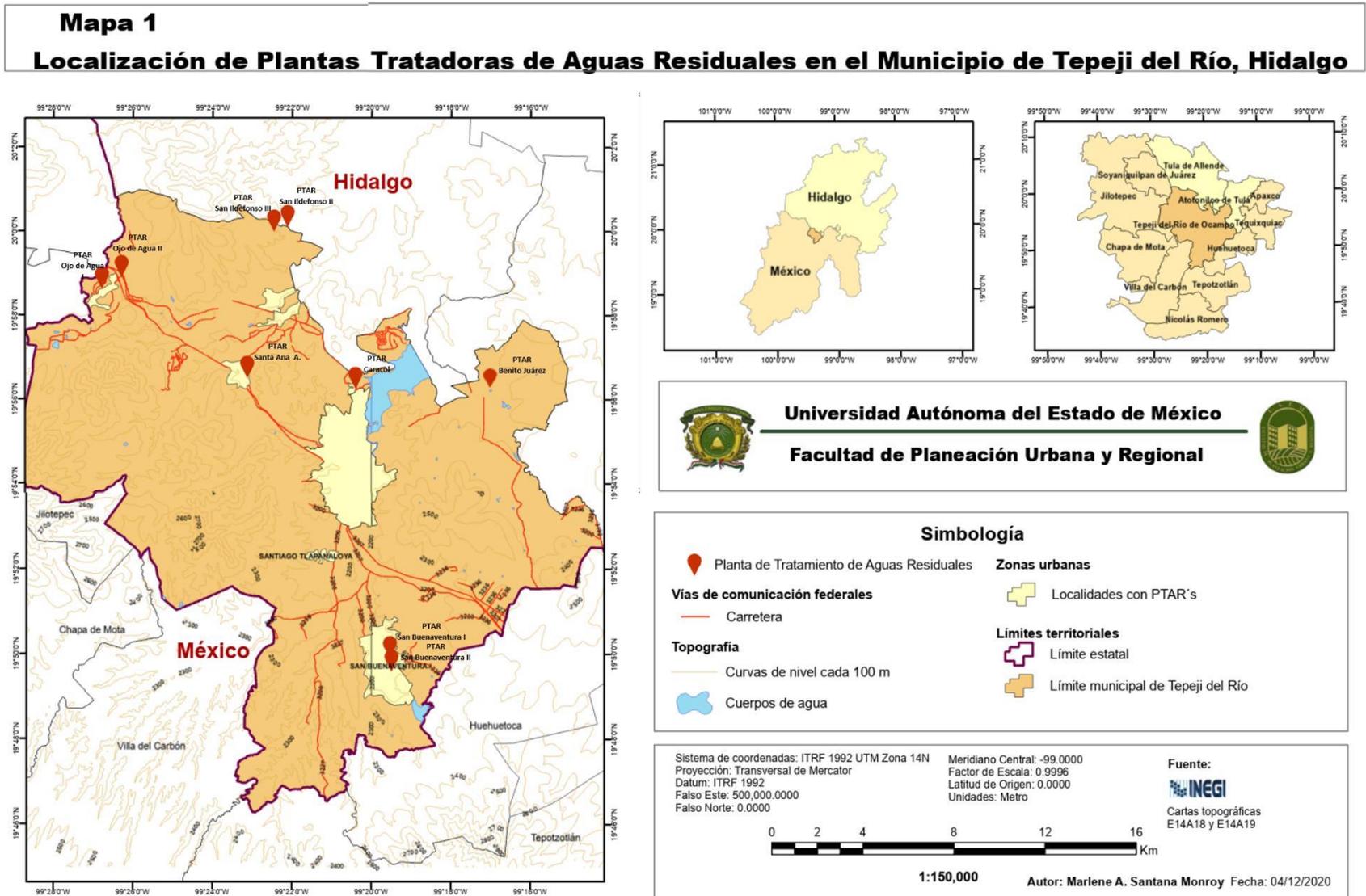


Sistema de humedales y área de riego. PTAR Santa Ana Atzacapotzaltongo

Fuente: Tomada de trabajo de campo (2020)

Para una contextualización geográfica de las PTARs que se monitorearon en este trabajo, en la Imagen 15 se muestra el mapa de su ubicación

Imagen 15. Mapa de localización de PTARs



Fuente: Elaboración propia (2019)

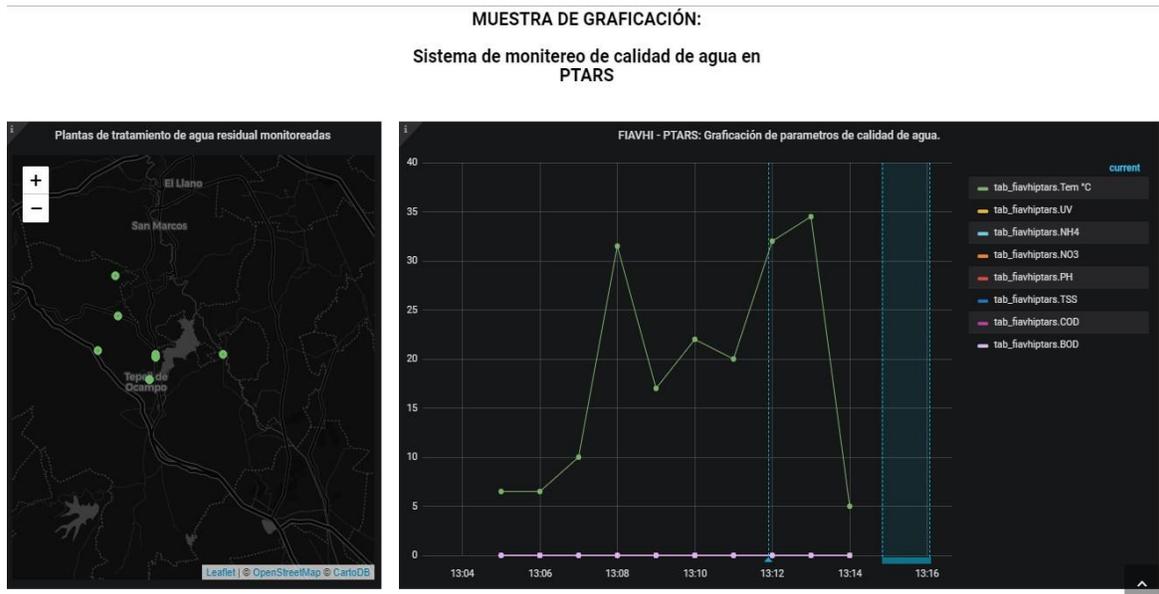
3.2.2 Complementos del Proyecto

Una parte característica y que le da mayor relevancia a este proyecto es el desarrollo del Sitio WEB con Sistema de Información Geográfica para la Unidad de Medición de Parámetros de Agua (UMPA) que se describe a continuación:

En el mes de noviembre del año 2018 tuvo lugar en Tepeji el workshop “*Opciones de Manejo Sustentable para Aguas Residuales y Lodos*” con participación del Gobierno del Estado de Hidalgo, el Gobierno Municipal de Tepeji del Río, el Fideicomiso de Infraestructura Ambiental de los Valles de Hidalgo y el Instituto de Naciones Unidas para el Manejo Integrado de Flujos, Materiales y Recursos (UNU-FLORES por sus siglas en inglés). En este evento se presentaron avances y puntos pendientes en el proyecto de Saneamiento Municipal; se identificaron dos principales barreras, siendo una de ellas la falta de información disponible y accesible sobre la calidad de agua municipal, por lo que FIAVHI se encuentra desarrollando un Sitio Web con Sistema de Información Geográfica integrado que pondrá a disposición de organizaciones interesadas, el monitoreo en línea y en tiempo real de los parámetros de calidad de agua que pueden ser monitoreados con la estación móvil equipada con instrumentos S::CAN.

Este Sitio Web ya se encuentra operando en su período de pruebas y es en dónde se pueden visualizar los valores de los parámetros monitoreados en este trabajo. Además está disponible para el público en general información sobre los antecedentes del FIAVHI, el trabajo que realiza y publicaciones educativas sobre el agua. En la Imagen 16 se observa la vista de la página web con SIG del FIAVHI:

Imagen 16. Vista de la página web con SIG de FIAVHI



Fuente: Tomada de <http://www.fiavhi-umpa.org>, (2020)

3.3 Trabajo de campo

El trabajo de monitoreo en campo se dividió en dos fases, la primera fue una prueba piloto en las PTARs seleccionadas para validar los resultados de los sensores Spectro::lyser INFLUXXXV1xx y Spectro::lyser EFFLUXXXV1xx respecto a resultados de laboratorio certificado. Después de esa primera prueba, se decidió aplicar un ajuste local al sensor Spectro::lyser EFFLUXXXV1xx por la diferencia observada en los datos de validación. Este ajuste fue realizado por ingenieros de la empresa proveedora y se llevó a cabo vía remota con base en resultados de pruebas en campo; una vez finalizado el proceso, se hizo una nueva validación de los resultados con laboratorio certificado y con los valores aceptados, se procedió a realizar el monitoreo definitivo.

El proceso de trabajo de campo en sus diferentes etapas se detalla a continuación:

- Prueba piloto

Muestreo durante los meses de noviembre y diciembre de 2019 con los sensores S::CAN utilizando la calibración que tienen programada de fábrica y que está basada en principios de espectrometría.

Este primer muestreo se realiza para observar y registrar datos del comportamiento del equipo.

- Validación del método

El FIAVHI solicitó servicios de laboratorio certificado para el análisis de muestras tomadas en la PTAR Santa Ana Atzacapotzaltongo con el fin de comparar los resultados con los obtenidos con los sensores S::CAN.

La toma de muestras se realizó el día 04 de diciembre de 2019 en tres puntos diferentes de la PTAR: cárcamo de entrada, salida de los biodigestores y salida de humedales. En cada uno de los puntos de muestreo se solicitaron datos de temperatura, pH, materia flotante, SST, DBO5, DQO y Nitratos. La toma de muestras para laboratorio y para los datos de la UMPA se llevó a cabo simultáneamente.

- Ajuste local del equipo

Una vez obtenidos los resultados de laboratorio, se observó que los datos estaban muy alejados de los valores reportados por el sensor de efluente por lo que se toma la recomendación de los ingenieros de S::CAN de realizar un ajuste local del sensor Spectro::lyser EFFLUXXXV1xx utilizando estadísticas de ambas mediciones (sensor y laboratorio certificado). Este ajuste no se aplicó al sensor Spectro::lyser INFLUXXXV1xx ya que reportó datos muy cercanos a los emitidos por el laboratorio certificado.

- Corroboración de la validación del método

Después del ajuste local se realizó una medición en la PTAR Santa Ana Atzacapotzaltongo para validar el ajuste, sin embargo se observó una diferencia en los datos arrojados por el sensor Spectro::lyser EFFLUXXXV1xx con respecto a los datos obtenidos del mismo sitio en la validación del método con análisis de laboratorio.

Al observar dicha diferencia se decidió realizar una corroboración de la validación nuevamente con laboratorio certificado el día 06 de marzo de 2020, analizando sólo muestras de salida de biodigestores y humedales. Al mismo tiempo que personal del laboratorio certificado realizó la toma de muestras, se tomaron los valores con el sensor Spectro::lyser EFFLUXXXV1xx para la comparación de los datos.

Una vez recibidos los resultados del laboratorio, se realizó la comparación mencionada en el párrafo anterior y se observó una diferencia menor al 30% entre datos, por lo cual se aceptó el ajuste local del sensor Spectro::lyser EFFLUxxxv1 para realizar el monitoreo en las diferentes PTARs.

El monitoreo se llevó a cabo durante los meses de marzo y mayo, tomándose un muestreo en cada uno de esos meses para observar las variaciones entre las fechas ya que se presentaron las primeras lluvias en la zona.

3.3.1 Monitoreo de parámetros

El trabajo de monitoreo, una vez ajustado el equipo, se organizó de la siguiente manera:

- Planificación de rutas de trabajo por día. Se decidió que se cubriría el monitoreo de todas las PTARs en dos días tomando en cuenta los tiempos de traslado y el tiempo de trabajo en cada una. El resultado de esta planificación se muestra en la Tabla 9

Tabla 9. Plan de rutas de monitoreo

Día 1	Día 2
PTAR Ojo de agua 2	PTAR Santa Ana Atzacapotzaltongo
PTAR Ojo de agua 3	PTAR San Ildefonso 2
PTAR San Buenaventura 1	PTAR San Ildefonso 3
PTAR San Buenaventura 2	PTAR El Caracol
PTAR Benito Juárez	

Fuente: Elaboración propia (2020)

Para el correcto uso y manejo del equipo de monitoreo, se recibieron dos capacitaciones de parte de ingenieros de la empresa S::CAN:

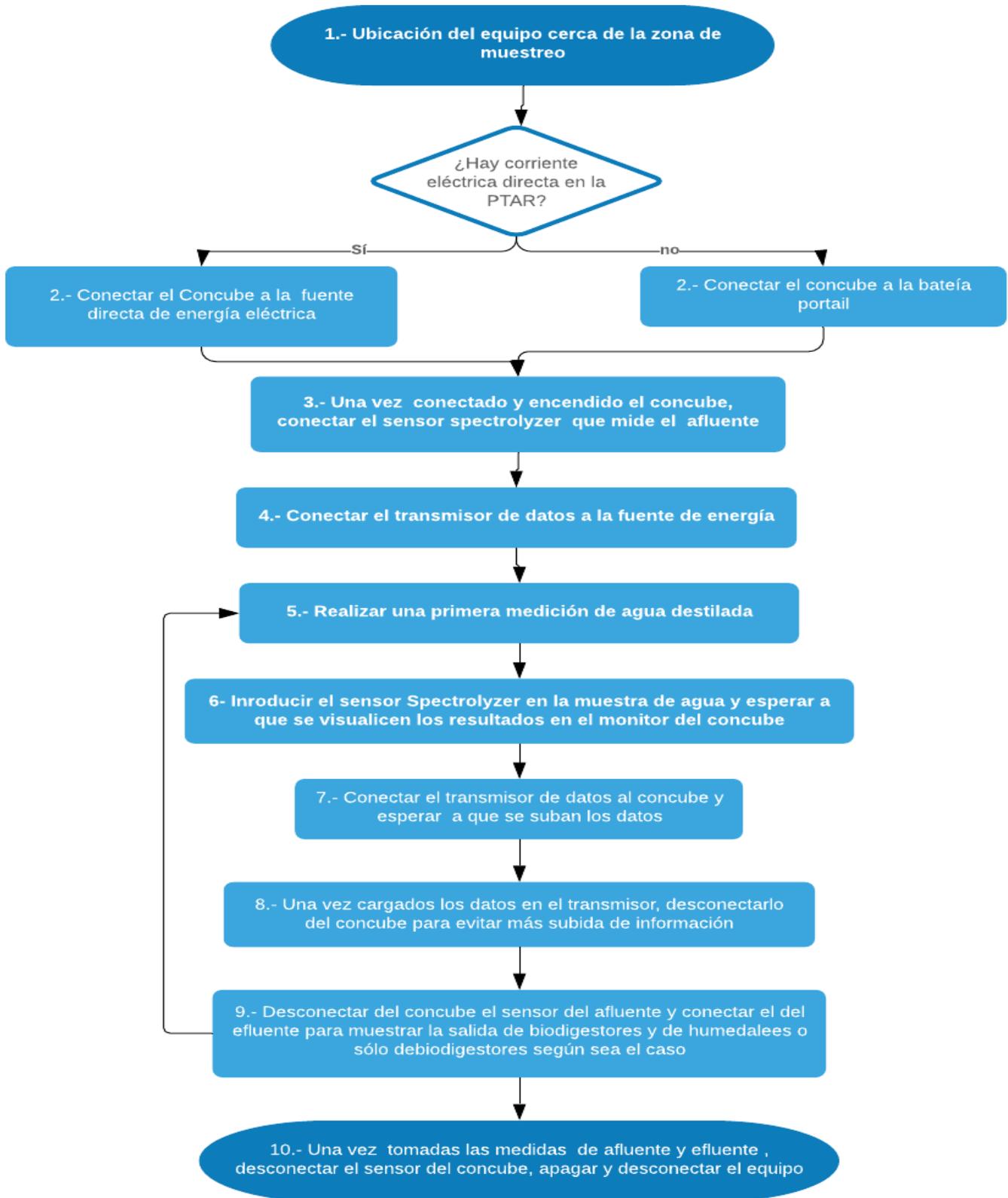
Capacitación 1: Recibida el día 26 de junio de 2019 en instalaciones de la oficina del FIAVHI para conocer las bases de funcionamiento y el correcto uso y conexión de los equipos, posteriormente se realizó una visita a la PTAR Tlaxinalpan para llevar a cabo una

demostración de la operación de los equipos y obtener medidas de las distintas fases de tratamiento de dicha PTAR.

Capacitación 2: Recibida el día 05 de julio de 2019 en instalaciones de S.CAN México en donde se reforzaron temas de manejo de los equipos y se hicieron muestreos directamente el laboratorio ubicado en sus oficinas para detallar el procedimiento de ajuste de los equipos.

A continuación, en la Imagen 17 se muestra el proceso llevado a cabo una vez que se llega a cada PTAR, el cual está basado en las capacitaciones recibidas.

Imagen 17. Proceso de monitoreo



Fuente: Elaboración propia con base en las capacitaciones recibidas por ingenieros de S::CAN

A continuación se mencionan detalles que complementan la información de la imagen 16 con el fin de hacer mención de particularidades que pueden ocurrir en el proceso de monitoreo, así como de explicar el porqué de ciertos pasos.

1 y 2.- La mayoría de las PTARs no cuentan con conectores de energía eléctrica por lo que resulta necesario tener siempre a disposición la batería portátil, antes de salir a muestrear se deja cargando toda la noche para asegurar su rendimiento durante toda la jornada.

3.- De acuerdo con las capacitaciones recibidas, los sensores se conectan al con::cube hasta que esté encendido.

4.-El transmisor de datos envía las mediciones tomadas por los sensores directamente a la página web del FIAVHI lo que permite su visualización en tiempo real desde cualquier aparato conectado a Internet.

5.- Esta primera muestra con agua destilada en el spectro::lyser es para verificar que el equipo se encuentra estabilizado y los resultados son confiables. Este paso es también recomendado por ingenieros de S::CAN

6.- Dependiendo de las características de cada PTAR, se puede tomar y medir la muestra directamente desde el flujo de agua, o coleccionar la muestra en un recipiente e introducir ahí el sensor para realizar el monitoreo

7.- Una vez visualizadas las mediciones en el monitor, se conecta el transmisor de datos al con::cube para que se suban a la red los datos tomados. El transmisor debe estar también conectado a una fuente de internet inalámbrico, que puede ser, como en estos monitoreos, el de un teléfono móvil, una vez hecho lo anterior, se selecciona en el transmisor el nombre de la PTAR que se está monitoreando en ese momento, así como la fase de tratamiento en la que nos encontramos y los parámetros muestreados.

8.- Una vez que se visualizan en la pantalla del transmisor los mismos datos mostrados en el con::cube, se desconecta el transmisor para evitar que se suban los datos de ajuste del siguiente paso. El tiempo de espera es aproximadamente 2 minutos

9.- Desconectar el sensor de 2 mm y conectar el de 5 mm para muestrear el efluente que pueden ser tanto la salida de los biodigestores y/o la salida de los humedales según las características de cada PTAR

*Para la medición de los afluentes, ya sea biodigestores o humedales, se repiten los pasos 5-8

10.- El tiempo requerido para los muestreos varía en cada PTAR, ya que se tiene que tomar en cuenta si tiene tratamiento terciario o sólo los biodigestores, la distancia a recorrer entre los módulos de cada fase y si hay corriente eléctrica directa o hay que usar la batería portátil, sin embargo, de manera general, se puede hablar de un promedio de 30 minutos por Planta

El equipo para realizar el monitoreo se describe a continuación, siendo la Imagen 18 la que muestra el sensor spectro::lyser utilizado para monitorear los afluentes, la Imagen 19 la del sensor spectro::lyser ocupado para monitorear los efluentes, mientras que en la Imagen 20 se observa y describe de manera general el funcionamiento de ambos sensores; y por último, en la Imagen 22 se observa la vista general del con::cube y moni::tool que son los equipos para conectar los sensores y poder visualizar y almacenar los datos.

Imagen 18. Sensor spectro::lyser para afluentes.

Spectro::lyser INFLUXXV1xx (2 mm para afluentes)



Fuente: Tomada de trabajo de campo (2020)

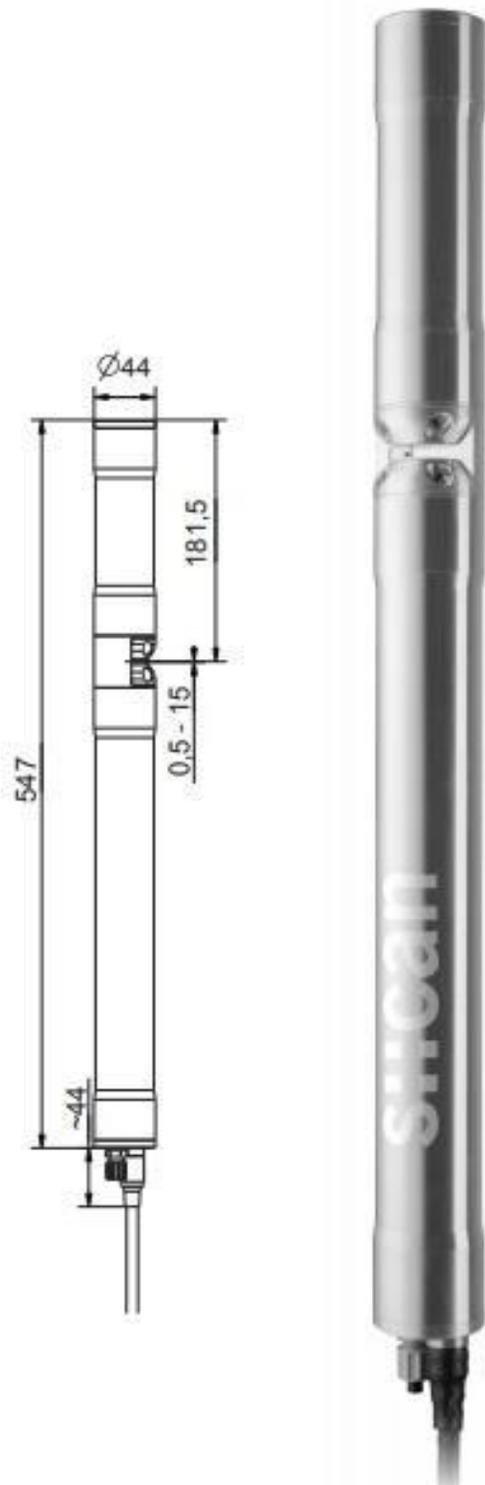
Imagen 19. Sensor spectro::lyser para efluentes:

Spectro::lyser EFFLUXV1xx (5 mm Para efluentes)



Fuente: Tomada de trabajo de campo (2020)

Imagen 20. Vista general de un sensor espectrofotométrico de S::CAN.



Ambos sensores mostrados anteriormente, son sondas especializada que miden el espectro electromagnético UV-Vis completo, es decir de 190-750nm y por lo tanto tiene la capacidad de detectar, medir y analizar, a través de su paso óptico abierto y ajustable, una gran variedad de sustancias orgánicas, además de que está recomendado y en conformidad con autoridades y agencias internacionales como la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) China, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) Estados Unidos y la Junta Central de Control de la Contaminación India (CPCB por sus siglas en inglés) (S::CAN, 2020)

Con esta sonda realiza el monitoreo en sitio de los parámetros de interés del presente trabajo (DBO, DQO, SST Y NO₃) aunque también es capaz de medir turbidez, Carbono Orgánico Total, UV254, color, BTX (Benceno, Tolueno y Xilenos), O₃ (Ozono), H₂S (Hidrógeno de Sulfuro), temperatura y presión (ídem). (Ver Imagen 20)

Fuente: Tomada de www.s-can.at (2020)

Imagen 21. Vista general de con::cube y moni::tool.

Imagen 22. Vista general de con::cube y moni::tool



Fuente: Tomada de www.s-can.at (2020)

El con::cube es la terminal a la que van conectados los espectro::lyser para la recopilación los datos y combinado con el moni::tool controla la estación de monitoreo, haciendo posible la visualización en tiempo real de los datos medidos (S::CAN, 2020)

El con::cube cuenta con una interfaz WIFI integrada que permite la transmisión de datos para un control remoto, tiene también un puerto USB, memoria de 4 B y pantalla táctil y a color. Por su parte, el moni::tool es la plataforma de visualización para la gestión de información, es posible observar las calibraciones, los datos medidos, el histórico de los mismo, las gráficas de absorbancia de cada parámetro y se adecua también para el uso en dispositivos móviles (ídem).

3.4 Normatividad de parámetros hídricos en aguas residuales

Para poder cumplir el objetivo de determinar si los efluentes de las nueve PTARs monitoreadas cumplen con la normatividad mexicana, se hizo una recopilación de la legislación internacional y nacional. Por lo anterior, en esta parte del Capítulo se abordan primeramente algunos antecedentes internacionales referidos a la regulación del uso de aguas residuales en la agricultura, tomando como fuente más importante las “*Guías sanitarias para el uso de aguas residuales en la agricultura y la acuicultura*” publicadas por la OMS ya que aborda de manera muy amplia el tema, mostrando antecedentes, estadísticas y estudios realizados que llevaron a las conclusiones presentadas en dicha Guía.

Posteriormente se hace referencia a la normatividad mexicana, empezando con algunas Normas derogadas que dieron paso a las actuales. En esta parte se mencionan específicamente los límites máximos permisibles los parámetros que son de interés en este trabajo.

3.4.1 Antecedentes internacionales

Desde 1973, la Organización Mundial de la Salud (OMS), publicó el documento “*Reúso de efluentes: Métodos de tratamiento de agua residual y salvaguardas de salud pública*” en el cual estaba incluida una guía para facilitar el uso racional de aguas residuales y excreta en la agricultura y acuicultura al tiempo que se brindaba información de cómo proteger la salud pública. Posteriormente en 1989, se publicó la segunda edición del documento bajo el nombre de “*Guías sanitarias para el uso de aguas residuales en la agricultura y la acuicultura*” las cuáles influyeron para establecer técnicas estándar y políticas respecto al tema ya que muchos países las adaptaron para mejorar o comenzar prácticas de manejo de aguas residuales. (OMS, 2006)

Finalmente, en el 2006 se publicó una tercera edición actualizada en donde se menciona nuevamente que el uso de aguas residuales, excreta y aguas grises en la agricultura y acuicultura son consideradas como un método que combina el agua con el reciclaje de nutrientes, de tal forma que se puede aumentar la seguridad alimentaria y que además ayuda a enfrenar problemas como la escasez de agua, falta de disponibilidad de nutrientes y preocupaciones sanitarias o efectos ambientales. Esta tercera edición quedó dividida en 4 volúmenes: 1: Política y aspectos regulatorios, 2: aguas residuales en la agricultura, 3: uso

de aguas residuales y 4: excreta en acuicultura y uso de excreta y aguas residuales en la agricultura (*ídem*).

Es en el volumen 2 de esta Guía en donde se mencionan los efectos del uso de aguas residuales tratadas en suelos, cultivos y zonas ganaderas, clasificando diferentes parámetros con su efecto correspondiente. En la Tabla 10 se mencionan los de interés para este trabajo

Tabla 10. Efectos del uso de aguas residuales en suelos y cultivos

Parámetro	Concentración en el agua residual tratada	Efectos en suelo	Efectos en cultivos
Nitrógeno Total	Aguas residuales municipales tratadas con 20-85 mg NT/l	No hay observaciones de problemas de acidificación provocados por fertilizantes sintéticos	Aumento de la producción en cantidad y calidad. Dependiendo del tipo de cultivo y suelo, algunos problemas pueden surgir con valores >30 mg/l.
	Aguas residuales con >30 mg NT/l	Sin efectos reportados	
Materia orgánica (DBO)	Aguas residuales municipales con un rango 110-400 mg/l	Mejora la actividad microbiana y la fertilidad del suelo. Puede aumentar la humedad y nutrientes, mejorando la estructura. Disminuye los efectos de la salinidad. Retiene y une metales pesados	Aumento de la productividad

Sólidos Suspendidos	Aguas residuales municipales con un rango 100-350 mg/l	Suelos obstruidos dependiendo su porosidad y composición. Puede haber menor infiltración y la irrigación se hace menos efectiva	
pH	Aguas residuales municipales con un rango 7-7.4	Sin efectos reportados	Sin efectos reportados
	Aguas residuales con un rango 6.5- 8.5	Si la alcalinidad del suelo no es suficiente para mantener el pH debajo de 6.5, puede ocurrir la solubilización de metales. Se puede perder nitrógeno por volatilización	Depende de la solubilización de metales

Fuente: Elaboración propia con base en OMS (2006)

3.4.2 Normatividad Mexicana

En México existe una amplia normatividad referente al recurso agua. En este apartado se mencionan las que se relacionan con el agua residual, sus reusos y características.

ARTÍCULO 115 CONSTITUCIONAL

En su apartado III menciona que “los Municipios tendrán a su cargo las funciones y servicios públicos siguientes: a) Agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas residuales...” (Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 1917, pág. 116).

NOM-CCA-032-ECOL/1993 (ANTECEDENTE, ACTUALMENTE ABROGADA)

Establece los Límites Máximos Permisibles (LMP) de contaminantes en las aguas residuales de origen urbano o municipal para su disposición mediante riego agrícola

Esta Norma fue publicada el 18 de octubre de 1993 en el Diario Oficial de la Federación (DOF, 1993) indicando que “es de observancia obligatoria para los responsables de las

descargas de aguas residuales de origen urbano o municipal que cuenten con la aprobación de la autoridad competente para disponer de éstas mediante riego agrícola” (Sección campo de aplicación, párrafo 1). Además, sirvió de base para la elaboración de otras Normas como la NOM-001-SEMARNAT-1996

Estableció los LMP para los siguientes contaminantes: pH, Conductividad Eléctrica, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Sólidos Suspendedos Totales, Aluminio, Arsénico, Boro, Cadmio, Cianuros, Cobre, Cromo, Fierro, Fluoruros, Manganeso, Niquel, Plomo, Selenio y Zinc

Para fines de este trabajo, se mencionan en la Tabla 11 los LMP que se monitorearán en las PTARs

Tabla 11. LMP NOM-032-ECOL-1993

PARÁMETROS	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES
pH (unidades de pH)	6.5 a 8.5
Sólidos Suspendedos Totales (mg/L)	120
Demanda bioquímica de oxígeno	120

Fuente: Elaboración propia con base en la NOM-032-ECOL-1993 (2020)

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT-1996

Que establece los Límites Máximos Permisibles (LMP) de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales

Esta Norma tiene el objetivo principal de proteger la calidad del agua para así posibilitar sus usos y es de cumplimiento obligatorio para todos los responsables de tales descargas (DOF, 1997)

Se refiere a aguas nacionales como: “Las aguas propiedad de la Nación, en los términos del párrafo quinto del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos” (DOF, 1997, pág. 9)

Artículo 27 Constitucional, Párrafo Quinto:

Son propiedad de la Nación las aguas de ...los ríos y sus afluentes directos o indirectos, desde el punto del cauce en que se inicien las primeras aguas permanentes, intermitentes o torrenciales, hasta su desembocadura en el mar, lagos, lagunas o esteros de propiedad nacional; las de las corrientes constantes o intermitentes y sus afluentes directos o indirectos, cuando el cauce de aquéllas en toda su extensión o en parte de ellas, sirva de límite al territorio nacional o a dos entidades federativas, o cuando pase de una entidad federativa a otra o cruce la línea divisoria de la República (pág. 31)

Por otra parte, los bienes nacionales se refieren a los bienes administrados por CONAGUA en los términos del artículo 113 de la Ley de Aguas Nacionales

Artículo 113 de la Ley de Aguas Nacionales:

La administración de los siguientes bienes nacionales queda a cargo de "*la Comisión*" (CONAGUA):

- I. Las playas y zonas federales, en la parte correspondiente a los cauces de corrientes en los términos de la presente Ley;
- II. Los terrenos ocupados por los vasos de lagos, lagunas, esteros o depósitos naturales cuyas aguas sean de propiedad nacional;
- III. Los cauces de las corrientes de aguas nacionales;
- IV. Las riberas o zonas federales contiguas a los cauces de las corrientes y a los vasos o depósitos de propiedad nacional, en los términos previstos por el Artículo 3 de esta Ley;
- V. Los terrenos de los cauces y los de los vasos de lagos, lagunas o esteros de propiedad nacional, descubiertos por causas naturales o por obras artificiales;
- VI. Las islas que existen o que se formen en los vasos de lagos, lagunas, esteros, presas y depósitos o en los cauces de corrientes de propiedad nacional, excepto las

que se formen cuando una corriente segregue terrenos de propiedad particular, ejidal o comunal, y

VII. Las obras de infraestructura hidráulica financiadas por el gobierno federal, como presas, diques, vasos, canales, drenes, bordos, zanjas, acueductos, distritos o unidades de riego y demás construidas para la explotación, uso, aprovechamiento, control de inundaciones y manejo de las aguas nacionales, con los terrenos que ocupen y con las zonas de protección, en la extensión que en cada caso fije "la Comisión"

En esta NOM-001-SEMARNAT-1996 se enlistan, entre otros, los Límites Máximos Permisibles (LMP) para los contaminantes. En la Tabla 12 se muestran los LMP de contaminantes que son de interés en este trabajo

Tabla 12. LMP NOM-001-SEMARNAT-1996

PARÁMETROS	RÍOS	SUELO
(mg/l, excepto cuando se especifique)	USO EN RIEGO AGRÍCOLA	USO EN RIEGO AGRÍCOLA
Temperatura °C	No Aplica	No Aplica
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	150	No Aplica
Demanda Bioquímica de Oxígeno ₅ (DBO ₅)	150	No Aplica

Fuente: Elaboración propia con base en la NOM-001-SEMARNAT-1996 (2020)

NOM-003-SEMARNAT-1997.

Establece los Límites Máximos Permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público

Se toma en cuenta esta NOM precisamente porque considera las aguas residuales tratadas y porque dentro de los reusos al público que se consideran, está el riego de parque y jardines,

que es un uso al que también está destinada el agua tratada de algunas de las PTARs de Tepeji del Río.

Específicamente, esta Norma indica que se considera el reuso en servicios al público con contacto directo al que:

Se destina a actividades donde el público usuario esté expuesto directamente o en contacto físico. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana se consideran los siguientes reusos: llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en lancha, remo, canotaje y esquí; fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego de parques y jardines.

En la Tabla 13 se mencionan los LMP de contaminantes a monitorear en este trabajo

Tabla 13. LMP NOM-003-SEMARNAT-1996

	LMP de SST (mg/l)	DBO₅ (mg/l)
Reuso en servicios al público con contacto indirecto u ocasional	30	30
Reuso en servicios al público con contacto directo	20	20

Fuente: Elaboración propia (2020) con base en la NOM-003-SEMARNAT-1996 (2020)

En el punto 4.4 de esta misma Norma se menciona que las entidades públicas que sean responsables del tratamiento de las aguas residuales para fines de servicios al público tienen la obligación de monitorear dicho tratamiento y LMP en los términos mencionados y de conservar por al menos tres años los registros de información resultante.

PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017

Publicado en enero de 2018 es un proyecto de modificación a la NOM-001-SEMARNAT-1996 que incluye varias actualizaciones y entre ellas se incluye la adición de los LMP de DQO y el rango de pH como parámetros a evaluar la calidad de agua de los cuerpos nacionales receptores de aguas residuales (DOF, 2018)

En la Tabla 14 se muestran los rangos de pH así como los LMP de DQO establecidos en el Proyecto, en ambos casos se muestran los datos correspondientes a la disposición del agua residual en el suelo.

Tabla 14. LMP PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017

	LMP de DQO (mg/l)	pH (U pH)
Suelo. Riego de áreas verdes	60	6.5-8.5
Suelo. Infiltración y otros riegos	150	6.5-8.5

Fuente: Elaboración propia (2020) con base en el PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017 (2020)

3.5 Trabajo de gabinete

Una vez desarrolladas las etapas mencionadas anteriormente en este Capítulo y ya con los resultados del monitoreo, se llevó a cabo la recopilación de todos los datos para su acomodo y análisis. Para ello se utilizó la plataforma web de FIAVHI que fue desde dónde se descargaron todos los datos, se presentaron en Excel para su análisis y construcción de gráficas. En las gráficas se muestran los valores de afluentes y efluentes para visualizar la disminución de los valores de los parámetros, y se indicó con una línea roja el LMP establecido por las NOMs vigentes en el tema de descargas de aguas residuales según cada parámetro particular.

Por último, y a partir de toda la información recabada en el desarrollo de esta investigación, se realizaron las conclusiones y recomendaciones consideradas oportunas para el desarrollo de futuros trabajos.

Capítulo 4. Resultados y discusión

La prueba piloto para este monitoreo se inició en el mes de diciembre con la calibración referida en el Capítulo 3. El objetivo principal fue observar los primeros datos arrojados por los sensores con la calibración mencionada, para observar su comportamiento y posteriormente poder hacer una comparación con datos de un laboratorio ambiental certificado. En la mayoría de los sitios se realizaron dos muestreos en fechas diferentes con la finalidad de tener más datos y observar su comportamiento.

En el siguiente apartado se muestran los resultados obtenidos en esta primera etapa. Se realizó una gráfica para cada parámetro monitoreado en la que se incluyen las nueve PTARs con sus etapas de tratamiento y los resultados obtenidos en cada una de ellas; debajo de cada gráfica se desarrolla su análisis correspondiente.

4.1 Resultados de la prueba piloto

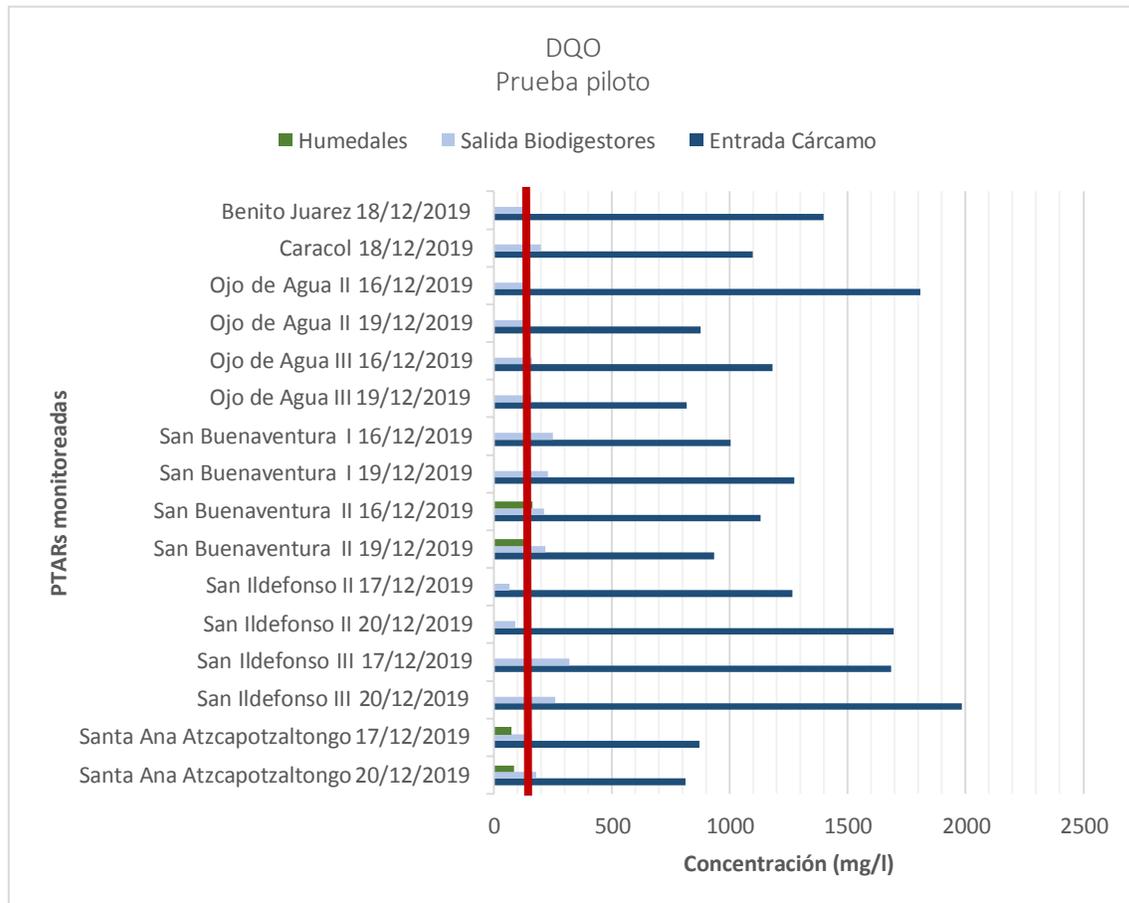
Estación: Invierno

Temporada de agua pluvial: Estiaje

Calibración global/ de fábrica de equipos

Demanda Química de Oxígeno. En la Gráfica 1 se muestran los datos de DQO obtenidos:

Gráfica 1. Niveles de DQO en primer muestreo (prueba piloto)



Fuente: Elaboración propia (2020)

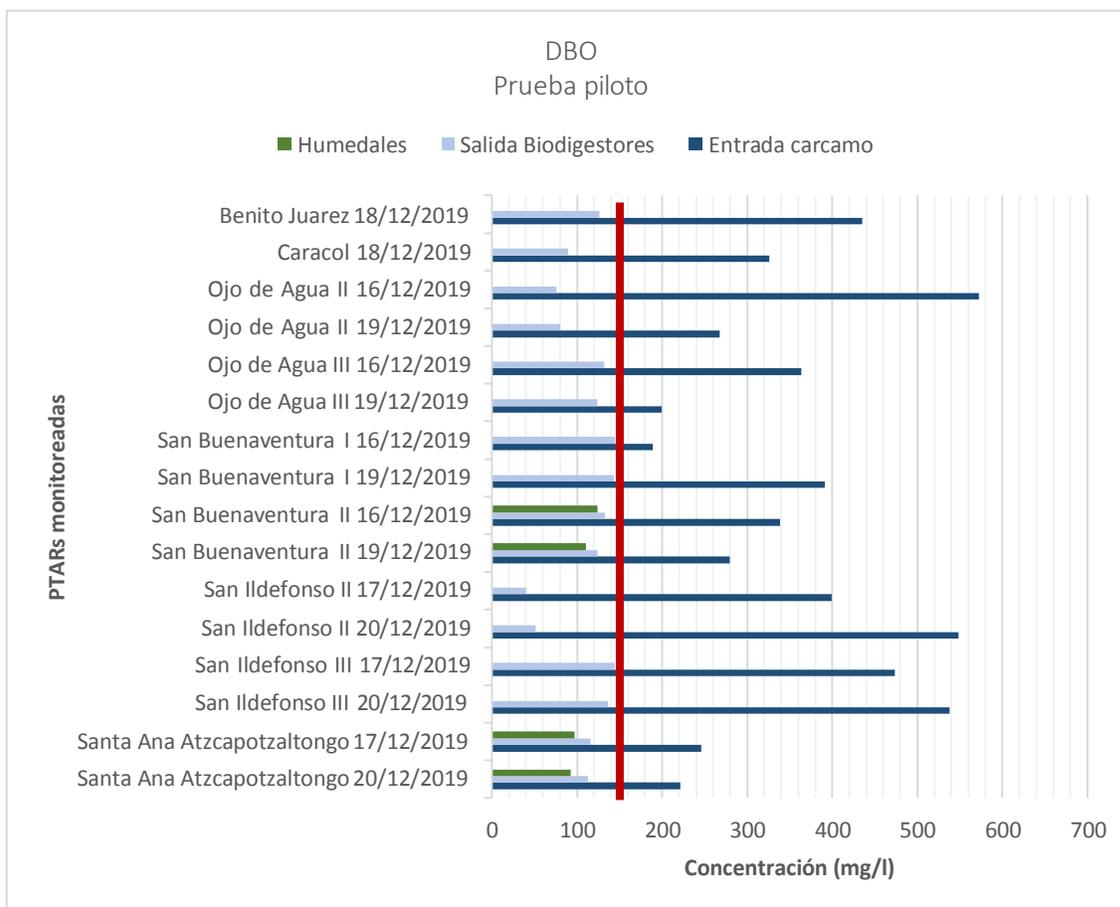
En la Gráfica 1 se observa el comportamiento del DQO en las diferentes PTARs muestreadas. La línea roja representa el LMP establecido en el PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017 que se usa como referencia en este estudio.

Los valores más altos rebasan los 1500 mg/l y son los registrados en la PTAR San Ildefonso 3 y Ojo de Agua 2. Se aprecia también que no todas las mediciones dieron resultados por debajo de la Norma en las salidas de los biodigestores, sólo de San Ildefonso 2 se obtuvieron

resultados favorables. Benito Juárez, Ojo de Agua 2, Ojo de Agua 3 y Santa Ana Atzacapotzaltongo estuvieron justo en los límites permitidos. Por último, se observan mayores eficiencias en los efluentes de las PTARs con sistema de humedales.

Demanda Bioquímica de Oxígeno. Los valores obtenidos se muestran en la Gráfica 2

Gráfica 2. Niveles de DBO en primer muestreo (prueba piloto)



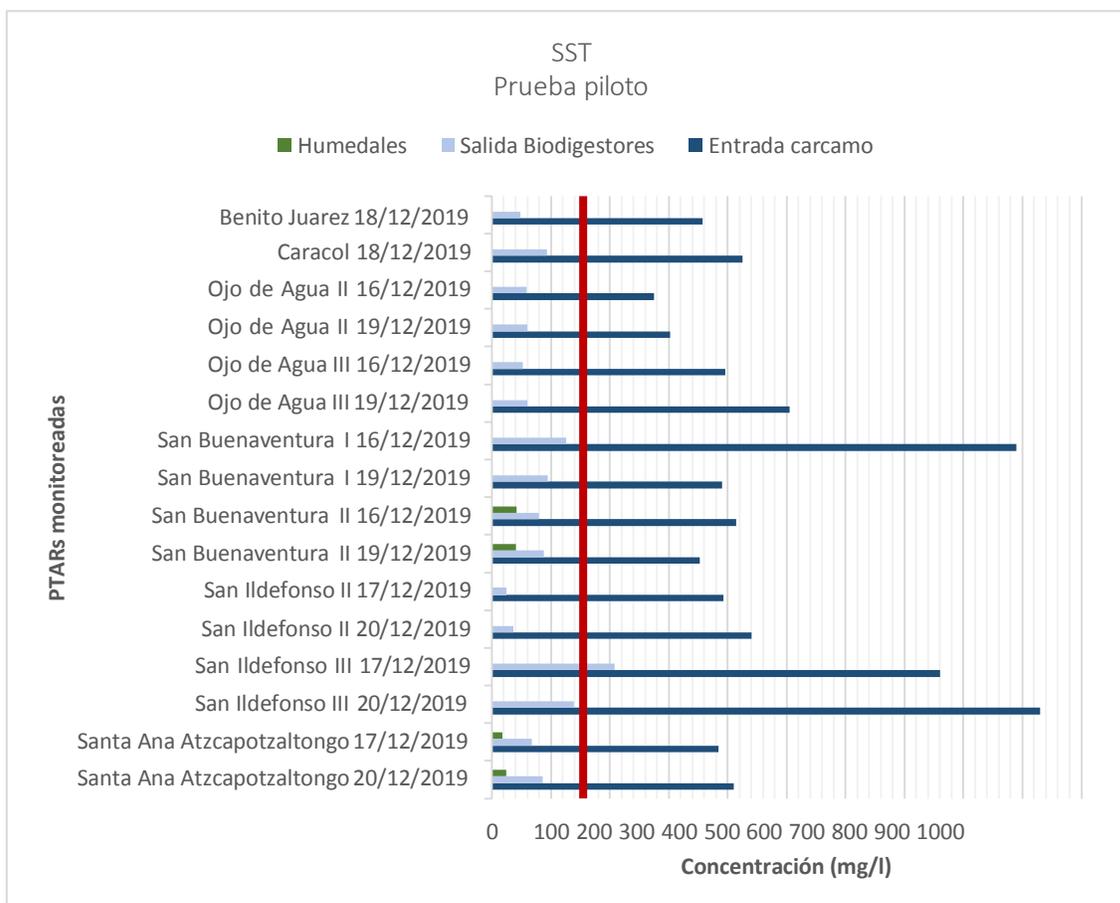
Fuente: Elaboración propia (2020)

Al igual que en el caso del DQO, se observa que en este primer muestreo, los valores más altos obtenidos fueron de las PTARs Ojo de Agua 2 y San Ildefonso 3. El diferencial está en que todas las PTARs en la fase de biodigestores estuvieron por debajo del LMP de DBO según la NOM-001-SEMARNAT-1997, no obstante, San Buenaventura I y San Ildefonso III estuvieron justo en el límite.

Sólidos Suspendidos Totales. Los resultados para este parámetro se muestran en la Gráfica

3

Gráfica 3. Niveles de SST en primer muestreo (prueba piloto)



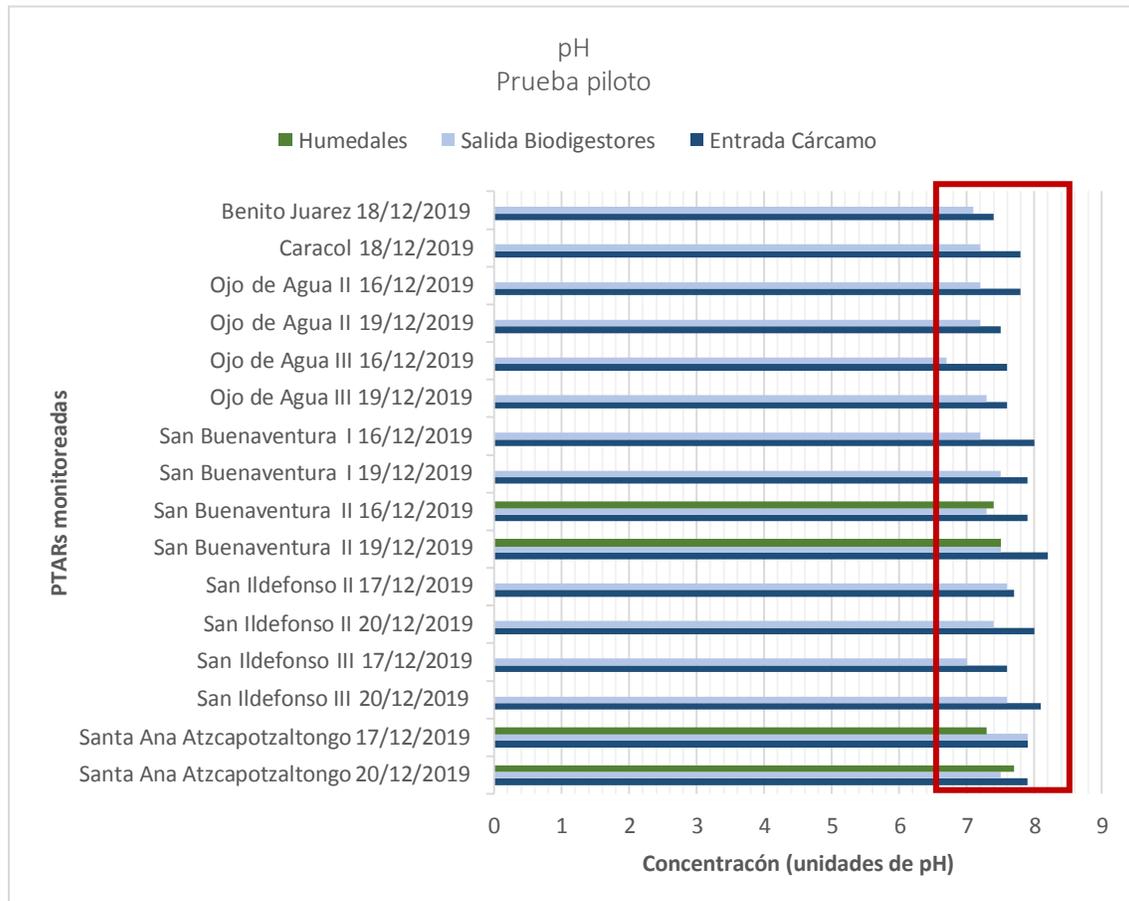
Fuente: Elaboración propia (2020)

En la Gráfica 3 mostrada arriba, se observa que en el parámetro de SST los valores más altos se vuelven a tener en la comunidad de San Ildefonso en la PTAR III y en la comunidad de San Buenaventura, aunque ahora estos datos altos se observan en la PTAR I. Como se refiere en el Capítulo 3, los LMP para SST son de 150 mg/l y se puede observar claramente que la PTAR San Ildefonso 3 es la que lo rebasa.

También se observan nuevamente diferencias notables en los efluentes de las PTARs Santa Ana Atzacapotzaltongo y San Buenaventura II que son las que cuentan con el tratamiento terciario de humedales y se reportan efluentes con menos de 50 mg/l.

pH. Los valores obtenidos en este parámetro se muestran en la Gráfica 4

Gráfica 4. Niveles de pH en primer muestreo (prueba piloto)

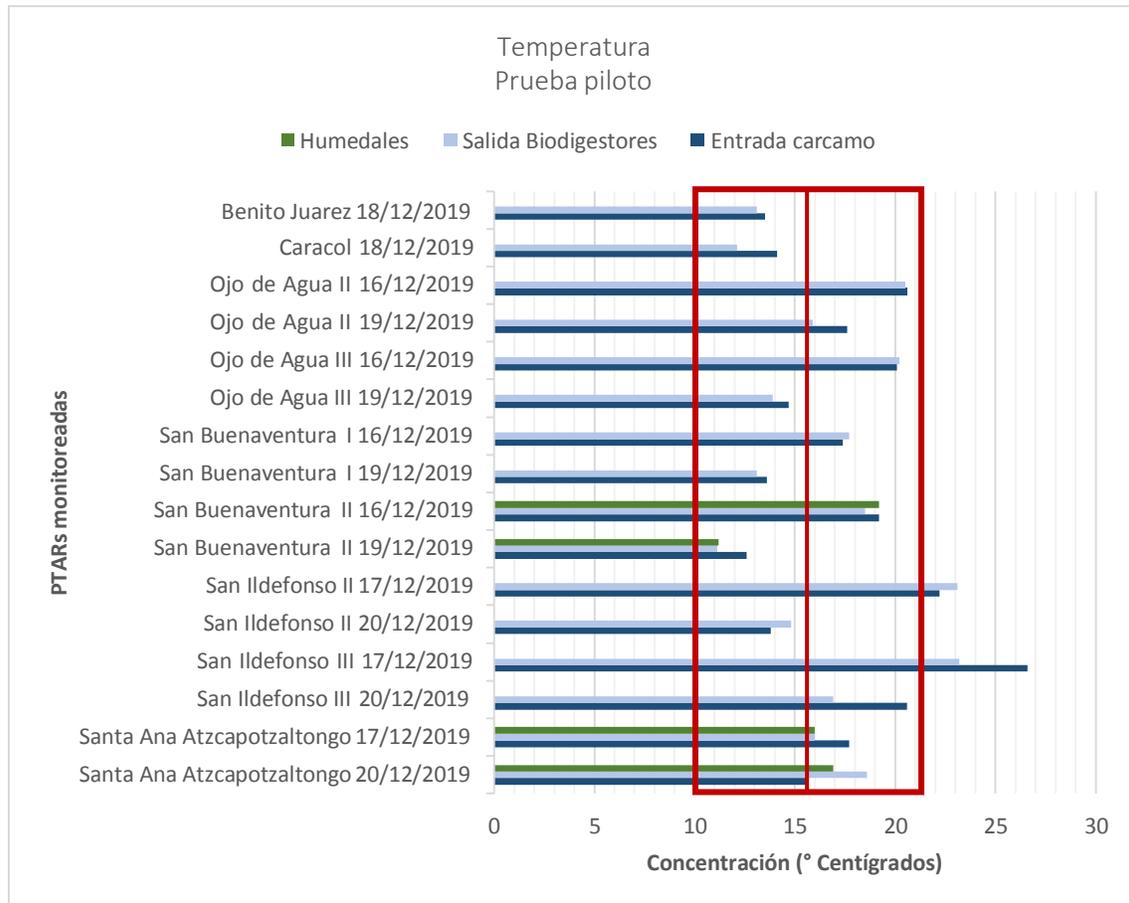


Fuente: Elaboración propia (2020)

El recuadro rojo de la Gráfica 4 representa el rango de Unidades de pH establecidas en el PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017 que va de los 6.5 a los 8.5. Todos los muestreos reportan valores dentro de ese rango, siendo el más alto de 8.2 y el más bajo de 6.7

Temperatura. Los valores de este último parámetro son los que se observan en la Gráfica 5

Gráfica 5. Niveles de Temperatura en primer muestreo (prueba piloto)



Fuente: Elaboración propia (2020)

Aun cuando no hay un parámetro o límite establecido en lo que a temperatura en descargas de aguas residuales se refiere, Ramos Olmos, Sepúlveda Marqués, & Villalobos Moreto señalaron en 2003 (véase Capítulo 2) que la temperatura media anual en las descargas de aguas residuales es de 15.6, dentro de un rango que abarca desde los 10°C hasta los 21.1°C.

En la Gráfica 5 se muestran los datos obtenidos en el primer muestreo de temperatura y se enmarca el rango mencionado en el párrafo anterior, la línea de en medio representa la temperatura promedio.

Se observa que las 2 PTARs de San Ildefonso exceden el rango estipulado en ambas fases de tratamiento y ninguna de las Plantas presentó temperaturas más bajas del rango general.

4.2 Validación del método

Una vez realizada la prueba piloto y siguiendo las recomendaciones recibidas en la capacitación impartida por ingenieros de S::CAN México, se llevó a cabo un muestreo en la PTAR Santa Ana Atzacapotzaltongo con los sensores S::CAN al mismo tiempo que se contrataron los servicios de un laboratorio ambiental certificado para poder tomar las muestras simultáneamente y conocer la fiabilidad del equipo según los resultados emitidos por el laboratorio.

Los resultados se muestran en la Tabla 15 que muestra los resultados emitidos por el laboratorio certificado y en la

Tabla 16 se comparan dichos resultados con los obtenidos con los sensores de la UMPA. En esta última tabla, las columnas con el término “% eficiencia respecto a laboratorio” hacen referencia al porcentaje de proximidad entre los resultados del laboratorio contra los de los sensores.

Tabla 15. Resultados del primer análisis de laboratorio certificado

LABORATORIO CERTIFICADO	Fecha	PTAR	Fase de tratamiento	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	DBO5 (mg/l)	Nitratos	PH	Temp (°C)
	04/12/2019 11:52	Santa Ana	Entrada Cárcamo	787.2	403.33	506.55	1.25	7.5	22
	04/12/2019 12:16	Santa Ana	Salida Biodigestores	336	140	241.22	1.17	7	22
	04/12/2019 12:20	Santa Ana	Salida Humedal	134.4	72.5	108.55	0.89	7.4	18

Fuente: Elaboración propia (2020)

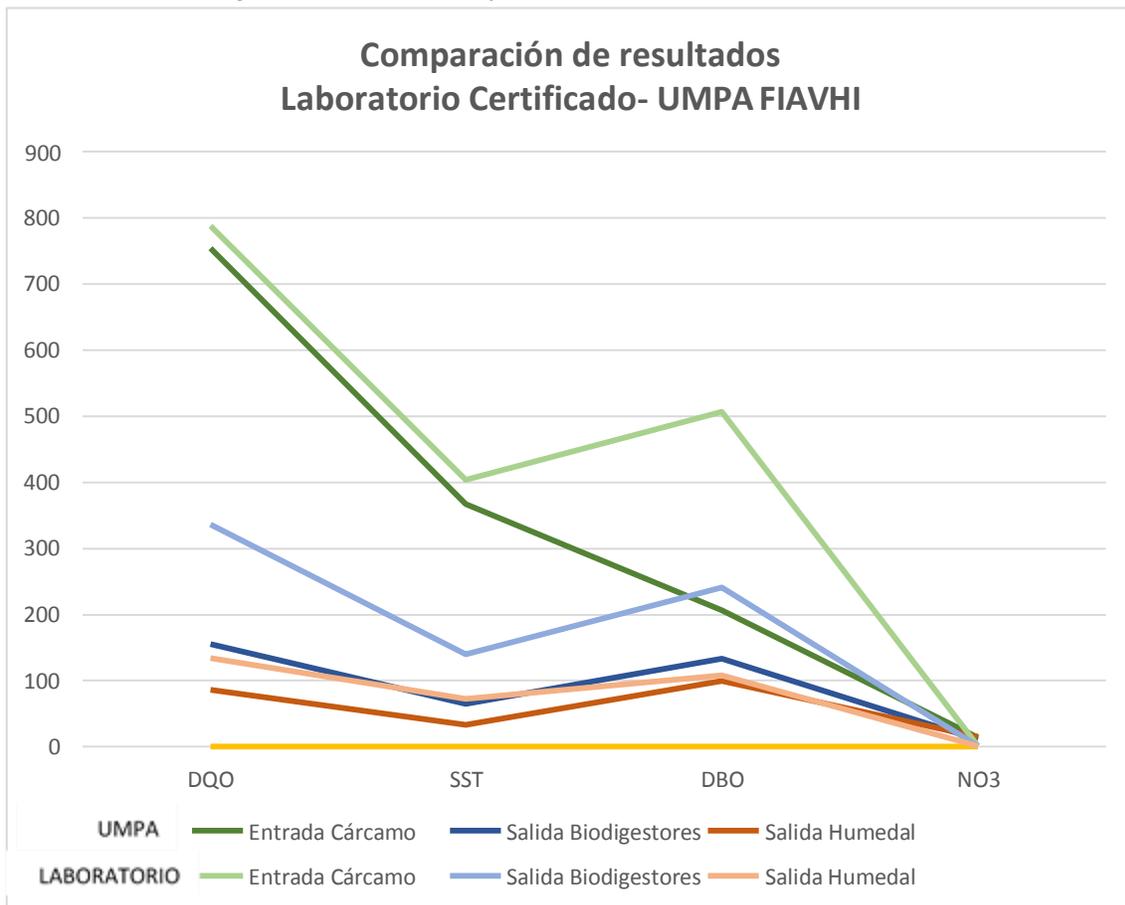
Tabla 16. Resultados obtenidos con los sensores de la UMPA respecto al primer análisis de laboratorio

UMPA	Fecha	PTAR	Fase de tratamiento	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	DBO (mg/l)	NO3 (mg/l)	PH	Temp (°C)	% eficiencia respecto a Laboratorio		
										DQO	SST	DBO
	04/12/2019 11:52	Santa Ana	Entrada Cárcamo	753.922	366.534	206.49	13.638	7.5	21.4			
	04/12/2019 12:16	Santa Ana	Salida Biodigestores	154.812	64.635	133.219	10.498	6.7	22.1	46.075	46.168	55.227
	04/12/2019 12:20	Santa Ana	Salida Humedal	86.352	33.207	99.139	14.634	7.4	18.7	64.25	45.803	91.330

Fuente: Elaboración propia (2020)

Una vez teniendo los resultados de ambas mediciones se sacaron las exactitudes de cada fase, que son las que se muestran en la segunda tabla. A excepción de los valores del efluente en los humedales que mostraron valores de más de 90% menos presencia de los parámetros estudiados respecto al cárcamo de entrada, todos los demás valores tuvieron valores bajos, se representan en la Gráfica 6:

Gráfica 6. Primera comparación de resultados Laboratorio-UMPA



Fuente: Elaboración propia (2020)

Como se observa en la Gráfica 6 de arriba, los valores que más se alejan son los que respectan al DBO en el cárcamo de la PTAR. Al observar también las diferencias en las eficiencias explicadas anteriormente, se programó un ajuste local del sensor de efluentes (spectro::lyser EFFLUXXXV1xx). Este ajuste fue recomendado y realizado de manera remota por

Ingenieros del equipo S::CAN con base en los datos obtenidos en ambos muestreos de laboratorio certificado y UMPA el 04 de diciembre de 2019.

Ajuste local

Una vez realizado el ajuste local se procedió a una segunda comprobación de resultados UMPA- laboratorio certificado para probar este ajuste y poder tener la certeza de que se obtienen resultados confiables en los muestreos.

Los resultados se muestran en la Tabla 17 y Tabla 18:

Resultados Laboratorio Certificado – FIAVHI UMPA (Ajuste local)

Resultados obtenidos según el análisis de laboratorio certificado:

Tabla 17. Resultados del segundo análisis de laboratorio certificado

Laboratorio. Fecha	PTAR	Fase de tratamiento	DQO	SST	DBO5
06/03/2020 08:52	Santa Ana	Salida Biodigestores	372.4	104	172.8
06/03/2020 09:31	Santa Ana	Salida Humedal	245.2	52	118.8

Fuente: Elaboración propia (2020)

Tabla 18. Resultados obtenidos con los sensores de la UMPA respecto al segundo análisis de laboratorio certificado

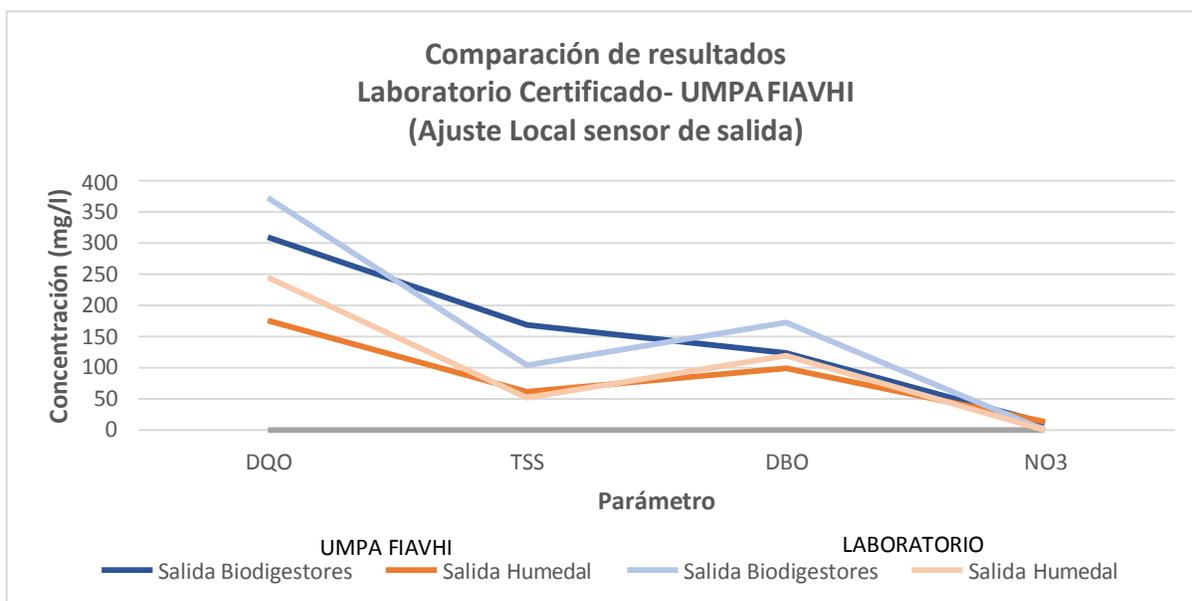
Fecha	PTAR	Fase de tratamiento	UMPA				% eficiencia respecto a Laboratorio		
			DQO	TSS	DBO	NO3	DQO	SST	DBO
06/03/2020 08:52	Santa Ana	Salida Biodigestores	309.25	168.688	123.381	10.908	83.042	162.200	71.401
06/03/2020 09:31	Santa Ana	Salida Humedal	175.92	60.535	98.608	12.689	71.747	116.413	83.003

Fuente: Elaboración propia (2020)

Los datos de las tablas 17 y 18 muestran los resultados del segundo análisis realizado en laboratorio certificado y los obtenidos por los sensores con el ajuste local, respectivamente. En la tabla 18 las columnas con el término “% eficiencia respecto a laboratorio” hacen referencia al porcentaje de proximidad entre los resultados del laboratorio contra los de los sensores, estos porcentajes son mayores al 70% en los 3 parámetros muestreados, lo cual comprobó que si era necesario un ajuste local en los sensores ya que con la calibración de fábrica los datos eran muy distantes.

En la Gráfica 7. Segunda comparación de resultados Laboratorio-UMPA Gráfica 7 se observa cómo se comportan ambos resultados:

Gráfica 7. Segunda comparación de resultados Laboratorio-UMPA



Fuente: Elaboración propia (2020)

Con resultados de proximidad entre datos mayor al 70%, se aceptó el ajuste local para continuar con el monitoreo en las diferentes PTARs.

4.3 Resultados del monitoreo

Este monitoreo se llevó a cabo durante los meses de marzo y mayo de 2020, tomándose un muestreo en cada uno de dichos meses para observar las variaciones entre las fechas ya que se presentaron las primeras lluvias en la zona.

Estación: Primavera

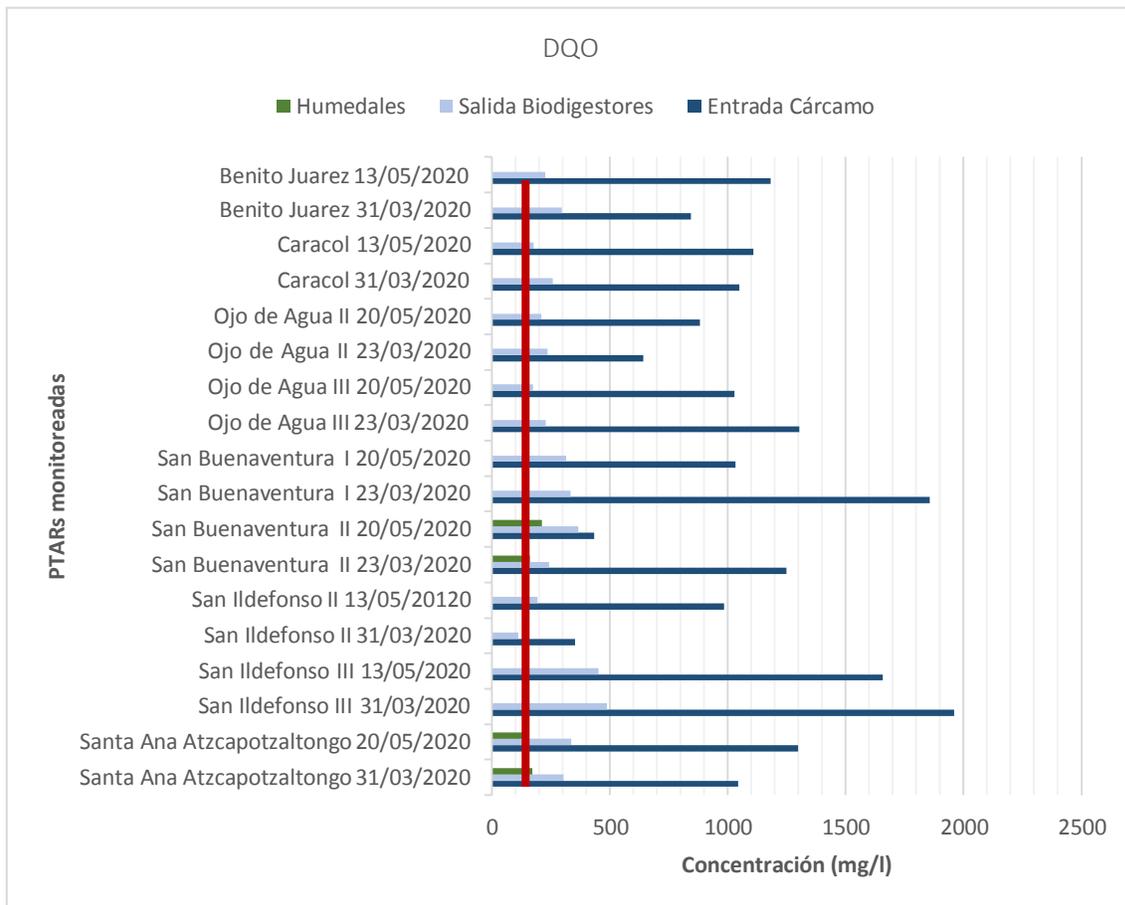
Temporada de agua pluvial: Primeras lluvias

Ajuste local de equipos

Los resultados se muestran a continuación. Se realizó una gráfica para cada parámetro monitoreado en la que se incluyen las nueve PTARs con sus etapas de tratamiento y los resultados obtenidos en cada una de ellas; debajo de cada gráfica se desarrolla su análisis correspondiente.

Análisis de DQO. En la Gráfica 8 se muestran los valores obtenidos

Gráfica 8. Niveles de DQO en segundo muestreo (ajuste local)



Fuente: Elaboración propia (2020)

En la Gráfica 8 se observan los datos obtenidos con el ajuste local en DQO. Sólo las PTARs San Ildefonso II, y Santa Ana Atzacapotzaltongo tienen valores en los efluentes por debajo de los establecidos en la NOM. Particularmente en Santa Ana se observa que se cumple con dicho LMP hasta que se llega al efluente del sistema de humedales. Al realizarse los muestreos a principios de la temporada de lluvias se observó una mayor cantidad de sólidos y materia orgánica que llegaban a los cárcamos, lo que pudo ocasionar la subida de los datos en este muestreo, principalmente en la PTAR San Ildefonso III (Ver Imagen 23), que además de ser la que más afluente recibe de todas, está ubicada en una zona agrícola y se observó gran cantidad de granos, semillas y sólidos en la entrada. Se puede inducir también que entre la materia inorgánica puede haber contenido de insumos que los agricultores usan en sus cultivos.

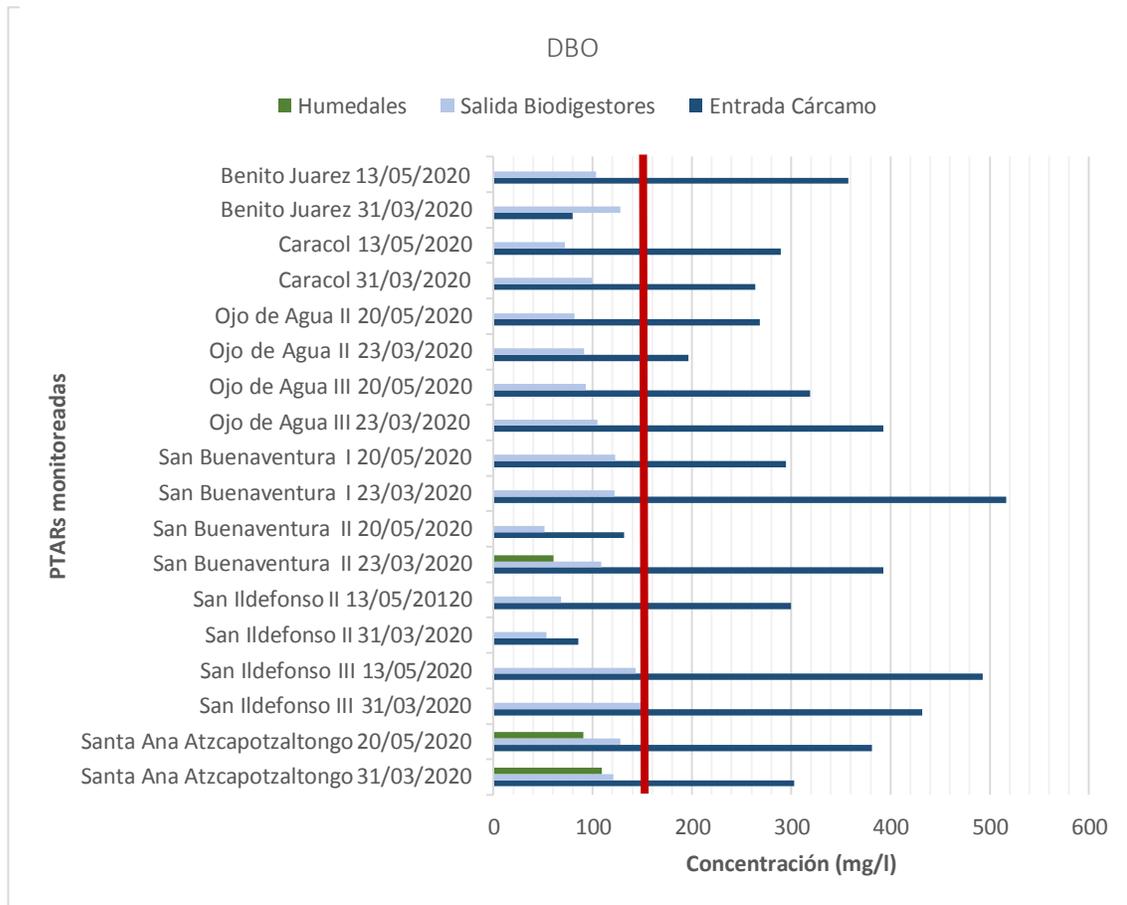
Por último, las PTARs Caracol, Benito Juárez, Ojo de Agua II y Ojo de Agua III se acercaron al LMP y, al observar el comportamiento de Santa Ana, un sistema de humedales podría ayudar a la reducción de los niveles de DQO.



*Imagen 23. Sensor muestreando en afluente. PTAR San Ildefonso III.
Fuente: Tomada de trabajo de campo (2020)*

Análisis de DBO. La Gráfica 9 muestra los resultados de DBO en las 9 PTARs monitoreadas

Gráfica 9. Niveles de DBO en segundo muestreo (ajuste local)



Fuente: Elaboración propia (2020)

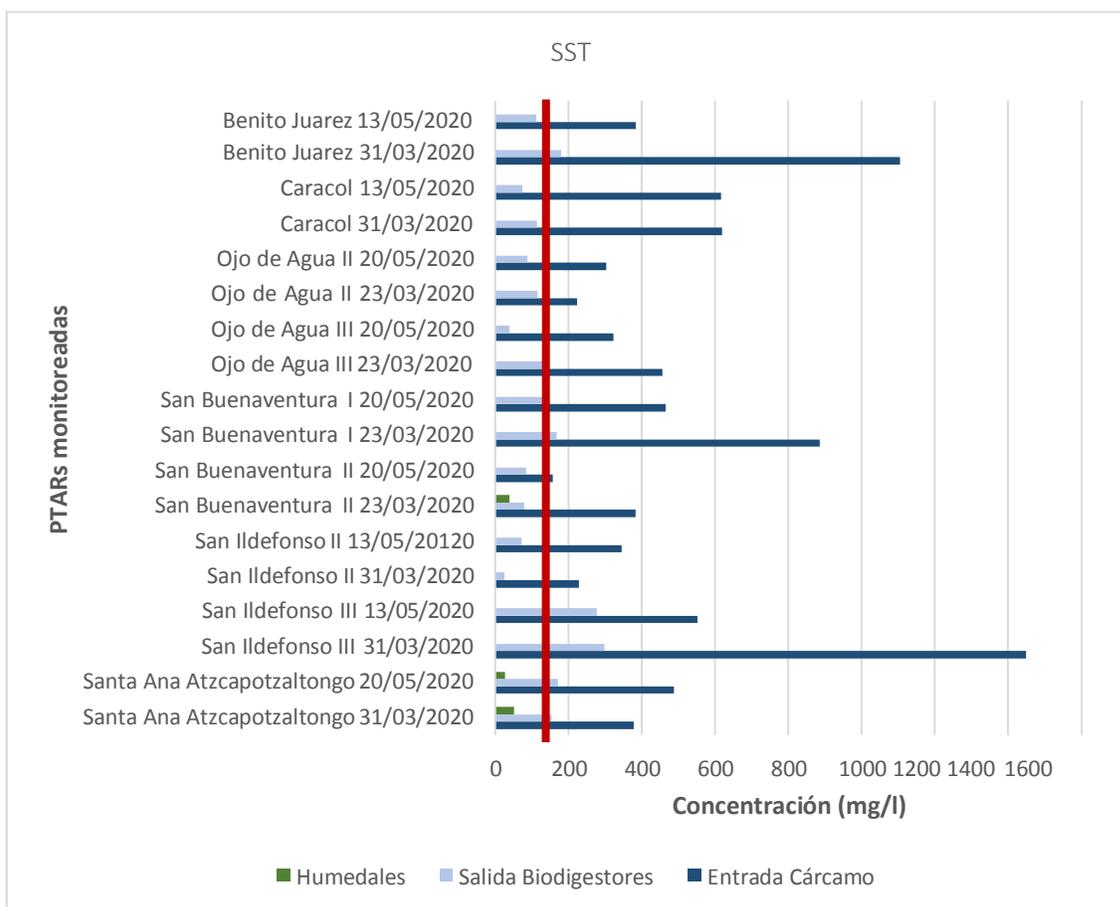
Existe una diferencia notoria entre los parámetros de DQO expuestos anteriormente y los de DBO que se muestran en esta Gráfica 9. El nivel más alto reportado aquí es en San Buenaventura II que reporta más de 500 mg/l en el cárcamo, mientras que los niveles de DQO rebasaron los 1500 mg/l en el caso de San Ildefonso III.

En este caso, todos los efluentes de las PTARs están cumpliendo con los LMP establecidos en la normatividad mexicana, siendo los valores más bajos los obtenidos en San Buenaventura II y San Ildefonso II, mientras que los que más se acercaron al límite permisible fueron los valores encontrados en San Ildefonso III y que se atribuye al mismo caso explicado en el apartado de DQO.

En Benito Juárez se observan diferencias significativas entre las dos fechas de los muestreos y sobre todo, se observa que el 31/03/2020 se registraron niveles más altos de DBO en el efluente que en el afluente, fenómeno que no es observado en la gráfica de DQO. Es el único caso durante todo el muestreo que se observa esto, por lo que se pudo haber un error en la medición o falta de mantenimiento a los biodigestores.

Análisis de SST. Los resultados para este parámetro se observan en la Gráfica 10

Gráfica 10. Niveles de SST en segundo muestreo (ajuste local)



Fuente: Elaboración propia (2020)

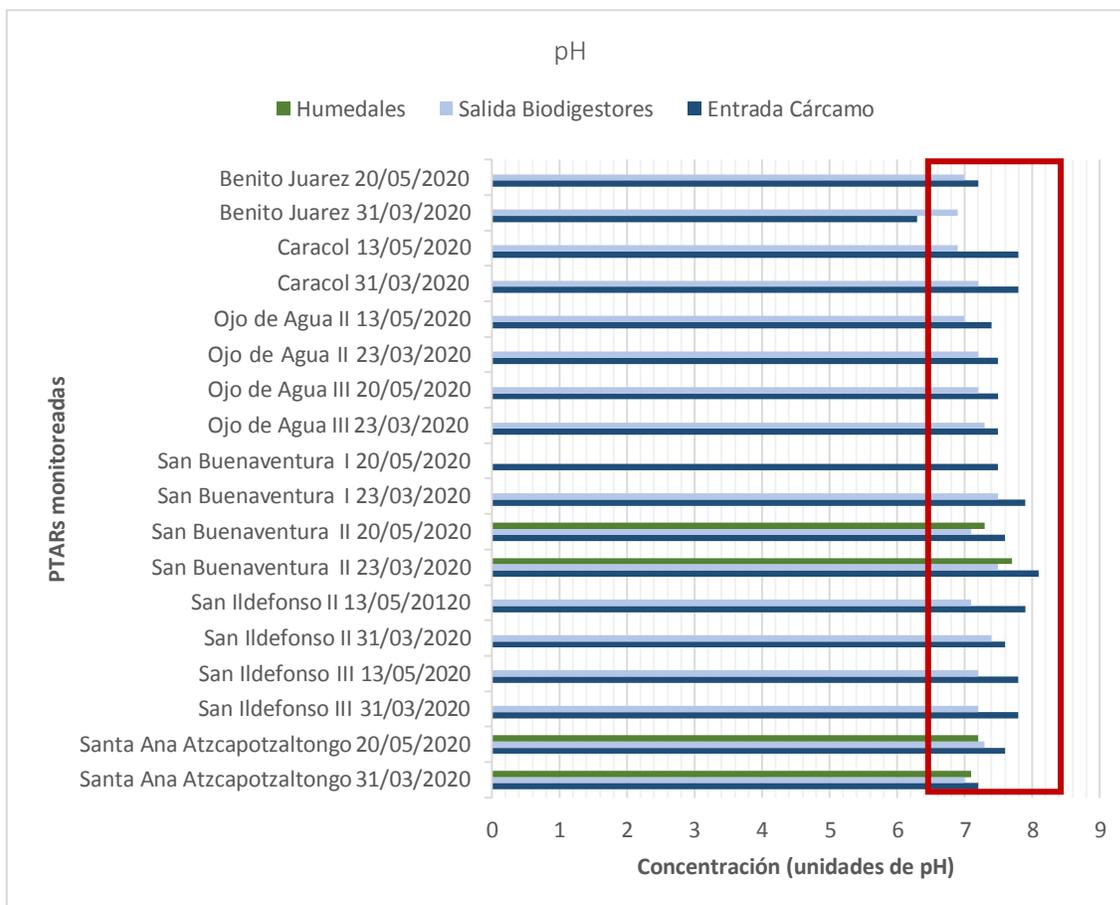
En la Gráfica 10 se observa el comportamiento de los SST, e igualmente se tiene la línea roja que indica los LMP establecidos en la NOM 001-SEMARNAT-1997. La PTAR que más excede el límite vuelve a ser San Ildefonso III. Las PTARs Caracol, Ojo de Agua II, Ojo de Agua III, San Buenaventura II, San Ildefonso II y Santa Ana Atzacapotzaltongo presentaron en ambas fechas, valores por debajo de dicho LMP, mientras que se observa un fenómeno en

Benito Juárez, San Buenaventura I en dónde se observa que aunque no estuvieron muy alejados los resultados de un día a otro, en uno de esos días se cumplió con el LMP y el otro día lo rebasaron, Santa Ana Atzacapotzaltongo presenta el mismo fenómeno en la salida de los biodigestores, sin embargo como cuenta con el sistema terciario de humedales, logra bajar exitosamente los niveles de SST muy por debajo del LMP.

El caso que si rebasa significativamente el límite es la PTAR San Ildefonso III con valores por encima de los 300 mg/l. Esta Planta es de particular atención ya que recibe el mayor de los afluentes y es además en dónde se observa a simple vista mayor cantidad de carga contaminante, lo anterior, aunado a que el mantenimiento está a cargo del Comité de agricultores de la localidad y no se realiza de manera constante repercute en los resultados obtenidos. Sin embargo, el efluente en DBO tiene un máximo de 150.316 mg/l y ese valor sigue estando dentro del rango recomendado por la OMS para uso en riego agrícola que es justo el destino que tiene el agua tratada de esta Planta y es utilizada por los mismos agricultores que conforman el Comité.

Análisis de pH. En la Gráfica 11 se observan los valores registrados en este parámetro

Gráfica 11. Niveles de pH en segundo muestreo (ajuste local)

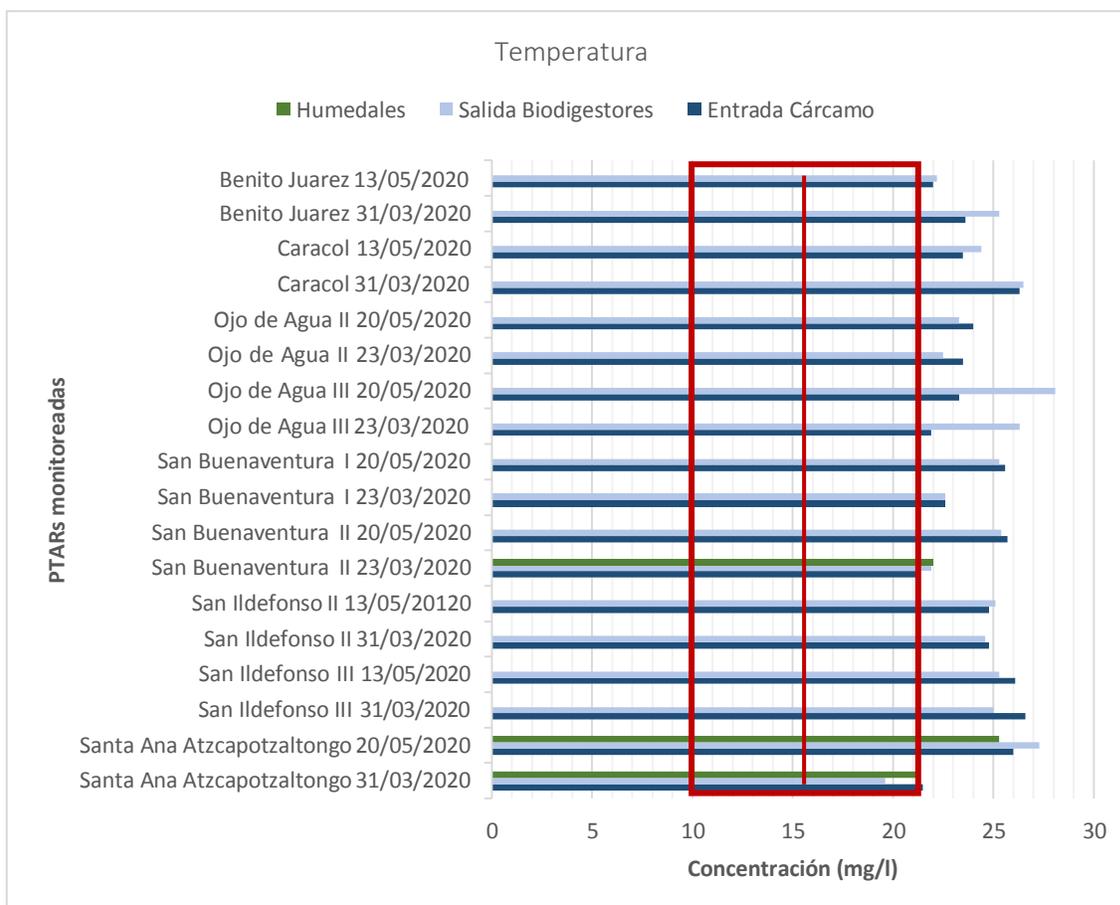


Fuente: Elaboración propia (2020)

Al igual que en la Gráfica 4 del primer muestreo, en esta Gráfica 11 se observa en el recuadro rojo el rango de pH propuesto en el PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017 que va de 6.5 a 8.5 para efluentes de aguas residuales. En este caso, todas las PTAR están dentro de este rango, siendo las PTARs Caracol y Benito Juárez los que tienen el valor más bajo de 6.9 que ya se puede considerar neutro y el más alto de 7.5 fue reportado en la PTAR San Buenaventura I.

Análisis de Temperatura. Por último, en la Gráfica 12 se muestran los valores de temperatura registrados en este segundo monitoreo con el ajuste local de sensores:

Gráfica 12. Niveles de Temperatura en segundo muestreo (ajuste local)



Fuente: Elaboración propia (2020)

Esta última Gráfica 12 corresponde al parámetro de temperatura muestreado en las diferentes PTARs, nuevamente se toma el rango de 10 a 21.1 °C, con un promedio de 15.6°C en la temperatura de las aguas residuales planteado por Ramos Olmos, Sepúlveda Marqués, & Villalobos Moreto en 2003 (véase Capítulo 2).

A diferencia del muestreo con la calibración global, en este segundo muestreo casi todas las PTARs estuvieron por encima de los 21°C de temperatura, a excepción de las PTAR Santa Ana Atzacapotzaltongo.

Se infiere que estos cambios de temperatura son resultado de la temporada (primavera) y la hora en la que se realizó el muestreo, ya que se observó mayor actividad y descarga de aguas

domésticas resultado de más personas en casa debido a la contingencia sanitaria por el SARS-COV-2. La actividad bacteriana de los biodigestores también influye en los cambios de temperatura.

Específicamente en los parámetros estudiados, una vez establecido, comparado y aceptado el ajuste local realizada a los sensores espectrofotométricos, los resultados del monitoreo muestran que todas las PTARs estudiadas presentan niveles de DBO por debajo del LMP establecido en la NOM-001-SEMARNAT-1996, siendo sólo la PTAR San Ildefonso III la que se encuentra justo en el límite, por otro lado, los valores de DQO son mayores en todos los casos y aunque es un fenómeno común debido a que el DQO toma en cuenta no sólo el contenido orgánico sino también los productos inorgánicos en el agua, sólo 3 de las 9 PTARs estudiadas presentaron efluentes con niveles de DQO por debajo de los LMP establecidos en el PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017 en al menos una de las fechas de muestreo, las cuáles son: PTAR San Buenaventura II, PTAR San Ildefonso II y PTAR Santa Ana Atzacapotzaltongo.

En cuanto a las otras 6 PTAR que están por encima de los LMP en DQO, el Proyecto de Norma mencionado anteriormente no ha sido aprobado y la normatividad internacional no refiere algún LMP para este parámetro sin embargo, es sumamente importante continuar con el monitoreo para observar si los efluentes siguen presentando valores por encima de los 150 mg/l o si se observan cambios según la estación del año y condiciones climáticas específicas de la región como lluvias o sequías.

4.4 Eficiencia de remoción de carga orgánica en las nueve PTARs estudiadas

Aunado a los resultados mostrados anteriormente, en las siguientes tablas (19 a 27) se muestra en las columnas de “% Eficiencia” el porcentaje de remoción de DQO, SST y DBO correspondiente en cada una de las nueve PTARs estudiadas.

PTAR Benito Juárez

Tabla 19. Porcentajes de Eficiencia, PTAR Benito Juárez

Fase de tratamiento	Fecha	DQO	SST	DBO	% Eficiencia		
					DQO	SST	DBO
Entrada	31/03/2020 15:30	844.48	1105.146	79.842			
Cárcamo	13/05/2020 16:36	1181.989	383.138	357.353			
Salida	31/03/2020 15:17	295.066	179.76	127.665	65.059	83.734	-59.897
Biodigestores	13/05/2020 16:24	226.937	111.224	103.283	80.800	70.970	71.098

Fuente: Elaboración propia (2020)

En la Tabla 19 observa que la remoción más eficiente en esta PTAR es la reportada en el parámetro de los SST, con valores por encima del 70% de remoción en ambas fechas. Lo que llama la atención en este caso particular son los valores de DBO el 31/03/2020, que como se menciona en el análisis de la gráfica de DBO mostrada anteriormente se puede relacionar con un posible error en la medición o una falta de mantenimiento a los biodigestores, ya que el 13/05/2020 no se observó el mismo fenómeno.

PTAR Caracol

Tabla 20. Porcentajes de Eficiencia, PTAR Caracol

Fase de tratamiento	Fecha	DQO	SST	DBO	% Eficiencia		
					DQO	SST	DBO
Entrada	31/03/2020 13:11	1048.941	620.151	263.978			
Cárcamo	13/05/2020 16:36	1110.091	616.45	289.267			
Salida	31/03/2020 13:04	258.374	114.427	99.26	75.368	81.549	62.398
Biodigestores	13/05/2020 16:24	178.161	73.139	71.851	83.951	88.135	75.161

Fuente: Elaboración propia (2020)

Al igual que en Benito Juárez, en la Tabla 20 se observa que los porcentajes más altos de eficiencia son los reportados en los SST con valores por encima del 80%, mientras que la eficiencia más baja está en la remoción de DBO. Se observan diferencias cercanas al 10% en las mediciones realizadas el 31/03/2020 respecto a las realizadas el 13/05/2020, una posible razón de esta variación puede ser la diferencia en la hora de muestreo ya que las actividades domésticas realizadas y por ende, la calidad del agua recibida en la PTAR sufre significativas variaciones.

PTAR Ojo de Agua II

Tabla 21. Porcentajes de Eficiencia, PTAR Ojo de Agua II

Fase de tratamiento	Fecha	DQO	SST	DBO	% Eficiencia		
					DQO	SST	DBO
Entrada	23/03/2020 16:32	640.291	223.299	196.586			
Cárcamo	13/05/2020 13:39	882.134	304.078	268.327			
Salida	23/03/2020 16:22	237.033	116.05	91.123	62.980	48.029	53.647
Biodigestores	13/05/2020 13:50	209.552	87.393	81.452	76.245	71.260	69.645

Fuente: Elaboración propia (2020)

Se observa en la Tabla 21 que en el caso de la PTAR Ojo de Agua II, los porcentajes de eficiencia están por debajo del 80% en los 3 parámetros, siendo los valores más altos de eficiencia los registrados en la segunda fecha del muestreo.

Es importante mencionar que es suficiente con los porcentajes reportados para que en los casos de SST y DBO se obtengan efluentes por debajo de los establecidos como LMP en la Legislación, el único parámetro que sale de rango es el DQO, lo que nos indica que hay presencia importante de material inorgánico en las descargas recibidas por esta PTAR.

PTAR Ojo de Agua III

Tabla 22. Porcentajes de Eficiencia, PTAR Ojo de Agua III

Fase de tratamiento	Fecha	DQO	SST	DBO	% Eficiencia		
					DQO	SST	DBO
Entrada	23/03/2020 15:51	1302.631	455.97	392.619			
Cárcamo	20/05/2020 16:35	1028.686	322.616	318.881			
Salida	23/03/2020 15:58	229.073	134.248	104.357	82.415	70.558	73.420
Biodigestores	20/05/2020 16:42	173.444	37.322	93.048	83.139	88.431	70.820

Fuente: Elaboración propia (2020)

En la Tabla 22, correspondiente a la PTAR Ojo de Agua III se observan porcentajes de eficiencia superiores al 70% en los 3 parámetros y en ambas fechas, siendo los porcentajes más altos los reportados en la remoción de DQO, sin embargo aún con más del 80% de eficiencia, los valores en la salida de los biodigestores siguen sobrepasando los 150 mg/l establecidos como LMP en la normatividad mexicana.

La eficiencia más alta es en la remoción de SST, en donde el efluente llegó a los 37.322 mg/l representando una eficiencia de 88.4%.

PTAR San Buenaventura I

Tabla 23. Porcentajes de Eficiencia, PTAR San Buenaventura I

Fase de tratamiento	Fecha	DQO	SST	DBO	% Eficiencia		
					DQO	SST	DBO
Entrada	23/03/2020 11:51	1856.753	885.268	516.426			
Cárcamo	20/05/2020 13:28	1034.198	464.367	294.461			
Salida	23/03/2020 11:43	334.342	167.919	121.756	81.993	81.032	76.423
Biodigestores	20/05/2020 13:40	313.435	145.467	122.476	69.693	68.674	58.407

Fuente: Elaboración propia (2020)

Los datos de la Tabla 23 muestran que esta PTAR tiene eficiencias variables tanto en parámetros como en fechas. Sin embargo se observa que en la fecha 20/05/2020 aunque se registraron valores más bajos en los parámetros, las eficiencias fueron menores también.

Los porcentajes de eficiencia en DQO son los más altos, y aun así se tienen valores por encima de los 300 mg/l de este parámetro en las salidas.

PTAR San Buenaventura II

Tabla 24. Porcentajes de Eficiencia, PTAR San Buenaventura II

Fase de tratamiento	Fecha	DQO	SST	DBO	% Eficiencia		
					DQO	SST	DBO
Entrada Cárcamo	23/03/2020 11:19	1248.648	383.987	393.021			
	20/05/2020 13:17	432.882	157.524	131.604			
Salida Biodigestores	23/03/2020 11:30	241.887	78.365	108.361	80.628	79.592	72.429
	20/05/2020 13:09	365.86	187.28	123.29	15.483	-18.890	6.317
Salida Humedales	23/03/2020 11:34	161.461	38.333	60.323	87.069	90.017	84.651
	20/05/2020 13:01	210.896	84.499	51.691	51.281	46.358	60.722

Fuente: Elaboración propia (2020)

Se observa en la Tabla 24 que en el área de humedales se alcanzan eficiencias de hasta el 90%, específicamente en los SST en la primera fecha. En la segunda fecha se presentaron valores de este mismo parámetro más altos en la salida de los biodigestores que en la entrada del cárcamo, sin embargo, en la salida de los humedales si se observan valores por debajo de los iniciales.

Al igual que en los casos mencionados anteriormente, los valores de DQO reportados en el efluente son mayores al LMP establecido en la Normatividad Mexicana.

PTAR San Ildefonso II

Tabla 25. Porcentajes de Eficiencia, PTAR San Ildefonso II

Fase de tratamiento	Fecha	DQO	SST	DBO	% de Eficiencia		
					DQO	SST	DBO
Entrada Cárcamo	31/03/2020 11:44	352.364	228.565	85.408			
	13/05/2020 15:02	985.544	344.398	299.868			
Salida Biodigestores	31/03/2020 11:35	111.882	22.979	53.001	68.248	89.946	37.944
	13/05/2020 14:55	192.778	72.888	67.885	80.439	78.836	77.362

Fuente: Elaboración propia (2020)

La PTAR San Ildefonso II es la que recibe menor cantidad de agua, por lo que presenta también niveles bajos en los parámetros muestreados, la Tabla 25 correspondiente a esta Planta reporta eficiencias variables que pueden estar relacionadas con la hora en que se realizó la medición, lo que indicaría que después de medio día es cuando hay más uso del agua en esa zona de la localidad.

PTAR San Ildefonso III

Tabla 26. Porcentajes de Eficiencia, PTAR San Ildefonso III

Fase de tratamiento	Fecha	% de Eficiencia					
		DQO	TSS	DBO	DQO	TSS	DBO
Entrada Cárcamo	31/03/2020 12:13	1958.69	1448.19	431.922			
	13/05/2020 15:37	1657.68	551.468	492.73			
Salida Biodigestores	31/03/2020 12:22	488.476	298.772	150.316	75.061	79.369	65.198
	13/05/2020 15:45	451.578	277.181	143.301	72.758	49.738	70.917

Fuente: Elaboración propia (2020)

La Tabla 26 reporta en general eficiencias por encima del 70% en esta PTAR, que es la que tiene más aforo actualmente. Si bien esta Planta presenta los valores más altos en contenido de DQO respecto a las otras Plantas muestreadas este porcentaje del 70% muestra que la Planta está operando satisfactoriamente y los datos de DQO se ligan a que durante el muestreo se observó gran presencia de contenido orgánico, principalmente semillas ya que la zona cercana a la PTAR es de alta actividad agrícola, también se observó contenido importante de materiales inorgánicos como envolturas y tapas de botellas PET que quedan atrapadas en las rejillas del cárcamo, esta gran carga de materiales es la que eleva los parámetros, dando como resultado que sólo los valores de DBO estén por debajo de los LMP.

PTAR Santa Ana Atzacapotzaltongo

Tabla 27. Porcentajes de Eficiencia, PTAR Santa Ana Atzacapotzaltongo

Fase de tratamiento	Fecha	DQO	SST	DBO	% Eficiencia		
					DQO	SST	DBO
Entrada Cárcamo	31/03/2020 09:45	1043.68	377.309	302.898			
	20/05/2020 16:05	1298.94	487.086	381.167			
Salida Biodigestores	31/03/2020 09:57	303.436	153.701	120.53	70.927	59.264	60.208
	20/05/2020 15:57	335.9	171.329	128.042	74.141	64.826	66.408
Salida Humedales	31/03/2020 10:13	171.186	51.79	108.92	83.598	86.274	64.041
	20/05/2020 15:53	135.054	26.404	90.591	89.603	94.579	76.233

Fuente: Elaboración propia (2020)

Esta última Planta cuenta con sistema de tratamiento terciario (humedales), lo que al igual que en la PTAR San Buenaventura II, permite obtener eficiencias muy cercanas e incluso mayores al 90% tal como se muestra en la Tabla 27

De manera general, se cumplió en casi todos los efluentes con valores por debajo de los LMP, sólo el día 31/03/2020 se reportaron 21.186 mg/l de DQO excedente, sin embargo, si no se tuviera el humedal, se rebasaría el LMP casi al doble ya que se tienen datos por encima de los 300 mg/l en la salida de los biodigestores.

Capítulo 5. Conclusiones

En este Capítulo se desarrollan las conclusiones según los resultados obtenidos y mostrados en el Capítulo anterior y tomando en cuenta la Normatividad Mexicana actual. También se hacen conclusiones sobre el método de muestreo con sensores utilizado en esta Tesis, explicando las facilidades y dificultades experimentadas durante el estudio. Se menciona el papel del FIAVHI y del Gobierno Municipal en el desarrollo de proyectos de esta naturaleza, ya que pueden ser vulnerables a los cambios de Administración que se dan en el Municipio cada 4 años. Por último, se hacen observaciones y recomendaciones sobre trabajo pendiente a realizar en proyectos similares.

De los resultados del monitoreo

La suma de efluentes de las 9 PTARs estudiadas es de 315'360,000.00 litros (315,360 m³) anuales de aguas residuales que no llegan a las corrientes de agua de las comunidades ni mucho menos al Río Tepeji o a la Presa Requena, conocida como una de las más afectadas en términos de contaminación ambiental del País.

En ocho de las nueve PTARs se observaron eficiencias en la disminución de los valores monitoreados por encima del 70% en al menos una de las dos fechas monitoreadas.

El planteamiento de la hipótesis en este trabajo fue “el efluente de las PTARs monitoreadas cumple con la normatividad mexicana vigente para el uso que es destinada en los parámetros DBO, DQO, SST, Temperatura y pH”. Esta hipótesis se rechaza debido a las siguientes cuestiones:

En cuanto al parámetro DBO, todas las PTARs cumplen con los LMP establecidos en la NOM-0001-SEMARNAT-1996 lo que indica que con los niveles de eficiencia mencionados se disminuye satisfactoriamente la carga de contenido orgánico en el agua residual recibida en las Plantas monitoreadas. Sin embargo, en el parámetro de SST tres de las nueve PTARs monitoreadas registraron valores diferentes a los establecidos dentro de los rangos permisibles en la Norma. La PTAR San Ildefonso III reportó los valores más excedentes; mientras que en las PTARs Benito Juárez y San Buenaventura I se reportaron valores ligeramente por encima de los 150 mg/l establecidos como LMP en una de las dos fechas de monitoreo. Específicamente en esas dos últimas PTARs mencionadas, los valores excedentes

pueden estar relacionados con una falta de las labores de mantenimiento y limpieza por lo cual es imperativo que se realicen y supervisen dichas labores para lograr disminuir los valores reportados en los efluentes.

Por último, en el caso de los parámetros de DQO, pH y temperatura no se mencionan en ninguna Norma Oficial Mexicana valores máximos a cumplir en los efluentes de PTARs, por lo cual, oficialmente no hay un LMP a cumplir. No obstante, existe un Proyecto de Norma (PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017) publicado en 2017 en el Diario Oficial de la Federación en la cual ya se estipulan LMP para DQO y un rango para pH. Tomando en cuenta dicho Proyecto, los valores de DQO en los efluentes de 7 de las 9 PTARs monitoreadas rebasan los 150 mg/l establecidos, por lo cual tampoco se cumpliría la hipótesis planteada.

Los valores de pH si están dentro del rango establecido en el Proyecto de Norma y están también dentro del rango de 7 a 7.4 U pH mencionados por la OMS como seguros en las aguas residuales por lo que en lo que respecta a este parámetro se está cumpliendo satisfactoriamente con la legislación y no representa ningún daño en los usos a los que está destinada el agua residual tratada. Los valores de temperatura no son mencionados en el Proyecto de Norma ni en las Guías de la OMS ya que es una variable que puede cambiar de un momento a otro.

Es sumamente importante continuar con el monitoreo para observar si los efluentes siguen presentando valores parecidos o si se observan cambios según la estación del año y condiciones climáticas específicas de la región como lluvias o sequías.

Del tipo de PTARs y su manejo

Las PTARs que están operando en el Municipio de Tepeji del Río contribuyen efectivamente en un porcentaje importante a la disminución de valores de los parámetros monitoreados y siguiendo las Guías para el Uso Seguro de las Aguas Residuales de la OMS, es adecuado su uso en riego agrícola, áreas verdes o campos de fútbol. Sin embargo, es necesario continuar con el monitoreo e implementar mejoras en las Plantas que tienen las eficiencias más bajas como San Ildefonso III y Ojo de Agua II. Se identificaron 3 factores que influyen de manera importante en los valores de los parámetros monitoreados:

a) Las fases de tratamiento que tiene cada PTAR, ya sea que lleguen a tratamiento secundario o terciario. Las PTARs San Buenaventura II y Santa Ana Atzacapotzaltongo son las 2 Plantas estudiadas que cuentan con el sistema de tratamiento terciario con humedales, los resultados obtenidos en este trabajo de investigación demuestran la efectividad que tienen estos sistemas en la remoción de contaminantes presentes en el agua residual doméstica.

b) Las diferentes actividades humanas que se desarrollan en el sitio en dónde están ubicadas. Cada localidad tiene características propias de orografía y actividades económicas que intervienen en la calidad de agua que llega a los cárcamos de entrada.

En las localidades con alta actividad agrícola cerca de las PTARs se tiene y se puede observar a simple vista mayor cantidad de materia orgánica e inorgánica suspendida en los cárcamos, tal es el caso de la PTAR San Ildefonso III que debido a estas altas concentraciones, registra en los efluentes valores muy altos de DQO y SST lo que indica presencia de material inorgánico, ya que en DBO no rebasa el LMP de 150 mg/l, por otra parte en la PTAR Caracol se observaron manchas con diferentes coloraciones en el agua, fenómeno que se explica al saber que en los alrededores de la zona hay varios establecimientos de mecánica automotriz y matanza de animales de granja que descargan su agua residual en el drenaje. Estas y las demás actividades económicas y domésticas realizadas en los alrededores de las PTARs explican las diferencias en los valores de los parámetros monitoreados, especialmente en los afluentes, y

c) El manejo y mantenimiento que se les da a las PTARs. Hay Plantas en las que los mismos beneficiarios del agua residual tratada se hacen cargo de tareas de manejo y mantenimiento (Santa Ana Atzacapotzaltongo y San Ildefonso III) y en otras se emplea a un operador que realiza todas esas labores. Si los trabajos se hacen en tiempo y forma, las Plantas trabajan correctamente y presentan altos porcentajes de eficiencia, por el contrario, la falta de limpieza y seguimiento a la operación de las PTARs, trae consecuencias adversas que derivan en valores más altos en los parámetros monitoreados, tal es el caso de la PTAR San Ildefonso III que está a cargo del comité de campesinos. Este hecho está totalmente en manos de los diferentes actores operadores y se debe trabajar para anular estos fallos.

Del trabajo con sensores espectrofotométricos

Realizar el monitoreo con sensores espectrofotométricos brindó grandes ventajas al estudio tales como la posibilidad de muestrear y obtener resultados directamente en las entradas y salidas de las PTARs sin necesidad de intermediarios; las mediciones son rápidas, en promedio el tiempo de muestreo en cada Planta fue de 30 minutos lo que permitió realizar muestreos en diferentes localidades en un mismo día; el equipo es resistente y fácil de manejar aunque es importante y necesario recibir capacitación especializada para su correcto manejo y mantenimiento; permite un monitoreo constante de los parámetros de interés en las zonas de estudio, teniendo la oportunidad de observar los cambios presentados según la hora, la estación del año o la forma de vida de las personas beneficiarias.

No obstante lo anterior, es necesario llevar a cabo comparaciones de resultados de los sensores con respecto a laboratorios certificados para poder asegurar la confiabilidad de los datos. Una vez obtenidos resultados altamente similares es cuando se acepta la calibración o los ajustes de los sensores y se procede al monitoreo. Este proceso puede ser largo y es necesario el acompañamiento de la empresa proveedora de los equipos para realizar dichas calibraciones.

Adquirir equipos especializados como los utilizados en este trabajo puede representar una inversión fuerte para las instituciones interesadas, sin embargo, a largo plazo es una inversión totalmente redituable por los beneficios ya mencionados. Además, se pueden presentar nuevas oportunidades de negocio como la oferta del servicio de monitoreo a empresas interesadas.

Por último, la interconexión que se realizó de los sensores espectrofotométricos a la página web del FIAVHI presenta la gran ventaja de poder visualizar y manejar los datos de manera remota. Si bien, en esta etapa de prueba los datos son privados, existe la oportunidad y recomendación de que algunos datos sean de acceso abierto para su conocimiento y estudio.

Del papel de los diferentes actores

El proyecto “*Saneamiento Integral del Municipio de Tepeji del Río de Ocampo*” del que forman parte las PTARs monitoreadas, es un proyecto ambicioso que ha logrado avanzar y contribuir a mejorar la calidad de agua y de vida en el Municipio. Es un ejemplo de los

resultados que se pueden obtener cuando existe la colaboración de diferentes actores que aportan y suman, en este caso específico, son el Gobierno Municipal, FIAVHI y sociedad civil.

El trabajo que realiza FIAVHI al desarrollar este proyecto en Tepeji del Río es una gran oportunidad de desarrollo en el Municipio que aporta al cumplimiento de los ODS, abarcando desde la educación ambiental, la generación de empleos, el acceso a alimentos de mejor calidad y una mejor calidad ambiental específicamente en los cuerpos de agua que se han contaminado alarmantemente por el incremento poblacional y el establecimiento de la zona industrial en Tepeji.

Posicionar los objetivos del proyecto junto a los intereses de la sociedad civil que participa representa un desafío. Se debe desarrollar un plan de trabajo con los diferentes comités, patronatos o particulares interesados en aprovechar el agua residual tratada ya que existen diferentes intereses encontrados. Se tienen que llegar a acuerdos o convenios bien establecidos para que todas las partes respeten lo acordado y se obtengan los beneficios ambientales, sociales y económicos que este proyecto persigue.

El caso del apoyo del Gobierno Municipal es de particular importancia ya que, cambios en la Administración colocan al proyecto en una situación de vulnerabilidad y con riesgo de ser ignorado o abandonado. Ha sido en la administración 2016-2020 en la que se han logrado construir y poner en operación la mayor cantidad de PTARs en Tepeji del Río, sin embargo, se deben seguir manteniendo, operando y planeando el trabajo pendiente por lo que la continuidad en las políticas municipales es fundamental. Se espera que las siguientes administraciones estén comprometidas a darle seguimiento a este proyecto que aún tiene mucho que desarrollar y aportar a la sociedad.

Recomendaciones finales

Para finalizar, se hacen las siguientes recomendaciones en miras de seguir trabajando y contribuir al desarrollo óptimo del proyecto:

Se recomienda principalmente una capacitación inicial y continua a todos los operadores que trabajan en la rehabilitación y operación de las PTARs, que incluya los principios básicos de su funcionamiento y los beneficios que se logran al tenerlas trabajando de la mejor manera.

Junto con la capacitación continua se sugiere planear y establecer monitoreos constantes en todas las PTARs para tener una mayor cantidad de datos que corroboren y permitan fortalecer el estudio de eficiencia de las mismas, esto además permitirá conocer y tomar en cuenta las variaciones en las características de las aguas residuales recibidas según la hora, la estación del año, el uso del agua, los hábitos y el nivel de vida de los usuarios de origen, ya que si bien se consideró que estas variables influyen en los resultados obtenidos en los efluentes hacen falta más mediciones durante todo el año para observar y analizar estos cambios con la finalidad de poder identificar fenómenos que alteren bruscamente la calidad del agua y finalmente poder establecer posibles alternativas para mejorar el proceso de tratamiento (puede ser con humedales en las Plantas que presentan datos y afluentes más altos).

Se recomienda también realizar estudios de monitoreo de parámetros de contaminantes inorgánicos y de composición química de los afluentes y efluentes para reforzar los datos y las investigaciones.

Por último, una barrera preocupante y que resulta trascendental de vencer para el éxito de todas las Plantas tanto en su construcción, como en su rehabilitación y operación es la inseguridad presente en todo el Municipio. Lastimosamente, se han presentado varios robos en la mayoría de las Plantas y es la razón por la cual varias no están en operación.

Una forma de contribuir a reducir ese problema desde el campo de acción de FIAVHI puede ser la realización de campañas de educación ambiental en todo el Municipio con especial énfasis en las localidades en donde operan las PTARs. Tratar temas relacionados a la escasez y el cuidado del agua, el funcionamiento de las PTARs y el monitoreo que se está realizando, será importante mostrar los resultados del mismo para que se fortalezca la confiabilidad de la sociedad con respecto al funcionamiento de las Plantas, se conozca el valor que aporta a la localidad en específico y se logre un sentimiento de pertenencia para su cuidado y mantenimiento.

Bibliografía

- B. Glasgow, H., M. Burkholder, J., Reed, R., Lewitus, A., & Kleinman, J. (2004). Real-time remote monitoring of water quality: a review of current applications, and advancements in sensor, telemetry, and computing technologies. *Elsevier*, 409-448. Recuperado el 15 de Enero de 2020, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022098104001066>
- Bhardwaj, J., Gupta, K., & Gupta, R. (2015). A Review of Emerging Trends on Water Quality Measurement Sensors. *International Conference on Technologies for Sustainable Development*. Recuperado el 20 de Noviembre de 2019, de https://www.researchgate.net/publication/281924339_A_review_of_emerging_trends_on_water_quality_measurement_sensors
- Comisión Europea. (2013). *Review of sensors to monitor water quality*. Italia. Recuperado el 28 de Enero de 2020, de <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC85442/lbna26325enn.pdf>
- CONAGUA. (2011). *Estadísticas del agua en México*. Recuperado el 05 de Septiembre de 2019, de conagua.com.mx: conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/sina/capitulo_8.pdf
- CONAGUA. (2017). *Estadísticas del agua en México*. Ciudad de México: CONAGUA. Recuperado el 25 de Noviembre de 2019, de http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf
- CONAGUA. (2018). *Estadísticas del agua en México*. Recuperado el 10 de Junio de 2019, de http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf
- CONAGUA. (26 de Junio de 2020). *Consulta a la base de datos del REPDA*. Recuperado el 20 de Marzo de 2020, de Registro Público de Derechos de Agua: <https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx>
- Delgadillo, O., Camacho, A., F. Pérez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba-Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua. Recuperado el 03 de Noviembre de 2019, de <https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2011). *Sistema de Información del Medio Ambiente de los países de la comunidad Andina*. Recuperado el 02 de Octubre de 2020, de Nitrógenos Totales: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/Nitrogenos_totales_13.pdf
- DOF. (18 de Octubre de 1993). *NOM-CCA-032-ECOL/1993*. Recuperado el 05 de Enero de 2020, de Diario Oficial de la Federación: https://www.dof.gob.mx/nota_to_imagen_fs.php?codnota=4794216&fecha=18/10/1993&cod_diario=206346
- DOF. (6 de Enero de 1997). *NOM-001-SEMARNAT-1996*. Recuperado el 03 de Enero de 2020, de Diario Oficial de la Federación:

https://www.dof.gob.mx/nota_to_imagen_fs.php?codnota=4863829&fecha=06/01/1997&cod_diario=208862

- DOF. (21 de Septiembre de 1998). *NOM-003-SEMARNAT-1997*. Recuperado el 05 de Enero de 2020, de Diario Oficial de la Federación:
https://www.dof.gob.mx/nota_to_imagen_fs.php?codnota=4893449&fecha=21/09/1998&cod_diario=209610
- DOF. (17 de Abril de 2001). *NMX-AA-012-SCFI-2001*. Recuperado el 03 de Enero de 2020, de Diario Oficial de la Federación:
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=767361&fecha=17/04/2001
- DOF. (21 de Mayo de 2013). *NMX-AA-030/1-SCFI-2012*. Recuperado el 03 de Enero de 2020, de Diario Oficial de la Federación:
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5299575&fecha=21/05/2013
- DOF. (05 de Enero de 2018). *PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017*. Recuperado el 06 de Mayo de 2020, de Diario Oficial de la Federación:
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5510140&fecha=05/01/2018
- Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M., & Ledin, A. (2001). Characteristics of grey wastewater. *Elsevier*, 85-104.
- Eriksson, E., Henze, M., Auffarth, K., & Ledin, A. (2001). Characteristics of Grey Wastewater. *Elsevier*, 85-104. Recuperado el 15 de Octubre de 2019, de https://www.researchgate.net/publication/257587685_Characteristics_of_Grey_Wastewater
- Escamilla Campos, B., & Morgado Aguilar, M. (2014). *Diseño experimental para la adecuación de un humedal de flujo subsuperficial*. Ciudad de México. Recuperado el 22 de Diciembre de 2019, de https://www.zaragoza.unam.mx/wp-content/Portal2015/Licenciaturas/biologia/tesis/tesis_escamilla_campos.pdf
- FAO. (2002). *Agua y cultivos. Logrando el uso óptimo del agua en la agricultura*. Roma. Recuperado el 15 de Junio de 2019, de http://www.fao.org/tempref/agl/AGLW/docs/cropsdrops_s.pdf
- FAO. (2013). *Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos?* Roma. Recuperado el 02 de Septiembre de 2019, de <http://www.fao.org/3/i1629s/i1629s.pdf>
- Fideicomiso de Infraestructura Ambiental de los Valles de Hidalgo. (2019). Manual de Operación para las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, con diversos reusos. Tepeji del Río de Ocampo, Hidalgo, México.
- García Hidalgo, Y. (2015). Calidad del agua con fines de riego. *Revista digital de Medio Ambiente "Ojeando la agenda"*, 1-12. Recuperado el 05 de Julio de 2019
- Hanna Instruments. (2020). *Guía para la medición en campo de calidad del agua*. Recuperado el 19 de Octubre de 2020, de Hanna Instruments:

<https://www.hannacolombia.com/blog/post/190/guia-para-la-medicion-en-campo-calidad-del-agua>

- Hernández Vásquez, W. (2019). *Repositorio de la Universidad César Vallejo*. Recuperado el 15 de Noviembre de 2019, de <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/28154>
- IMTA. (2016). *Reúso de aguas residuales en la agricultura*. Jiutepec. Recuperado el 12 de Septiembre de 2019, de https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/riego-drenaje/reuso-aguas-residuales.pdf
- INEGI. (2015). *Tabulados de la encuesta Intercensal 2015*. Recuperado el 15 de Mayo de 2019, de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <https://www.inegi.org.mx/programas/intercensal/2015/#Tabulados>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (28 de Diciembre de 2017). Demanda Química de Oxígeno por refluo cerrado y volumetría. Bogotá, Colombia. Recuperado el 25 de Septiembre de 2019, de <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>
- Jiménez, B. (2015). Reúso el Agua y su situación a nivel internacional. *Reúso el Agua y su situación a nivel internacional*. Recuperado el 12 de Mayo de 2019, de Reúso del Agua y su situación a nivel internacional.
- Jiménez, C., B., Siebe G., C., & Cifuentes G., E. (1994). El reúso intencional y no intencional del agua en el valle de Tula. México. Recuperado el 17 de Junio de 2019, de https://www.researchgate.net/publication/312490486_El_Reuso_Intencional_y_No_Intencional_del_Agua_en_el_Valle_de_Tula
- Lugo Morin, D. R. (2009). El uso de aguas residuales en la agricultura en México. *Javeriana, XIII(24)*, 9-28. Recuperado el 12 de Septiembre de 2019, de <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/ambienteydesarrollo/article/view/1081>
- Luna Pabello, V. M., & Aburto, C. S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 32-55. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tip/v17n1/v17n1a3.pdf>
- Ministerio Español de Medio Ambiente. (2000). *Libro Blanco del Agua*. Madrid: Centro de Publicaciones. Recuperado el 28 de Julio de 2019
- MVOTMA. (Octubre de 2019). *Indicadores ambientales; Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)*. Recuperado el 02 de Octubre de 2020, de https://www.dinama.gub.uy/indicadores_ambientales/ficha/oan-demanda-bioquimica-de-oxigeno/
- MVOTMA. (2019). *Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente*. Recuperado el 02 de Octubre de 2020, de Indicadores Ambientales; Concentración de

Fósforo Total: https://www.dinama.gub.uy/indicadores_ambientales/ficha/oan-concentracion-de-fosforo-total/

- Ojeda Guerrero, A. D., & Santacruz Mallama, A. R. (Febrero de 2017). Evaluación de actividades antrópicas que inciden en las propiedades fisicoquímicas del agua de la quebrada la torcaza corregimiento el encano, Municipio de Pasto-Nariño. San Juan de Pasto, San Juan de Pasto, Colombia. Recuperado el 03 de Septiembre de 2019, de <http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/3153/DOCUMENTO%20PRINCIPAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- OMS. (2006). *Who Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater*. Francia: OMS. Recuperado el 20 de Enero de 2020, de https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/gsuweg4/en/
- OMS. (20 de Febrero de 2017). *World Health Organization*. Recuperado el 28 de Septiembre de 2019, de Water Quality and Health - Review of Turbidity: Information for regulators and water suppliers: https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/turbidity-information-200217.pdf
- ONU. (2014). *Decenio Internacional para la acción "El agua fuente de vida" 2005-2015*. Recuperado el 20 de Junio de 2019, de <https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml>
- ONU. (2015). *UN Water*. Recuperado el 15 de Julio de 2019, de Decenio Internacional para la Acción "El agua fuente de vida" 2005: <https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml>
- Parreiras, S. (2005). *Tratamento de esgoto por disposição no solo*. Brasil: Fundação Estatal do Meio Ambiente. Recuperado el 25 de Agosto de 2019
- PNUMA/OMS. (1996). *Water Quality Monitoring - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater*. Recuperado el 4 de Septiembre de 2019, de https://www.who.int/water_sanitation_health/resourcesquality/wqmchap2.pdf
- Ramos Olmos, R., Sepúlveda Marqués, R., & Villalobos Moreto, F. (2003). *El agua en el medio ambiente. Muestreo y análisis*. Mexicali: Plaza y Valdés. Recuperado el 03 de Noviembre de 2019, de https://books.google.com.mx/books?id=b8l-xhCHPEYC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Real Academia Española. (Agosto de 2019). *Parámetro*. Madrid, España. Recuperado el 25 de Agosto de 2019, de <https://dle.rae.es/par%C3%A1metro>
- Rigola Lapeña, M. (1990). *Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales*. Barcelona: Marcombo. Recuperado el 18 de Septiembre de 2019, de <https://books.google.com.mx/books?id=fQcXUq9WFC8C&printsec=frontcover&dq=inauthor:%22Miguel+Rigola+Lape%C3%B1a%22&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiryfXWzoXsAhXIZc0KHZhFC4wQ6AEwAHoECAAQAg#v=onepage&q&f=false>

- S::CAN. (15 de Enero de 2020). S::can. Obtenido de <https://www.s-can.at/>
- SEMARNAT. (2014). El medio ambiente en México. Ciudad de México, Ciudad de México, México. Recuperado el 10 de Noviembre de 2019, de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/06_agua/6_2_1.html
- Siebe, C. (1994). Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el Distrito de Riego 03, Tula, Hidalgo, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 15-21. Recuperado el 09 de 01 de 2020, de <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/30146/28010>
- The Vetiver Network International. (2009). *Aplicaciones del Sistema Vetiver. Manual técnico de referencia*. Venezuela.
- The Vetiver Network International. (13 de Diciembre de 2017). *The vetiver system for the treatment of contaminated water and effluent*. Obtenido de https://www.vetiver.org/TVN_VS_GAL_PUB/VS_Effluent_o.pdf
- Torres Guerra, J., Magno Vargas, J., Pineda Aguirre, R., & Cruz Huaranga, M. (2018). Evaluación de la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales para riego mediante humedales Artificiales de flujo libre superficial (FLS) con las especies *Cyperus Papyrus* y *Phragmites Australis*, en Carapongo-Lurigancho. *Revista de Investigación, Ciencia, Tecnología y Desarrollo*. doi:<http://dx.doi.org/10.17162/rictd.v1i2.954>
- Torres, R. M. (2012). MOVILIDAD DE DI (2-ETILHEXIL) FTALATO Y NONILFENOLES EN TRES CLASES DE SUELO DEL VALLE DE TULA. México, México. Recuperado el 15 de Junio de 2019, de https://repositorio.unam.mx/contenidos/movilidad-de-di-2-etilhexil-ftalato-y-nonilfenoles-en-tres-clases-de-suelo-del-valle-de-tula-64333?c=EYZkD1&d=false&q=*&i=1&v=1&t=search_1&as=0
- UICN. (2018). *Guía de Monitoreo Participativo de la Calidad de Agua*. Unión Internacional para el Control de la Naturaleza, Quito. Recuperado el 19 de Octubre de 2020, de Unión Internacional para el Control de la Naturaleza: <https://www.iucn.org/sites/dev/files/content/documents/guia-monitoreo-participativo-calidad-agua-digital.pdf>
- UNESCO. (2015). *AGUA PARA UN MUNDO SOSTENIBLE. DATOS Y CIFRAS*. Italia: WWAP. Recuperado el 08 de Mayo de 2019, de http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/WWDR2015Facts_Figures_SPA_web.pdf
- UNESCO. (2017). *Aguas residuales. El recurso no explotado*. Francia.
- Universidad Técnica de Hamburgo. (2019). *Domestic wastewater sources and its characteristics*. Obtenido de https://cgi.tu-hamburg.de/~awwwweb/wbt/emwater/lessons/lesson_a1/lm_pg_1066.html
- UNU-FLORES. (2017). *Uso seguro de aguas residuales en la agricultura: Ejemplos de buenas prácticas*. Universidad de las Naciones Unidas. Instituto para la Gestión Integral de Flujos,

Materiales y Recursos, Dresden. Recuperado el 13 de Octubre de 2019, de https://collections.unu.edu/eserv/UNU:5957/SafeUseOfWastewaterInAgriculture_ESP.pdf

UNU-FLORES. (15-17 de Marzo de 2017). Wastewater irrigation in the Mezquital Valley, Mexico: solving a century-old problem with the Nexus Approach. Proceedings of the International Capacity Development Workshop on Sustainable Management Options for Wastewater and sludge, Mexico. Dresden. Recuperado el 25 de Junio de 2019, de https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6216/Proceedings_WastewaterIrrigation_Mexico.pdf

Vazquez , G., Ortega , R., Esparza , M., & Fall, C. (2013). Fraccionamiento de DQO del agua residual de Toluca por el protocolo STOWA. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 21-35. Recuperado el 12 de Noviembre de 2019, de <https://www.redalyc.org/pdf/3535/353531982002.pdf>

Velasco Cruz, A. L. (2018). *Uso de Agua Residual Tratada para producción de forrajes, en Ixtlán de Juárez, Oaxaca*. Oaxaca.

WWAP. (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos*. París: UNESCO. Recuperado el 20 de Mayo de 2019