



## **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL - AGUA**

**ESTRATEGIA PARA LA SELECCIÓN DEL ESCENARIO CONCEPTUAL MÁS VIABLE  
PARA EL MEJORAMIENTO Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA DE LA LAGUNA LA  
PIEDAD, EN CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO.**

**TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PRESENTA  
RUTH ANGELA ADAME VILLAMIL**

### **TUTOR PRINCIPAL**

**DR. VICTOR MANUEL LUNA PABELLO  
FACULTAD DE QUÍMICA - UNAM**

### **COMITÉ TUTORAL**

**DRA. ALMA CONCEPCIÓN CHÁVEZ MEJÍA  
INSTITUTO DE INGENIERÍA –UNAM**

**DRA. GEORGINA FERNANDEZ VILLAGÓMEZ  
INSTITUTO DE INGENIERÍA – UNAM**

**M. EN I. MERCECES ESPERANZA RAMÍREZ CAMPEROS,  
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA**

**DR. OSCAR GONZÁLEZ BARCELÓ,  
INSTITUTO DE INGENIERÍA -UNAM**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**

**Tesis Digitales**

**Restricciones de uso.**

**DERECHOS RESERVADOS ©**

**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Oscar González Barceló

Secretario: M. en I. Mercedes Esperanza Ramírez Camperos

1er. Vocal: Dra. Alma Concepción Chávez Mejía

2do. Vocal: Dra. Georgina Fernández Villagómez

3er. Vocal: Dr. Víctor Manuel Luna Pabello

## SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Laboratorio de Microbiología Experimental del Departamento de Biología y Grupo Académico

Interdisciplinario Ambiental (GAIA) de la Facultad de Química

## TUTOR DE TESIS:

DR. VICTOR MANUEL LUNA PABELLO

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and strokes, positioned above a horizontal dashed line.

**FIRMA**

## AGRADECIMIENTOS

Al Posgrado en Ingeniería programa 001490 - MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL de la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme formar parte de una de las mejores universidades del mundo y así ser parte del grupo de personas que logran obtener este grado académico, que me permitirá aportar con mi trabajo a mejorar la calidad del agua y el medio ambiente en mi país, principalmente.

Gracias al apoyo económico otorgado como becaria por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) durante el presente trabajo con número de becario 950065 del 1º de agosto de 2019 al 31 de julio del 2021.

Agradezco el apoyo recibido por parte del PAIP FQ-VMLP 5000-9111.

Al Dr. Victor Manuel Luna Pabello, quien me apoyo tanto sobre todo en recordarme que yo soy capaz, aún a la distancia por haber tenido que completar este trabajo en medio del confinamiento por la Pandemia de SARS-CoV-2.

A mis tutores por tener la disposición de revisar mis avances y aportar sus valiosas observaciones para poder presentar este trabajo compartiendo su experiencia y conocimiento.

A los miembros del Laboratorio de Microbiología de la Facultad de Química de la UNAM, por el apoyo prestado para el espacio de desarrollo de esta tesis, así como para el acompañamiento durante las visitas, recorridos al área de la Laguna recorridos, así como apoyo en actividades de Laboratorio y actividades de topografía, principalmente a Oscar Alejandro López, Moisés de Pablo, Laura Ramírez y Agustín Contreras.

Agradezco el apoyo brindado por las personas que forman el Grupo Académico Interdisciplinario Ambiental (GAIA) por todo lo recibido para lograr la presente investigación.

Agradezco a la Antropóloga Angélica Dorantes Vera, colaboradora del Grupo Académico Interdisciplinario Ambiental (GAIA)-UNAM, por su apoyo para la elaboración del Cuestionario aplicado a pobladores de la Laguna la Piedad.

Agradezco el apoyo técnico brindado por el M. en C. Mario Rodríguez Varela del Laboratorio Universitario de Nanotecnología Ambiental del Instituto de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Agradezco al Dr. Pedro Magaña Melgoza, por su aportación en la revisión de este trabajo y sus valiosos comentarios.

Agradezco al M. en C. Luciano Hernández Gómez por el apoyo técnico brindado durante la elaboración de las pruebas de laboratorio.

Agradezco el apoyo incondicional brindado por el M. en C. Gustavo Raúl Schinca Muñoz por sus atenciones al llevar a cabo las visitas, acompañarme en todas y cada una de ellas y felicitarlo por su interés incansable por el saneamiento de la Laguna la Piedad y protección al medio ambiente.

A los diversos actores sociales y personas que habitan el área circundante de la Laguna, por estar siempre con la disposición de apoyar para lograr este trabajo.

A la Comisión Nacional del Agua, por tener ese espacio abierto y de consulta pública tan importante como es el “Archivo histórico del agua”, esperando que puedan seguir recopilando información y acrecentando tan valioso acervo.

Agradezco por sobre todas las cosas a mis padres por seguir siendo un ejemplo para seguir en mi vida, no solo como mis padres, sino también como profesionistas que son y que siempre me impulsan a seguir creciendo integralmente, no sólo en lo académico, son la relación a partir de la cual yo elijo siempre: elegir más. Gracias Dios por la vida de mis padres.

# ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
LISTADO DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS .....	xi
GLOSARIO .....	xiv
RESUMEN.....	1
<b>1. INTRODUCCIÓN. ....</b>	<b>2</b>
<b>1.2. Objetivos y estrategia de trabajo. ....</b>	<b>4</b>
<b>1.2.1. Objetivo general. ....</b>	<b>4</b>
<b>1.2.1.1. Objetivos particulares. ....</b>	<b>4</b>
<b>1.3. Ubicación del sitio y datos de la cuenca. ....</b>	<b>5</b>
<b>2. ANTECEDENTES.....</b>	<b>10</b>
<b>2.1. Antecedentes históricos de la Laguna la Piedad. ....</b>	<b>12</b>
<b>2.2. Datos de saneamiento. ....</b>	<b>14</b>
<b>2.3. Parámetros de contaminación del agua residual existentes. ....</b>	<b>18</b>
<b>2.3. Esfuerzos para sanear la Laguna la Piedad. ....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.1. Propuesta del municipio de Cuautitlán Izcalli para el manejo de la Laguna la Piedad. ....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.2. Propuesta del OO y el Consejo de Cuenca.....</b>	<b>22</b>
<b>3. MARCO DE REFERENCIA. ....</b>	<b>25</b>
<b>3.1. Aspectos Jurídicos Ambientales.....</b>	<b>25</b>
<b>3.1.1. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. ....</b>	<b>25</b>
<b>3.1.2. Ley de Aguas Nacionales. ....</b>	<b>26</b>
<b>3.1.3. Ley Federal de Derechos. ....</b>	<b>27</b>
<b>3.1.4. Ley Federal de Responsabilidad Ambiental. ....</b>	<b>27</b>
<b>3.1.5. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.....</b>	<b>28</b>
<b>3.1.6. Programa Nacional Hídrico 2020-2024.....</b>	<b>29</b>
<b>3.1.7. NOM-001-SEMARNAT-1996.....</b>	<b>29</b>
<b>3.1.8. NOM-003-SEMARNAT-1997.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1.9. Instructivo para Asignación de Recursos del PROSANEAR. ....</b>	<b>31</b>
<b>3.2. Aspectos técnicos ambientales.....</b>	<b>32</b>
<b>3.2.1. Parámetros de contaminación del agua residual de tipo municipal. ....</b>	<b>32</b>
<b>3.2.3. Sistemas de tratamiento de aguas residuales.....</b>	<b>34</b>

3.2.3.1. Funcionamiento de una planta de tratamiento de tecnología de Lodos Activados (LA).....	37
3.2.3.2. Funcionamiento de una planta de tratamiento de tecnología de Laguna de Estabilización.....	38
3.2.3.4. Funcionamiento de una planta de tratamiento de tecnología de Humedales Artificiales.....	40
4. METODOLOGÍA.....	44
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	47
5.1. Recorrido por la zona de influencia y diagnóstico.....	47
5.2. Generación de datos hidrológicos y propuesta de los sitios para medir los caudales.....	55
5.3. Selección de los sitios para la toma de muestras de calidad del agua.....	67
5.4. Evolución y estado actual de la Laguna la Piedad y propuestas de mejoramiento y aprovechamiento del agua, resultante del cuestionario aplicado a pobladores.....	74
5.5. Discusión de los Resultados y planteamiento del Escenario 0.....	75
6. ESTRATEGIA PARA LA SELECCIÓN DE LA PROPUESTA CONCEPTUAL MÁS VIABLE DE MEJORAMIENTO Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA INTEGRAL DE LA LAGUNA LA PIEDAD.....	81
6.1. Elaboración de una matriz de selección de tecnologías.....	81
6.1.1. Matriz de selección de tecnologías base.....	81
6.1.2. Matriz de selección de tecnologías.....	84
6.2. Estrategias de mejoramiento y aprovechamiento del agua para la Laguna la Piedad.....	92
6.2.1. Propuestas de mejoramiento y aprovechamiento del agua para la Laguna la Piedad: Escenario 1.....	95
6.2.2. Propuestas de mejoramiento y aprovechamiento del agua para la Laguna la Piedad: Escenario 2.....	99
6.2.3. Propuestas de mejoramiento y aprovechamiento del agua para la Laguna la Piedad: Escenario 3.....	101
6.2.4. Propuestas de Sanea mejoramiento y aprovechamiento del agua miento para la Laguna la Piedad: Escenario 4.....	103
6.2.5. Propuestas de mejoramiento y aprovechamiento del agua para la Laguna la Piedad: Escenario 5.....	106
6.3. Desarrollo de una propuesta técnica, económica y ambiental de una alternativa integral a nivel conceptual para el mejoramiento y aprovechamiento de agua de la Laguna la Piedad.....	108
6.3.1. Desarrollo de la propuesta técnica a nivel conceptual del Escenario 3 seleccionado.....	118
6.3.1.1. Humedal artificial de flujo subsuperficial.....	118
6.3.1.2. Diseño conceptual del sistema de cribado manual.....	121

6.3.1.3. Diseño conceptual del sistema de desarenado.....	122
6.3.1.4. Diseño conceptual de un canal Parshall. ....	123
6.3.1.5. Diseño conceptual del tanque de igualación. ....	124
6.3.1.6. Diseño conceptual del humedal artificial de flujo subsuperficial.....	125
7. CONCLUSIONES.....	128
8. REFERENCIAS. ....	130
9. ANEXOS.....	139
9.1. Documentos históricos relevantes de la Laguna la Piedad.....	139
9.2. Escritos de solicitud de cancelación de descarga en canal pluvial. ....	145
9.3. Transcripción de entrevistas. ....	149
9.4. Memoria de cálculo .....	177
Tubería de Alimentación de la PTAR.....	177
Diseño conceptual del sistema de desarenado. ....	177
Diseño conceptual del canal Parshall. ....	181
Diseño conceptual del humedal artificial de flujo subsuperficial.....	183

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. PTAR en el Municipio de Cuautitlán Izcalli, en el Estado de México. ....	14
Tabla 2. Diagnóstico ambiental del recurso agua, del Municipio de Cuautitlán Izcalli. ....	16
Tabla 3. Distribución porcentual de sitios de monitoreo en cuerpos de agua superficiales en la región hidrológico-administrativa XIII Aguas del Valle de México (CONAGUA EAM, 2018). ....	18
Tabla 4. Resultados de calidad del agua de la CAEM 6 de agosto de 2019. ....	19
Tabla 5. Límites Permisibles. ....	30
Tabla 6. LMP de contaminantes en aguas residuales tratadas. ....	31
Tabla 7. Principales grupos de contaminantes del agua y sus efectos. ....	33
Tabla 8. Representa la composición típica de aguas residuales crudas (Rodríguez-Miranda et al., 2015). ....	33
Tabla 9. Valores de contaminantes en agua residual municipal. ....	34
Tabla 10. Clasificación de los procesos de tratamiento de aguas residuales. ....	36
Tabla 11. Determinación de Factor de Corrección Fc para cálculo de caudales por método del Flotador. ....	59
Tabla 12. Recopilación de datos de medición de caudal obtenidos por sitio. ....	59
Tabla 13. Promedio del consumo de agua potable estimado por clima predominante. ....	62
Tabla 14. Aportaciones que llegan a la Laguna la Piedad, 25 de enero de 2020. ....	66
Tabla 15. Coordenadas de localización de los sitios propuestos. ....	68
Tabla 16. Programa de muestreos propuesto. ....	70
Tabla 17. Resultados de los muestreos realizados el 21 de febrero del año 2020. ....	71
Tabla 18. Resultados de los muestreos realizados el 23 de marzo de 2020. ....	72
Tabla 19. Comparación técnica, económica y ambiental con diferentes sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales. ....	83
Tabla 20. Comentarios de las consideraciones para la aplicación de las ponderaciones. ....	87
Tabla 21. Matriz de Selección de Tecnologías. ....	88
Tabla 22. INPC de enero de 2012 a febrero 2021. ....	93
Tabla 23. Eficiencia de remoción por tecnologías. ....	94
Tabla 24. Remoción del sistema de PTAR de la Estrategia 1. ....	97
Tabla 25. Costos de Inversión y Operación Anual del Escenario 1. ....	98
Tabla 26. Remoción del sistema de PTAR de la Estrategia 2. ....	100
Tabla 27. Costos de Inversión y Operación Anual del Escenario 2. ....	100
Tabla 28. Remoción del sistema de PTAR de la Estrategia 3. ....	102
Tabla 29. Costos de Inversión y Operación Anual del Escenario 3. ....	103
Tabla 30. Remoción del sistema de PTAR de la Estrategia 4. ....	104
Tabla 31. Costos de Inversión y Operación Anual del Escenario 4. ....	105
Tabla 32. Costos de Inversión y Operación Anual del Escenario 5. ....	108
Tabla 33. Costos de inversión total de la propuesta integral de mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad. ....	110
Tabla 34. Comparativa de datos obtenidos en los escenarios. Elaboración propia. ....	113
Tabla 35. Matriz de viabilidad de Escenarios. Elaboración Propia. ....	114
Tabla 36. Concentración de contaminantes en el influente del sistema. ....	119
Tabla 37. Resumen de los valores de las rejillas para sólidos medios. ....	122
Tabla 38. Dimensiones finales del desarenador. ....	123
Tabla 39. Viscosidad dinámica del agua líquida a varias temperaturas. ....	178
Tabla 40. Cálculo de valores propuestos para el desarenador. ....	181
Tabla 41. Características de descarga de canales Parshall (Ackers, 1978). ....	182
Tabla 42. Geometría de los canales Parshall (Ackers, 1978). ....	183

*Tabla 43. Parámetros de diseño del HAFSS. .... 183*

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Infraestructura hidráulica, cobertura (encuesta intercensal 2015) (CONAGUA, 2019).....	2
Figura 2. Mapa de Cuautitlán Izcalli con división de Colonias sin nombres y límites territoriales. Fuente: ISCCC y División Política del Estado de México. ....	5
Figura 3. Regiones hidrológicas .....	6
Figura 4. Zona de Estudio. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020. ....	7
Figura 5. Laguna la Piedad Laguna la Piedad. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020 .....	8
Figura 6. Hidrología del Municipio de Cuautitlán Izcalli. ....	9
Figura 7. Ubicación aproximada de Sitios de Muestreos de la CAEM y parámetros que .....	21
Figura 8. Esquema conceptual de un sistema de tratamiento de aguas residuales (Noyola et al., 2013). ....	35
Figura 9. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales, por caudal tratado, 2017... ..	36
Figura 10. Descripción del tratamiento de aguas residuales de lodos activados (Noyola et al., 2013). ....	38
Figura 11. Laguna de Estabilización, PTAR de Santa María Rayón, México (Noyola et al., 2013). ....	39
Figura 12. Tipos de lagunas aireadas (Facultativas) (CONAGUA, MAPAS 27, 2015).....	40
Figura 13. Componentes principales de un HAFSS (CONAGUA, MAPAS 20, 2015). ....	41
Figura 14. Características generales de un HA subsuperficial de flujo horizontal (Luna Pabello y Morales Ferrero, 2018). ....	42
Figura 15. Metodología empleada. ....	45
Figura 16. Ubicación de los sitios visitados el 4 de octubre de 2019. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020. ....	48
Figura 17. Vista de la Laguna desde el lado norponiente, 4-octubre-2019. ....	48
Figura 18. Entrada de Agua a la Laguna por el río Barranca de Zamorillas, 4-octubre-2019. ....	49
Figura 19. Salida de agua de la Laguna hacia el río Cuautitlán, 4-octubre-2019.....	49
Figura 20. Estado de contaminación visual de la Laguna, 4-octubre-2019. ....	50
Figura 21. Aves en el cuerpo de la Laguna, 4-octubre-2019.....	50
Figura 22. Derecha RSU en el cuerpo de la Laguna, a la izquierda RSU en la salida a riego de la Laguna, 4- octubre-2019. ....	51
Figura 23. Vertedor de la Laguna, hacia la salida al río Cuautitlán, 4-octubre-2019. ....	51
Figura 24. Situación de la PTAR la Piedad II, 4-octubre-2019.....	52
Figura 25. Situación de la PTAR Lomas de Cuautitlán, 4-octubre-2019. ....	53
Figura 26. Cauces de interés en la zona de influencia. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020. ....	53
Figura 27. Entrada de Agua Residual a la Laguna la Piedad. Barranca de Zamorillas, 25-enero-2020. ....	54
Figura 28. Localización de los sitios visitados y las mediciones de caudal el 25 de enero del 2020. Fuente Google LLC, Google Earth Pro, 2020. ....	55
Figura 29. Flujo Hídrico del Total de Entradas y Salidas de la Laguna la Piedad.....	57
Figura 30. Localización de sitios que podrían estar descargando directo a la Laguna la Piedad. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020. ....	61
Figura 31. Flujo Hídrico de la Laguna la Piedad durante la temporada de estiaje (datos promedio). ....	63
Figura 32. Balance hídrico de la Laguna la Piedad, en el Estado de México, en temporada de Estiaje con apertura de la compuerta de la Presa Lago de Guadalupe (Elaborado con datos propios). ....	64
Figura 33. Balance hídrico de la Laguna la Piedad, en el Estado de México, en temporada de Lluvia (Elaborado con datos propios).....	65
Figura 34. Medidas de caudal en sitio. 25 de enero de 2020. ....	67
Figura 35. Ubicación de los Sitios de Muestreo. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020. ....	69
Figura 36. Ubicación de los sitios de muestreo de fecha 21 de febrero del 2020. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020. ....	71

Figura 37. Ubicación de los sitios de muestreo del 23 de marzo de 2020. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020. ....	73
Figura 38. Planteamiento del Escenario 0. Descargas sin tratamiento desde las PTAR La Piedad II y Lomas de Cuautitlán hacia la Laguna la Piedad. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020. ....	77
Figura 39. Elevaciones desde una descarga desde la PTAR Lago de Guadalupe y hacia la Laguna la Piedad. Fuente Google LLC, Google Earth Pro, 2020. ....	78
Figura 40. Huella de carbono (emisiones equivalentes de CO <sub>2</sub> ) de los trenes de tratamiento más representativos en México (Güereca L.P. et al., 2015). ....	79
Figura 41. Propuesta Escenario 1 para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020. ....	96
Figura 42. Propuesta Escenario 2 para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020. ....	99
Figura 43. Propuesta Escenario 3 para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020. ....	101
Figura 44. Propuesta Escenario 4 para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020. ....	105
Figura 45. Propuesta Escenario 5 para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020. ....	107
Figura 46. propuesta integral de mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020. ....	111
Figura 47. Localización del predio elegido para la construcción del HAFSS. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020. ....	120
Figura 48. Corte de la reja. ....	121
Figura 49. Configuración del canal Parshall, vista superior. ....	124
Figura 50. Configuración del canal Parshall, perfil hidráulico. ....	124
Figura 51. Diagrama de tren de tratamiento propuesto. ....	125
Figura 52. Componentes del balance hidráulico del humedal de flujo subsuperficial de tipo horizontal. ....	126
Figura 53. Desarrollo de especies vegetales en humedales artificiales. ....	126
Figura 54. Oficio No. R-16.11.3/2419 de fecha 8 de septiembre del año 1978 (hoja 1) del Expediente 201/44933 del Archivo Histórico del Agua, donde se indica la Declaratoria de Propiedad Nacional de la Laguna la Piedad. ....	139
Figura 55. Oficio No. R-16.11.3/2419 de fecha 8 de septiembre del año 1978 (hoja 2) del Expediente 201/44933 del Archivo Histórico del Agua, donde se indica la Declaratoria de Propiedad Nacional de la Laguna la Piedad. ....	140
Figura 56. Oficio No. 204.3.1.-681 de fecha 20 de enero del año 1982 (hoja 1) del Expediente 201/48255 del Archivo Histórico del Agua, donde se informa sobre la propiedad de los terrenos de la Laguna. .	141
Figura 57. Oficio No. 204.3.1.-681 de fecha 20 de enero del año 1982 (hoja 2) del Expediente 201/48255 del Archivo Histórico del Agua, donde se entrega el plano VM-AH-826 de julio de 1980 que ubica el polígono del terreno otorgado. ....	142
Figura 58. Oficio No. 204.3.1.-681 de fecha 20 de enero del año 1982 (hoja 1) del Expediente 201/48255 del Archivo Histórico del Agua, donde se indica que la Laguna la Piedad es un vaso natural y no una presa. ....	143
Figura 59. Copia del Plano VM-AH-0826 de julio de 1980, de la demarcación de la zona federal de la Laguna la Piedad del Expediente 3205/47821 del Archivo Histórico del Agua. ....	144
Figura 60. Escrito de fecha 17 de septiembre de 2019, recibido por OPERAGUA, con solicitud de cancelación de descarga de aguas negras a la laguna la Piedad. ....	145
Figura 61. Oficio OIOPDM/DG/1878/2019 de fecha 27 de septiembre de 2019, firmado por OPERAGUA, en atención a la solicitud de cierre de descarga de aguas negras en la laguna la Piedad. ....	146

*Figura 62 Escrito sin fecha, recibido por OPERAGUA el 11 de Septiembre de 2020, con solicitud de cancelación de descarga de aguas negras a la laguna la Piedad..... 147*

*Figura 63. Oficio OIOPDM/DG1757/2020 de fecha 19 de noviembre de 2020, signado por OPERAGUA, en atención a la solicitud de cierre de descarga de aguas negras en la laguna la Piedad. .... 148*

## LISTADO DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

<b>ANP</b>	Área Natural Protegida.
<b>Art.</b>	Artículo.
<b>CAEM</b>	Comisión Estatal del Agua del Estado de México.
<b>CEA</b>	Comisión Estatal del Agua de Jalisco.
<b>CONAGUA</b>	Comisión Nacional del Agua.
<b>COV</b>	Carbonos Orgánicos Volátiles
<b>CS</b>	Concreto simple.
<b>CR</b>	Concreto reforzado.
<b>CRRRI</b>	Concreto reforzado con revestimiento interior
<b>CUSF</b>	Cambio de Uso de Suelo Forestal.
<b>DBO</b>	Demanda bioquímica de oxígeno.
<b>DOF</b>	Diario Oficial de la Federación.
<b>DQO</b>	Demanda química de oxígeno.
<b>DGIAR</b>	Dirección General de Infraestructura Agraria y Riego, del Ministerio de Agricultura y Riego de Lima, Perú.
<b>EAM</b>	Estadísticas del Agua en México.
<b>EMA</b>	Entidad Mexicana de Acreditación, A.C.
<b>FC</b>	Fibrocimiento.
<b>HA</b>	Humedal Artificial.
<b>HAM</b>	Humedal Artificial Mixto.
<b>Hab</b>	Habitantes.
<b>HAFSS</b>	Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial.
<b>IMTA</b>	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
<b>INAFED</b>	Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal.
<b>INEGI</b>	Instituto Nacional de Estadística y Geografía, desde el año 2018 según la promulgación de la Ley del Sistema Nacional de Información, Estadística y Geografía.
<b>INPC</b>	Índice Nacional de Precios al Consumidor.

<b>ISCCC</b>	International Safe Community Certifying Center (Centro Internacional de Certificaciones de Comunidades Seguras).
<b>LA</b>	Lodos Activados.
<b>LAN</b>	Ley de Aguas Nacionales.
<b>LMP</b>	Límite máximo permisibles.
<b>MAPAS</b>	Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento.
<b>MDP</b>	Millones de pesos.
<b>MIA</b>	Manifestación de impacto Ambiental.
<b>msnm</b>	Metros sobre el nivel del mar.
<b>Mod.</b>	Modelo.
<b>ND</b>	No Disponible.
<b>NOM</b>	Norma Oficial Mexicana.
<b>ONU</b>	Organización de las Naciones Unidas.
<b>OO</b>	Organismo Operador.
<b>OPERAGUA</b>	Organismo público descentralizado para la prestación de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento, del municipio de Cuautitlán Izcalli, estado de México.
<b>PPA</b>	Planta Potabilizadora de Agua.
<b>PD</b>	Promedio Diario.
<b>PDM</b>	Plan de Desarrollo Municipal.
<b>PDZP</b>	Programa para el Desarrollo de Zonas Prioritarias.
<b>PEAD</b>	Polietileno de alta densidad.
<b>PM</b>	Promedio Mensual.
<b>PTAR</b>	Planta de tratamiento de aguas residuales.
<b>PTLA</b>	Planta de tratamiento de lodos activados.
<b>PND</b>	Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024.
<b>PNH</b>	Programa Nacional Hídrico 2020-2024.
<b>PROSANEAR</b>	Programa de Acciones de Infraestructura, Operación y Mejoramiento de Eficiencia de Saneamiento, conforme al artículo 279 de la Ley Federal de Derechos, para la asignación de recursos del Programa de Saneamiento de Aguas Residuales.

<b>PVC</b>	Policloruro de vinilo.
<b>RHA</b>	Región Hidrológico-Administrativa.
<b>RSU</b>	Residuos sólidos urbanos.
<b>SEDESOL</b>	Secretaría de Desarrollo Social.
<b>SEMARNAT</b>	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
<b>SARH</b>	Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
<b>SBS</b>	Sistema de tratamiento de aguas residuales operado sobre la base de tecnología de lodos activados, en una secuencia de ciclos de llenado y de vaciado.
<b>SBR</b>	Reactores Biológicos Secuenciales, son reactores discontinuos en los que el agua residual se mezcla con un lodo biológico en un medio aireado. El proceso combina en un mismo tanque reacción, aireación y clarificación (El Agua de Madrid, 2006).
<b>SS</b>	Sólidos sedimentables.
<b>SDT</b>	Sólidos disueltos totales.
<b>SST</b>	Sólidos suspendidos totales.
<b>SSV</b>	Sólidos suspendidos volátiles.
<b>ST</b>	Sólidos totales.
<b>T</b>	Temperatura.
<b>TRH</b>	Tiempo de residencia hidráulica.
<b>Q<sub>max</sub></b>	Gasto máximo.
<b>Q<sub>med</sub></b>	Gasto medio.
<b>V.I.</b>	Valor Instantáneo.

## GLOSARIO

- Aguas residuales:** Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos público urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento y en general, de cualquier uso, así como la mezcla de ellas (LAN, 2020).
- Calidad del agua:** La calidad del agua se determina mediante la caracterización física y química de muestras de agua y de comparación con normas y estándares de calidad. De esta forma, se puede identificar si el agua es idónea para los requerimientos de calidad asociados a un uso determinado; por ejemplo: el consumo humano o el ambiente, y en su caso, los eventuales procesos de depuración requeridos para la remoción de elementos indeseables o riesgosos (ONU, 2016).
- Consejos de Cuenca:** Órganos colegiados de integración mixta, que serán instancia de coordinación y concertación, apoyo, consulta y asesoría, entre la CONAGUA, incluyendo el Organismo de Cuenca que corresponda, y las dependencias y entidades de las instancias federal, estatal o municipal, y los representantes de los usuarios de agua y de las organizaciones de la sociedad, de la respectiva cuenca hidrológica o región hidrológica (LAN, 2020).
- Contaminación:** Incorporación de agentes extraños al agua, capaces de modificar su composición física, química y calidad (CONAGUA EAM, 2018).
- Cuerpo Receptor:** La corriente o depósito natural de agua, presas, cauces, zonas marinas o bienes nacionales donde se descargan aguas residuales, así como los terrenos en donde se infiltran o inyectan dichas aguas, cuando puedan contaminar los suelos, subsuelos o acuíferos (CONAGUA EAM, 2018).
- Eutrofización:** También conocida como eutrofización (CONAGUA EAM, 2018). Es un aumento de nutrientes en el agua que genera un excesivo desarrollo de algas y microorganismos consumidores de oxígeno que afectan principalmente a la vida de la fauna acuática habitual (CONAGUA, MAPAS 30, 2015). Los contaminantes cuyo ingreso a los acuíferos deben ser controlados y limitados, pues contribuyen a la eutrofización son nitratos, fosfatos, sustancias que afectan el balance de oxígeno y pueden medirse a través de parámetros como DBO y DQO, así como cloruros, sulfatos y similares (CONAGUA, MAPAS 38, 2015).
- Gestión Integrada de los Recursos Hídricos:** Proceso que promueve la gestión u desarrollo coordinado del agua, la tierra, los recursos relacionados con éstos y el ambiente, con el fin de maximizar el bienestar social y económico equitativamente sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales. Dicha gestión está íntimamente vinculada con el desarrollo

sustentable. Para la aplicación de la LAN, en relación con este concepto se consideran primordialmente agua y bosque (LAN, 2020).

**Léntico:** Cuerpos de agua cuyo contenido de líquido de mueve básicamente dentro de la depresión del terreno donde se hallan y lo hace principalmente con movimientos convectivos con un recambio de aguas más o menos limitado. Concepto aplicado a las aguas estancadas, como pantanos, estanques, lagos y los humedales, que son cuerpos de agua someros. (CONAGUA EAM, 2018).

**Organismo Operador (OO):** Instancia del gobierno estatal o municipal encargada de la prestación de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento (Reglas de Operación para el programa de Agua Potable, Drenaje y Tratamiento a cargo de la Comisión Nacional del Agua aplicables a partir de 2020).

**Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR):** Infraestructura diseñada para recibir aguas residuales y remover materiales que degraden la calidad del agua o pongan en riesgo la salud pública cuando se descarguen a cuerpos o cauces receptores (USGD, 2016).

**Región Hidrológico-Administrativa (RHA):** Área territorial definida de acuerdo con criterios hidrológicos, integrada por una o varias regiones hidrológicas, en la cual se considera a la cuenca hidrológica como la unidad básica para la gestión de los recursos hídricos. El municipio representa, como en otros instrumentos jurídicos, la unidad mínima de gestión administrativa en el país (LAN, 2020).

**Saneamiento:** Recogida y transporte del agua residual y el tratamiento tanto de ésta como de los subproductos generados en el curso de esas actividades, de forma que su evaluación produzca el mínimo impacto en el medio ambiente (LAN, 2020).

Así como la producción y captación de biogás, y a partir de éste, la cogeneración de energía eléctrica para autoconsumo y el reúso, la reutilización e intercambio del agua residual tratada; también el uso y manejo de fuentes de energía alternativas para la generación de energía para autoconsumo (CONAGUA, MAPAS 25, 2015).

**Saprobiedad:** Permite evaluar el contenido de materia orgánica disuelta biodegradable medida como demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), mediante el reconocimiento de especies indicadoras previamente catalogadas para un intervalo de concentración (Luna-Pabello, 2006).

**Vaso de lago, laguna o estero:** El depósito natural de aguas nacionales delimitado por la COTA de la creciente máxima ordinaria (LAN, 2020).

## RESUMEN.

El presente trabajo está enfocado en la generación de una estrategia para la selección del escenario más viable para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad, ubicada en el municipio de Cuautitlán Izcalli, Estado de México. La estrategia desarrollada pretende contribuir a encontrar alternativas de solución conceptual a problemas de contaminación de agua en cuerpos lagunares, ocasionados por la recepción de aguas residuales sin tratamiento previo. Este tipo de prácticas ocasiona la pérdida de espacios de recreación, problemas de eutrofización del propio embalse, uso de mala calidad de agua para el riego de cultivos, aporte de contaminantes a otros cauces receptores de sus efluentes y afectación a la salud de la población circundante.

En el caso particular de la Laguna la Piedad, ésta recibe de forma constante agua residual municipal proveniente de las colonias que descargan el agua directamente de las casas sin tratamiento alguno. Las consecuencias directas implican una grave afectación de su ecosistema. Esta situación se agrava debido a la acumulación de sólidos sedimentables en el fondo de la Laguna, así como por los depósitos de residuos sólidos urbanos en sus orillas. Lo anterior en su conjunto, genera focos de infección, olores desagradables y mal aspecto, lo que impacta negativamente sobre el paisaje, la biodiversidad y la salud de las personas que habitan en sus alrededores.

Como parte de la estrategia, se realizó la consulta de información pública disponible, se realizaron encuestas a la población, una campaña de muestreo de calidad de agua y se generó información técnica que permitió determinar, de manera conceptual, la alternativa más factible desde el punto de vista técnico, social y económico. De manera complementaria, se generaron datos de calidad del agua a tratar y medidas de caudal en diversos puntos, de forma que permitieran consolidar el diseño conceptual de la alternativa propuesta.

Otro aspecto que se tomó en cuenta fue la infraestructura de saneamiento existente, basada en sistemas de lodos activados (LA) como son la Planta de Tratamiento de Aguas residuales (PTAR) Lago de Guadalupe, la PTAR la Piedad II y la PTAR Lomas de Cuautitlán. Asimismo, se tomaron en cuenta los proyectos en curso o en gestión, como es el caso del colector marginal. Además, se consideraron las nuevas propuestas de creación de infraestructura a nivel conceptual, como una PTAR tipo humedal artificial y una nueva PTAR LA. Lo anterior en conjunto, permitirá reducir el nivel de contaminantes presentes en el caudal del agua que entra a la Laguna la Piedad. Se considera que, al mejorar la calidad del agua de la Laguna, disminuiría su nivel de eutrofización; reduciría los riesgos a la salud de las personas que habitan en sus alrededores; recuperarían su biodiversidad; podría prestar servicios de esparcimiento ecoturístico; y seguiría aprovechándose para uso agrícola, acuaponía y eventualmente pesca. Es por lo anterior, que en este trabajo se analiza y posteriormente se selecciona una alternativa de tratamiento que permita mejorar la calidad del agua que actualmente entra a la Laguna la Piedad. De manera particular, se presta atención al uso de tecnología tipo Humedal Artificial (HA) debido a su bajo costo de operación, facilidad de mantenimiento, obtención de subproductos útiles y alta capacidad de remoción de nutrientes en comparación a otras alternativas de tratamiento.

## 1. INTRODUCCIÓN.

Uno de los desafíos hídricos que se enfrenta a nivel global es el de dotar de servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento a la población. Esto, por el crecimiento demográfico acelerado y las dificultades técnicas que cada vez son mayores. Es importante, para la calidad de vida y el desarrollo integral de las familias contar con estos servicios, aunque en México, la población que cuenta con estos beneficios ha crecido (CONAGUA, 2015).

En México, el agua ha sido reconocida como un asunto estratégico y de seguridad nacional, pues es un factor clave en el desarrollo social. Lograr que todos los cuerpos de agua superficiales y subterráneos del país recuperen su salud, aporten caudales para satisfacer las necesidades de la población y contribuyan al crecimiento económico y calidad de vida de la población; requiere que se mantengan limpios, sin descargas de aguas residuales de ningún tipo que los contaminen y afecten más allá de su capacidad natural de asimilación y dilución (De la Peña, 2013).

En la República Mexicana, la población que tiene acceso tanto a los servicios de agua potable como de alcantarillado y saneamiento ha crecido en los últimos años (1991-2015) de 78.4% a 95.3% y de 61.5% a 92.8%, respectivamente (CONAGUA, 2017), estos datos corresponden solo al uso municipal. Contar con estos servicios es un factor determinante de la calidad de vida y del desarrollo integral de una sociedad.

Este trabajo se enfocó principalmente en el tratamiento de aguas residuales de tipo municipal, más que en el abastecimiento y potabilización de esta. Cabe señalar que, en México, los esfuerzos gubernamentales se han ocupado más en temas de abastecimiento de agua potable, que en el tratamiento de las aguas residuales. Lo anterior puede verse en las coberturas derivadas de la encuesta intercensal 2015, en la que se indica se ha alcanzado un acceso a los servicios de agua entubada de 95.3%, agua entubada en la vivienda o predio de 94.4%, acceso a los servicios de alcantarillado y saneamiento básico de 92.8% y drenaje a red pública o fosa séptica de 91.4%, lo que se ilustra en la Figura 1.



Figura 1. Infraestructura hidráulica, cobertura (encuesta intercensal 2015) (CONAGUA, 2019)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fuente: CONAGUA (2019), Estadísticas del Agua en México 2018.

Dentro de la infraestructura hídrica con la que se cuenta en la República Mexicana para proporcionar el agua requerida a los diferentes usuarios nacionales, se dispone de más de 5 mil presas y bordos de almacenamiento, 6.5 millones de hectáreas con riego, 2.8 millones de hectáreas con temporal tecnificado, 908 plantas potabilizadoras en operación, 2,536 PTAR municipales en operación, 3,041 PTAR industriales en operación y más de 3,000 km de acueductos (CONAGUA, 2017).

Sin embargo, el problema no se localiza en la infraestructura existente y en operación, sino en la que se encuentra abandonada, sin operar o es inexistente.

Las aguas residuales municipales provenientes de pequeñas comunidades y descargadas sin previo tratamiento a ríos, arroyos y lagos impactan negativamente a los sistemas acuáticos que sirven de cuerpos receptores. Debido principalmente al elevado contenido de nutrientes (nitrógeno y fósforo) presentes en el agua residual municipal, que acelera el proceso de eutrofización, el cual reduce el oxígeno disponible como consecuencia de la descomposición aerobia de la materia orgánica presente sin tratar lo que provoca el incremento en la turbidez del agua, el surgimiento de condiciones anóxicas, la generación de malos olores y la pérdida de la biodiversidad; además de poner en riesgo potencial la salud pública de las comunidades aledañas (Merino, 2017).

La contaminación del agua se puede considerar un costo social que toda actividad económica genera y que implica una pérdida de bienestar general, ya que el saneamiento para volverla potable demanda un costo extra (Saldívar, 2007, en Espinoza *et al.*, 2010, Ávila *et al.*, 2018). El agua que se contamina como consecuencia de su uso por la actividad humana es lo que en economía se conoce como externalidad negativa (Ávila *et al.*, 2018).

Según datos de la CONAGUA, se vierten 229.12 metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ) de aguas residuales de uso público urbano, de los cuales 17.12  $m^3/s$  se vierten en lugares pequeños o cuerpos de agua (CONAGUA, 2017b) y 212.2  $m^3/s$  son descargados a las redes de los sistemas de alcantarillado o a cuerpos de agua, de este caudal, únicamente se trata el 58.2% de las aguas residuales y el resto se vierte sin tratamiento alguno (CONAGUA, 2016b).

Esto quiere decir, que cada segundo se vierte a las redes de descarga y cuerpos de agua 88.6  $m^3/s$  de aguas contaminadas sin tratamiento alguno y que son provenientes de uso público urbano. Cada litro de agua residual contaminada proviene de aproximadamente ocho litros de agua dulce (FEA, 2006), lo que tiene un efecto multiplicativo de 708.8  $m^3/s$  que deja de estar disponible para su uso (Ávila *et al.*, 2018).

La CONAGUA reporta los gastos de aguas tratadas en  $m^3/s$  de los años 2006 a 2015 (CONAGUA, 2016a), y a ese ritmo de 4.6  $m^3/s$  anuales de nuevo tratamiento de aguas municipales vertidas al sistema de drenaje sería hasta el año 2031 cuando se alcance a tratar el 90% del actual caudal de 212.2  $m^3/s$  de agua residuales, sin considerar los nuevos caudales que se generen en ese periodo. Se requiere de un verdadero compromiso por parte de las autoridades federales, estatales y municipales para hacer esfuerzos mayores en el tratamiento de las aguas residuales urbanas e industriales para detener la contaminación y deterioro del medio ambiente de los mexicanos (Ávila *et al.*, 2018).

Es necesario mencionar que, debido a la escasa entrada y salida de agua, los lagos sufren graves problemas de contaminación mientras que los ríos, por su capacidad de arrastre y el movimiento de las aguas, son capaces de soportar mayor cantidad de contaminantes. Sin embargo, la presencia de residuos domésticos, fertilizantes, pesticidas y desechos industriales altera flora y fauna acuáticas (Ávila *et al.*, 2018).

Uno de los bordos de almacenamiento que constantemente está recibiendo agua residual comprometiéndolo ambientalmente, es el bordo de la Piedad (también conocido como Laguna la Piedad), en Cuautitlán Izcalli, en el Estado de México. Este cuerpo de agua, desde que sus alrededores se vieron impactados por el crecimiento de la mancha urbana, recibe aguas residuales de origen municipal que sigue siendo empleada para riego, sin contar con la calidad indicada en los Límites Máximos Permisibles (LMP) en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), ni para descarga en cuerpo de agua, ni para reuso agrícola.

Por lo anterior se vuelve relevante iniciar los estudios y proyectos que coadyuven a su rehabilitación y, por consiguiente: rescate. La selección de una estrategia para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna La Piedad, en Cuautitlán Izcalli, Estado de México, permitirá a esta Laguna ser promovida para usos recreacionales y turísticos (Comunidades Internacionales Seguras, 2011).

## 1.2. Objetivos y estrategia de trabajo.

### 1.2.1. Objetivo general.

Desarrollar la estrategia de selección de mediante una propuesta conceptual para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad en usos de riego, pesca y recreativos, en Cuautitlán Izcalli, estado de México.

#### 1.2.1.1. *Objetivos particulares.*

- Determinar la calidad del influente de la Laguna la Piedad, empleando la información pública existente, para determinar el estado de contaminación de la Laguna y su tipo.
- Estimar el balance hídrico y la calidad del influente y efluente de la Laguna la Piedad, durante el periodo de estiaje y lluvias, usando la información técnica correspondiente, para determinar el volumen que permita presentar la estrategia de selección de la propuesta conceptual.
- Determinar posibles escenarios conceptuales para el tratamiento del agua que llega a la Laguna la Piedad, involucrando infraestructura disponible y nueva.
- Desarrollar el escenario conceptual más viable para el mejoramiento de la calidad del agua que entra a la Laguna la Piedad incorporando los aspectos económicos y ambientales.

### 1.3. Ubicación del sitio y datos de la cuenca.

El municipio de Cuautitlán Izcalli se encuentra en el Estado de México, este municipio colinda al Norte con el municipio de Tepotzotlán, Cuautitlán y Teoloyucan, al este con Cuautitlán y Tultitlán, al sur con Tlalnepantla de Baz y Atizapán de Zaragoza; al oeste con Nicolás Romero y Tepotzotlán, todos ellos en el estado de México. Este municipio localiza en su territorio parte del cordón de infraestructura formado por la Autopista México-Querétaro, la carretera Cuautitlán-Tepotzotlán y los grandes colectores: Central y Poniente de la Ciudad de México (Figura 2).

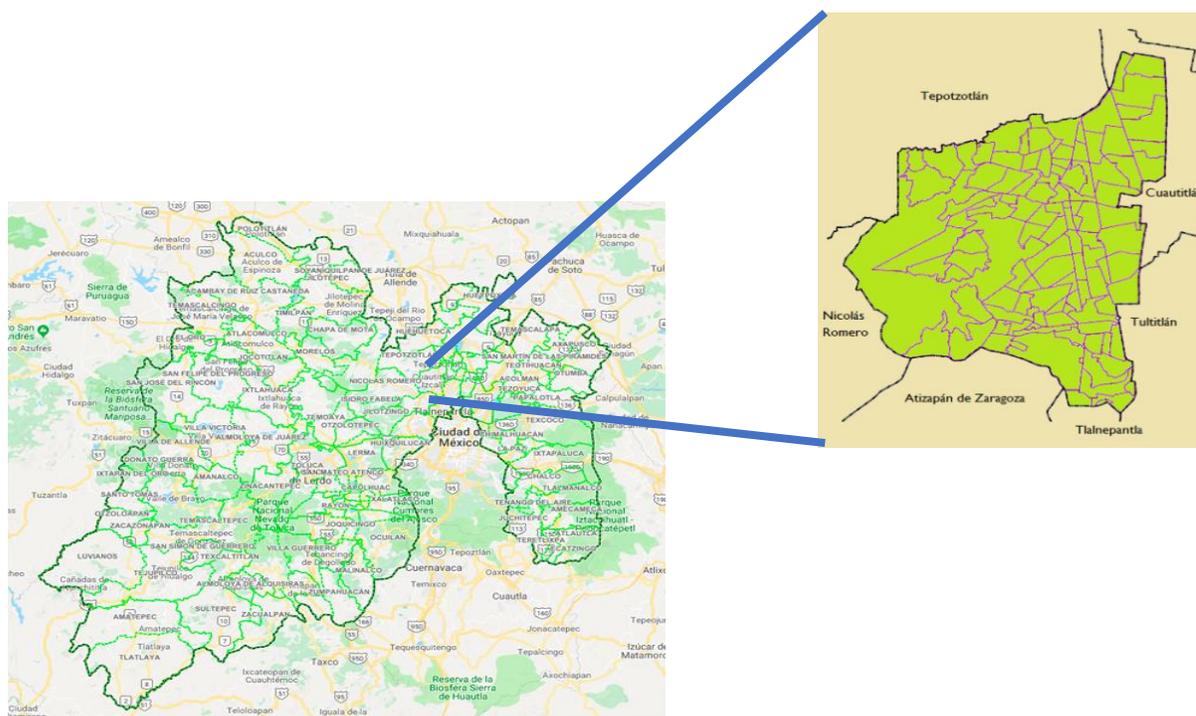


Figura 2. Mapa de Cuautitlán Izcalli con división de Colonias sin nombres y límites territoriales.

Fuente: ISCCC<sup>2</sup> y División Política del Estado de México<sup>3</sup>.

El municipio fue fundado en 1971 principalmente por su hidrología (ISCCC, 2015) y existen seis cuerpos de agua que son: Presa Lago de Guadalupe, embalse Espejo de los Lirios, el bordo la Piedad, la Laguna de Axotlán, las presas El Ángulo y el Rosario<sup>4</sup>, se encuentran localizadas en la Región Hidrológico-Administrativa XIII denominada Aguas del Valle de México.

Las cuencas del país se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas (Figura 3. Regiones Hidrológicas), que para efectos de administración de la CONAGUA se agrupan en las 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA).

<sup>2</sup> Comunidades Internacionales Seguras (International Safe Community). (2011). Programa de designación de comunidades seguras en México, 31 de mayo de 2019 Sitio web: <https://isccc.global/community/cuautitlan-izcalli/216>

<sup>3</sup> Observatorio del Estado de México, Secretaría de Finanzas (2020), Recuperado 03 de febrero de 2020, [https://observatorio.edomex.gob.mx/division\\_publica](https://observatorio.edomex.gob.mx/division_publica)

<sup>4</sup> Plan de Desarrollo Municipal de Cuautitlán Izcalli (PDM), 2019-2021.



Figura 3. Regiones hidrológicas<sup>5</sup>.

La zona de estudio (Figura 4) está localizada en la región hidrológica número 26 que corresponde al Alto Panuco, la corriente principal del municipio de Cuautitlán Izcalli es el río Cuautitlán, que nace en la Presa de Guadalupe y que atraviesa el territorio municipal recorriendo una longitud de 10.98 kilómetros (km), Los escurrimientos del río se encuentran controlados por la presa Lago de Guadalupe, con un volumen medio anual de aproximadamente 116 Millones de metros cúbicos (Mm<sup>3</sup>) (PDM 2019-2021).

La presa Lago de Guadalupe, es la de mayor superficie y se localiza al suroeste de la Laguna la Piedad y tiene una capacidad de 65 Mm<sup>3</sup> y una superficie de 358.31 Ha (hectáreas); el 90% de esta presa corresponde al municipio de Cuautitlán Izcalli y el resto al municipio de Nicolás Romero que descarga sus aguas residuales a los arroyos San Pedro, San Ildefonso y Xinté, los que posteriormente desembocan a la Presa Lago de Guadalupe (PDM 2019-2021).

<sup>5</sup> *Íbidem*.

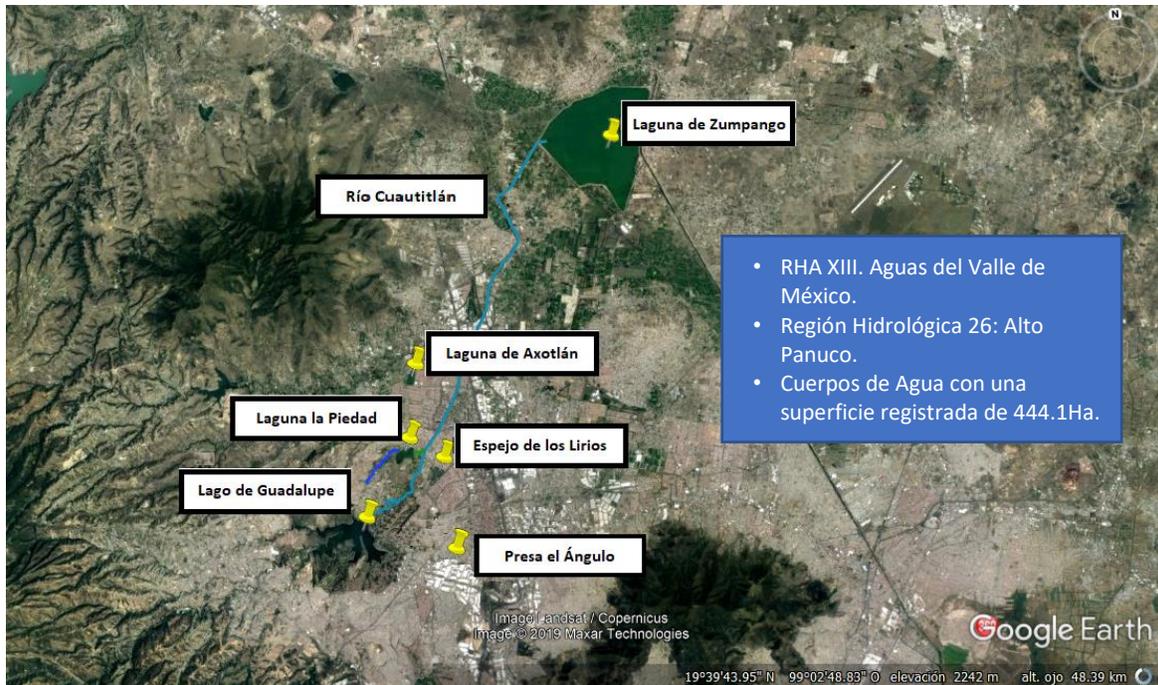


Figura 4. Zona de Estudio. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020.

La Laguna la Piedad (Figura 5), se alimenta de las aguas provenientes de la Presa Lago de Guadalupe, que fluyen a través del río Barranca de Zamorillas, también conocido como Tepojaco (antes Cuamatla) y el Excanal de la Aurora, el volumen de agua que puede llegar a almacenar la Laguna es de 762,000 metros cúbicos (m<sup>3</sup>), abarca una superficie de 31.36 Ha y actualmente es utilizada como área de esparcimiento para las comunidades cercanas; aún no cuenta con la infraestructura necesaria para su conservación y aprovechamiento (Plan de Desarrollo Municipal (PDM 2019-2021)). Durante los recorridos realizados, se observó que existe área invadida y descargas directas de las casas hacia el río Barranca de Zamorillas que viene de las propiedades que se encuentran en

ambos márgenes, así mismo, los canales de riego de las aguas provenientes de las descargas de la PTAR que se encuentran sin operar recolectan el agua residual que converge en dicho río (Figura 5).

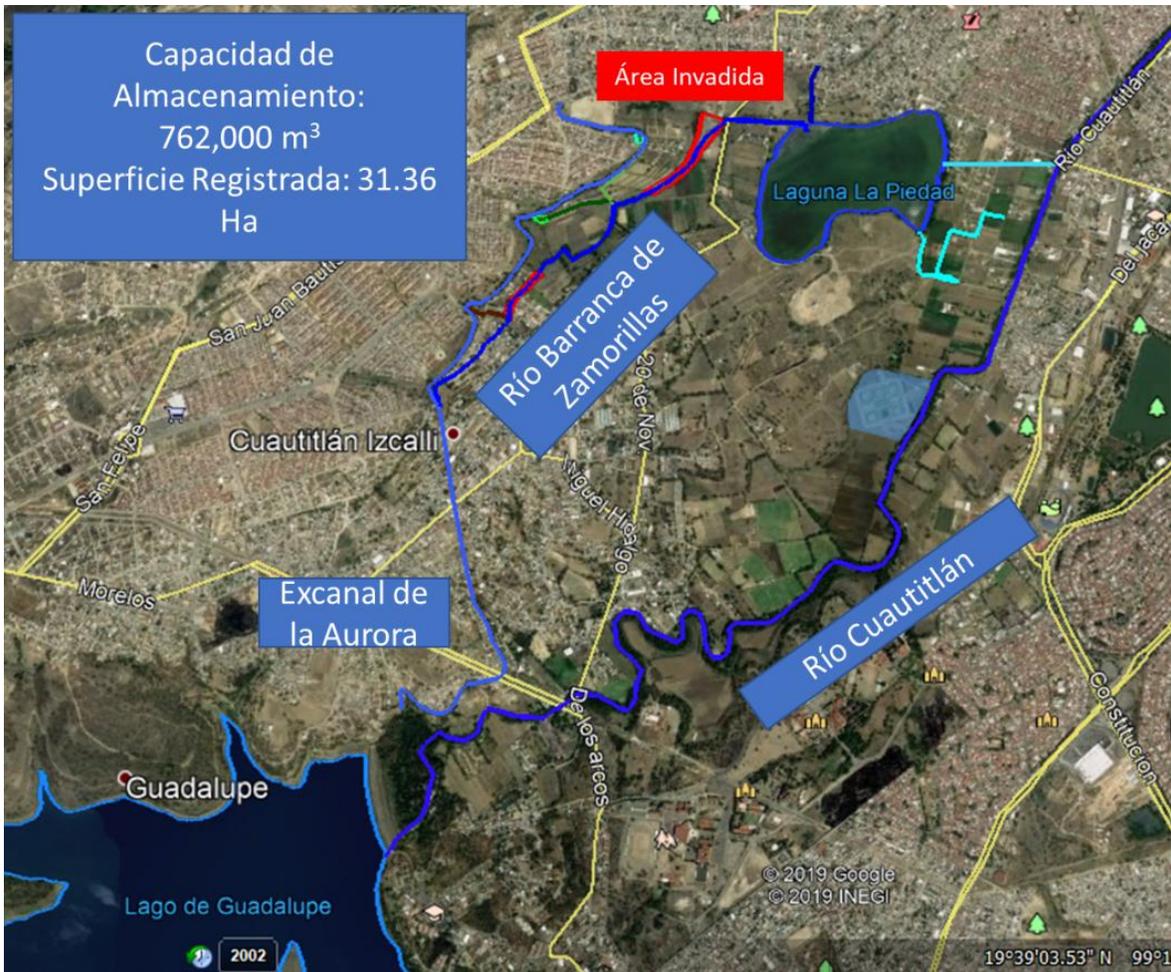
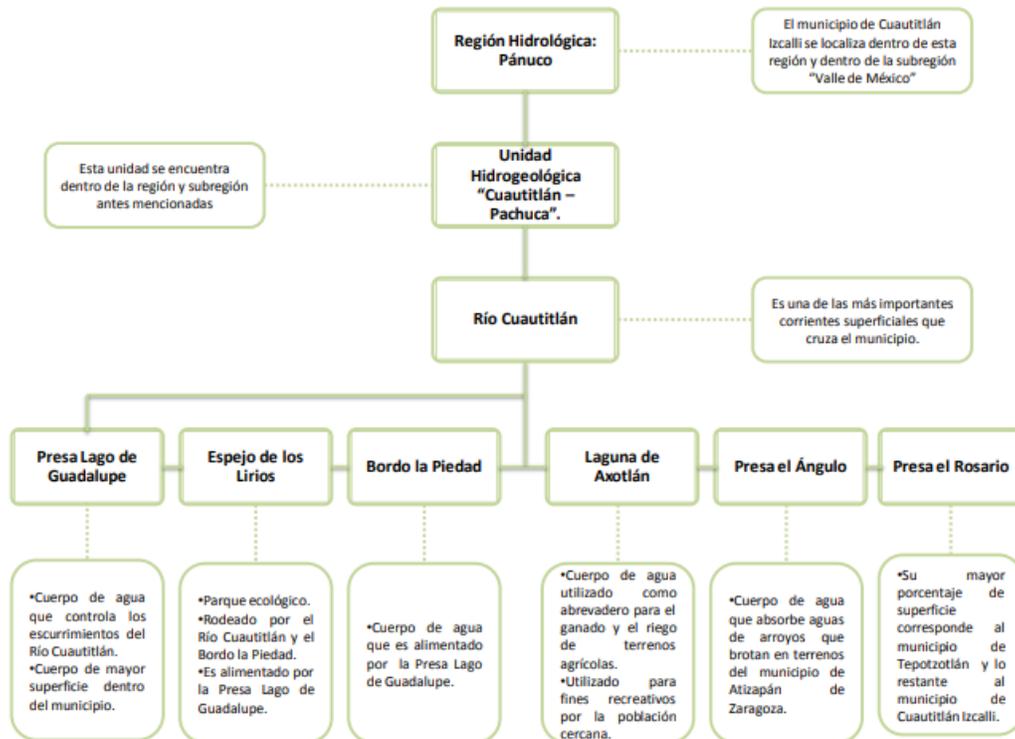


Figura 5. Laguna la Piedad Laguna la Piedad. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020

En la Figura 6, se ilustra la hidrología del municipio de Cuautitlán Izcalli, misma que se encuentra en el Plan de Desarrollo Urbano del Municipio de Cuautitlán Izcalli, publicado en 2013, en el que se denomina a la Laguna la Piedad como Bordo la Piedad y se define como un cuerpo de agua que es alimentado por la presa Lago de Guadalupe y es una aportación al río Cuautitlán y es empleada para riego de cultivos, principalmente de avena y alfalfa.



Fuente: INEGI. Carta Hidrológica

Figura 6. Hidrología del Municipio de Cuautitlán Izcalli.<sup>6</sup>

En el citado Plan de Desarrollo Municipal del Municipio de Cuautitlán Izcalli 2019-2021, se indica que la Laguna la Piedad, es un área verde parcialmente deshabitada, por lo que en su propuesta se encuentra conceptualizar y llevar a cabo proyectos integrales que contemplen la remediación de estos sitios, pues por su elevada contaminación y uso inadecuado se encuentran sumamente deteriorados<sup>7</sup>.

Según la actualización del programa de ordenamiento ecológico del territorio del Estado de México, en el instrumento No. ANPE-061 denominado Área Natural Protegida Estatal de la Política ANP Estatal, el área denominada Parque Estatal para la protección y fomento del Santuario del Agua de la Laguna de Zumpango, que consta de una superficie de 20,109.4 hectáreas, incluye dentro de esta área la correspondiente a la laguna la Piedad y sus alrededores, por lo que esta laguna puede considerarse como área natural protegida.

<sup>6</sup> Plan de Desarrollo Urbano de Cuautitlán Izcalli (2013).

<sup>7</sup> Plan de Desarrollo Municipal de Cuautitlán Izcalli, 2019-2021.

## 2. ANTECEDENTES.

Según la Subjefatura de Aprovechamientos Hidráulicos de la Oficina de Aguas Superficiales y pozos agropecuarios, en su instructivo para determinar el régimen de propiedad de las aguas localizadas en el Valle de México con No. 19246 527, que se encuentra en el Archivo Histórico del Agua de la CONAGUA, en el expediente 201/44933, se puede consultar en los anexos de esta tesis, se indica la descripción de la corriente, aunque no queda claro si se trata de la Laguna la Piedad o de los cauces que aportan a ella. A continuación, se describe la corriente:

1. Sus aguas se originan en las estribaciones del cerro Barranca de Monte Alto, a 28,000 metros (m) al Suroeste del ejido San José Huilango, en el lugar denominado Monte Alto del municipio de Nicolás Romero, en el estado de México.
  - Las aguas son de régimen intermitente y escurren en cauce bien definido.
  - Siguen un rumbo de poniente a oriente.
  - Recorren una longitud total de 28,000 m.
  - Afluyen por la margen vaso presa de Guadalupe a la corriente denominada Río Cuautitlán, la cual se encuentra determinada de propiedad nacional, mediante declaratoria No. 390 y 386 de fecha 1º y 10 de noviembre de 1923, publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) de fecha 14 y 17 de enero de 1924.
2. La corriente no pasa a otro estado ni sirve de límite entre estados ni entidades federativas.
3. Indica que sus aguas afluyen de la laguna vaso de la presa de Guadalupe.
4. No escurren aguas provenientes de minas.
5. Una vez almacenadas en la presa de Lago de Guadalupe, se conducen a la presa la piedad a través del canal de la aurora, si dejaran de escurrir libremente afluirían al río Cuautitlán.
6. Las aguas de referencia no se resumen o se pierden al llegar a otra corriente, la topografía del lugar es muy accidentada, con un grado de permeabilidad mínimo, las aguas en la presa se agotan por el aprovechamiento realizado.
7. Las aguas no se infiltran, por lo que no existen afloramientos aguas abajo.
8. La corriente no divaga, es decir sus márgenes no cambian en la época de avenidas.
9. No existen afluentes.
10. Para el caso de manantiales en el inicio, en la serranía de Monte Alto, están los denominados: Otates, las Agujas, las Aceitunas, la Luna, Guadalupana, Santa Rita, San Isidro, San Antonio, Casa Vieja, los Rieguitos y los Aposentos, localizados a 28,000 m al sur de San José Huilango.
  - Los manantiales afloran al inicio del cauce.
  - Son de régimen permanente.
  - Las aguas son aprovechadas totalmente, éstas cuentan con un cauce natural a través del río colorines, la obra de conducción es el Canal Cuamantla y la captación la presa la Piedad.
11. El informe no proporciona información para el caso de lagos, lagunas o esteros.

12. Indica que a esta presa escurre un gasto de 10 LPS aproximadamente, las aguas que escurren son permanentes, y como la mayoría del agua que almacena son “*brincas*” o provenientes de avenidas pluviales, no se ha determinado el gasto que afluye de la misma.
13. Los nombres de los usuarios de las aguas de referencia, citados en orden descendente en que se localiza la corriente son: Ejido San José Huilango, Rancho San Antonio y Santa María Tianguistengo.
14. Al respecto de si sobra agua después del último aprovechamiento y en qué cantidad durante el estiaje, se indica que no tienen sobrantes.
15. Al respecto de informar si los usuarios tienen permiso alguno otorgado por la SARH o tramite de legalización de sus derechos, se indica que únicamente el ejido San José Huilango cuenta con acceso al recurso según acuerdo del jefe de departamento agrario de fecha 25 de agosto de 1953, mientras que los otros dos usuarios no cuentan con el permiso respectivo, ni han efectuado los trámites.

La Laguna la Piedad está formada por un régimen intermitente y sus escurrimientos bien definidos, es un afluente del río Cuautitlán, sus aguas se originan en las estribaciones del cerro Barranca de Monte Alto, a 28 km al suroeste de San José Huilango, en el lugar denominado Monte Alto, del municipio de Nicolás Romero en el Estado de México (CONAGUA, 1983).

Adicional a esto se pudo comprobar que aun cuando el río Barranca de Zamorillas conduce las aportaciones del citado Monte Alto, estas son abundantemente enriquecidas por la descarga de agua del bordo Lago de Guadalupe, tal como se indica en la hidrología del municipio, así mismo se encuentra que la laguna es principalmente usada para riego.

Según los datos contenidos en el Plan de Desarrollo Municipal de Cuautitlán Izcalli 2019-2021 la Laguna la Piedad cuenta con las siguientes características:

- Alimentación: Aguas Provenientes de la Presa Lago de Guadalupe.
- Capacidad de Almacenamiento: 762,000 m<sup>3</sup>.
- Superficie: 31.36 Ha.
- Uso: área de esparcimiento para las comunidades cercanas.
- Necesidades: No cuenta con infraestructura para su conservación y aprovechamiento.
- Vegetación de la zona; Pirul (*Schinus molle*), Cedro blanco (*Cupressus lindleyi*) y Eucaplito (*Eucalyptus Camaldealensis*). Especies arbóreas ligadas a cuerpos de agua como son Fresno (*Fraxinusudhei*), Sauce (*Salix sp.*), Sauce llorón (*Salix babilónica*), y otras como el Tejocote (*Crataegus pubescens*) y Capulín (*Prunus serotina var capuli*).
- En los alrededores se encuentran: terrenos de cultivo de riego, principalmente de alfalfa y maíz.

No se encuentran datos de esta laguna en el “Diccionario de datos de cuerpos de agua” del INEGI.

## 2.1. Antecedentes históricos de la Laguna la Piedad.

En la Declaración de la Secretaría de Agricultura y Fomento, publicada en el DOF el 18 de mayo de 1922, se indica que las aguas nacionales y cauces de los canales, barrancos, ríos, lagos y lagunas comprendidos dentro del Valle de México y ligados con las obras del Desagüe, son de propiedad nacional. De esta publicación se desprende la declaratoria No. 6062 de mayo de 1922, que resulta de un estudio realizado por dicha Secretaría, al respecto de las condiciones hidrográficas que caracterizan a las corrientes de agua que se localizan dentro de la zona que comprende el Valle de México y que reúne los requisitos para ser considerados de propiedad nacional, que son afluentes directos o indirectos de los Lagos de Texcoco, Xochimilco, Chalco y Zumpango, así como los ligados al sistema de desagüe del Valle de México. La Laguna la Piedad, es parte de las aportaciones a la Laguna de Zumpango, por lo que se puede considerar a la Laguna la Piedad como un cuerpo de agua de propiedad nacional. En el Anexo 9.2. se pueden consultar los documentos.

Según comunicación al jefe del departamento del expediente "San José Huilango", en ese entonces del municipio de Tepetzotlán (Cuautitlán Izcalli aún no se creaba como municipio en el año del acuerdo) de fecha 4 de mayo de 1959, de la dirección de tierras y aguas del Departamento Agrario, No. 156241, se comunica el resolutivo del fallo presidencial de dotación de tierras al poblado de "San José Huilango", del que se puede destacar que se da acceso a dicho ejido *"a las aguas para riego de 60.4 Ha, otorgando una dotación de 181,226 m<sup>3</sup> de volumen neto o equivalente al 24.275% del volumen útil de las aguas que se almacenan en la presa de La Piedad (Laguna la Piedad) y que provienen de las aguas de lluvias que escurren a dicha presa, provenientes de los lomeríos y partes altas, de las que conduce el canal de Cuamatla en la temporada de lluvias y que viene de los manantiales denominados Los Otates, Las Agujas, Las Aceitunas, La Luna, La Guadalupeana, San Antonio, Santa Rita, San Isidro, Casa Vieja, Los Rieguitos y los Aposentos y las que escurren en su trayecto y además con las que descarga periódicamente el canal de la Fabrica "La Aurora" que provienen del río Cuautitlán cruzando dicho canal por la presa de Guadalupe y el canal de Cuamatla, hasta llegar a la Fabrica "La Aurora", llevándose a cabo la descarga del canal de la aurora a la presa de la Piedad, mediante dos compuertas que se encuentran ubicadas sobre dicho canal. El aprovechamiento de las aguas de esa presa se llevará a cabo de los meses de octubre a mayo"*.

En el Oficio No R-16.11.3/2419 de fecha 15 de septiembre de 1978 (en el Anexo 9.2. se pueden consultar los documentos) emitido por el Director General de Aprovechamientos Hidráulicos de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), hay constancia de que se llevó a cabo una inspección por parte de esa secretaría, comprobando que las aguas de la Laguna la Piedad son permanentes (discrepando del documento instructivo para determinar el régimen de propiedad de las aguas, localizadas en el Valle de México No. 19246 527), son aprovechadas para riego de terrenos de los ejidos de La Piedad, San José Huilango y del Rancho de San Antonio, que en conjunto suman una superficie de 333.17 Ha, estimando el volumen de la presa en 500,000 m<sup>3</sup> (aproximadamente, llegando a ser de hasta 762,000 m<sup>3</sup> según datos actuales del municipio), de los cuales el 50% se conserva almacenado para el criadero de carpas, que en ese tiempo eran aprovechadas por los habitantes de los citados ejidos.

De conformidad con lo indicado por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), mediante Oficio No. 204.3.1.-681, firmado por el Director General de Aprovechamientos Hidráulicos de la Subsecretaría de Planeación y que obra en el expediente 201.51 (12) 6235 de fecha 20 de enero de 1982, resguardado en el Archivo Histórico del Agua de la CONAGUA, se indica que los terrenos de esta laguna son federales, según Declaratoria de fecha 8 de abril de 1922, publicada en el DOF del 19 de mayo del mismo año; en el año 1981, esa SARH en base a la Ley de Aguas Nacionales (LAN) vigente en ese año, otorgó al Ejido San José Huilango el permiso precario No. 1124 -81 de fecha 10 de marzo de 1981 por una superficie de 6-45-36 Ha de terrenos federales de esa laguna.

Asimismo, el citado escrito solicita se envíe el documento denominado Estudio Técnico, mediante el que se concluya que la llamada Laguna la Piedad es un vaso natural y no una Presa: como se denomina una obra artificial hecha por el hombre.

La Laguna la Piedad está formada por un régimen intermitente y sus escurrimientos bien definidos, es un afluente del río Cuautitlán, sus aguas se originan en las estribaciones del cerro Barranca de Monte Alto, a 28 km al suroeste de San José Huilango, en el lugar denominado Monte Alto, del municipio de Nicolás Romero en el Estado de México (CONAGUA, 1983).

El plano original de la Laguna la Piedad se encuentra resguardado en el Archivo Histórico del Agua de la Comisión Nacional del Agua y está referenciado como plano VM-AH-0826, y es resultado de la demarcación de la zona federal del vaso de la Laguna la Piedad, que está ubicada en el municipio de Cuautitlán Izcalli, Estado de México; este plano fue elaborado en coordinación de las Residencias de Aprovechamientos Hidráulicos y Estudios de la SARH en el año 1980<sup>8</sup>. En el oficio No. R15.JPH.RAH/0949 de fecha 18 de julio de 1980 (Anexo 9.2. se pueden consultar los documentos), se remite el original para revisión y aprobación de la Dirección General de Aprovechamientos Hidráulicos de la SARH, el dibujo incluye los datos de la demarcación de la zona federal, así como el croquis de localización y el plano de la propia demarcación de dicha zona federal.

El Plano VM-AH-0826 correspondiente a la demarcación de la zona federal de la Laguna la Piedad, finalmente fue aprobado por esa SARH mediante oficio No. 204.2.1.4.-17860 de fecha 24 de agosto de 1981, por la Dirección General de Aprovechamientos Hidráulicos.

Actualmente el área se encuentra en crecimiento urbano, este crecimiento fue considerable entre los años 1973 y 1980, a través del proceso de inmigración de población de lo que ahora se conoce como la Ciudad de México. Después del sismo de 1985, se dio un fenómeno extraordinario de migración, pues muchas personas que habitaban en el entonces Distrito Federal buscaron reestablecerse en el Estado de México, que alcanzó un crecimiento del 7% anual<sup>9</sup>.

Derivado de conversaciones con personas que habitan alrededor de la Laguna la Piedad, se tiene conocimiento de que los desarrollos habitacionales que llegaron a establecerse en la zona construyeron dos plantas de Tratamiento, mismas que al momento de realizar este trabajo, se

---

<sup>8</sup> Oficio No. R15.JPH.RAH/0919 de fecha 18 de julio de 1980, contenido en los anexos de esta Tesis.

<sup>9</sup> Plan de Desarrollo Municipal de Cuautitlán Izcalli, 2019-2021.

encuentran fuera de operación situación que ha impactado negativamente y de forma directa en la calidad del agua de la Laguna la Piedad.

Adicional a esto se pudo comprobar que aun cuando el río Barranca de Zamorillas conduce las aportaciones del citado Monte Alto, estas son abundantemente enriquecidas por la descarga de agua del bordo Lago de Guadalupe, tal como se indica en la hidrología del municipio, así mismo se encuentra que la laguna es principalmente usada para riego.

## 2.2. Datos de saneamiento.

Como parte de las acciones del gobierno federal, a través de los organismos operadores y municipios, para mejorar la calidad del agua superficial para esta región hidrológico – administrativa No. XIII que comprende partes del Estado de México, Hidalgo, Tlaxcala y la Ciudad de México; se han construido 237 PTAR, las cuales tienen una capacidad de tratamiento instalada de 38,127.48 LPS y que tratan efectivamente 23,733.05 LPS. De estas PTAR, 145 se encuentran en el Estado de México, lo que representa una capacidad de tratamiento instalada de 8,195.70 LPS, de los cuales la CONAGUA reportó trataban 3,243.48 LPS al 8 de mayo de 2019. En el siguiente inventario, correspondiente al año 2020, la CONAGUA reportó únicamente las PTAR en Operación.

Tabla 1. PTAR en el Municipio de Cuautitlán Izcalli, en el Estado de México.<sup>10</sup>

Localidad	Nombre PTAR	Capacidad Instalada (LPS)	Caudal Tratado (LPS)	Estado	Proceso PTAR	Cuerpo Receptor
Cuautitlán Izcalli	CIA Mexicana de aguas	400	160	Activa	Lodos Activados	Venta de agua
Cuautitlán Izcalli	Cofradía I	30	0	Fuera de Operación	Lodos Activados	Río Cuautitlán
Cuautitlán Izcalli	Cofradía II	18	0	Fuera de Operación	Lodos Activados	Río Cuautitlán
Cuautitlán Izcalli	Cofradía III	16	0	Fuera de Operación	Lodos Activados	Río Cuautitlán
Cuautitlán Izcalli	Ford Motor Company	30	0	Dada de Baja	Biológico	Reúso industrial
Cuautitlán Izcalli	Fraccionamiento Bosques de Alba II	30	8.01	Activa	Lodos Activados	Colector Municipal
Cuautitlán Izcalli	La Piedad I	4.4	0	Fuera de Operación	Lodos Activados	Colector Municipal
Cuautitlán Izcalli	La Piedad II	18	0	Fuera de Operación	Lodos Activados	Colector Municipal
Cuautitlán Izcalli	Lechería	400	160	Activa	Lodos Activados	Reúso industrial
Cuautitlán Izcalli	Planta de Tratamiento de la Presa Lago de Guadalupe	500	0	Fuera de Operación	Lodos Activados	Río Cuautitlán
Tepojaco	San Francisco Tepojaco I	50	0	Fuera de Operación	Lodos Activados	Colector Municipal
Tepojaco	San Francisco Tepojaco II	50	0	Fuera de Operación	Lodos Activados	Colector Municipal
		<b>1,546.40</b>	<b>328.01</b>			

<sup>10</sup> CONAGUA (2019 y 2020). Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, *Sistema de Información de Servicios Básicos del Agua (SISBA)*. Ciudad de México: SEMARNAT-CONAGUA.

En la Tabla 1. se indica la localidad, la capacidad instalada, el estado y el cuerpo receptor de las PTAR en el municipio de Cuautitlán Izcalli, en el Estado de México, según los datos vertidos en el Inventario nacional de PTAR de la CONAGUA del año 2019.

De estos datos se puede determinar que, en el municipio de Cuautitlán Izcalli, en el Estado de México, se cuenta con:

- 12 PTAR con una capacidad de tratamiento instalada de 1,546.40 LPS, de los cuales únicamente se tratan efectivamente 328.01 LPS, que representa únicamente tres PTAR en operación y que operan sistemas de Lodos Activados;
- De las 12 PTAR una se encuentra dada de baja, por lo que no se prevé que la misma pueda ponerse en operación nuevamente;
- Entre los LPS que están instalados, sin aprovecharse, se encuentra la PTAR La Piedad II con 18 LPS de capacidad instalada;
- La PTAR Lago de Guadalupe, también se conoce como PTAR La Piedad, se encuentra fuera de operación y nunca ha operado, desde su construcción en el año 2017, esta PTAR es a la que conduciría el agua que entra a la Laguna la Piedad, en caso de que se conjuntaran las acciones del convenio de colaboración OPDM/CJ/CC/016/2019, y se llevara a cabo la construcción de un colector denominado "*Proyecto del Colector Marginal*".
- No se encuentra la PTAR Lomas de Cuautitlán o PTAR Tepojaco en el Inventario Nacional de PTAR y solo se tiene información del Acta de Entrega Recepción de esta PTAR por parte de la empresa constructora al municipio de fecha 13 de agosto del año 2003, aunque en campo, se pudo verificar que se encuentra la infraestructura abandonada, desmantelada y vandalizada.

En la Tabla 2 se indica la información disponible por parte del Municipio de Cuautitlán Izcalli, quien informó que son vertidos sin tratamiento 44,677,597 m<sup>3</sup> (no indica unidades de tiempo) de aguas residuales provenientes de 146, 221 casas habitación, sin considerar las descargas provenientes de los fraccionamientos industriales, no las contabilizan pues consideran que cuentan con sus PTR propias en la mayoría de los casos. Estas aguas residuales que indica el municipio son fuente de contaminación por descargas a cuerpos de agua del Municipio, entre las que se incluye la Laguna la Piedad que se encuentra recibiendo aguas residuales de tipo municipal sin tratamiento, sin que hasta el momento, se cuente con los datos necesarios para precisar el volumen de agua que sin tratar, está recibiendo este cuerpo de agua, además el municipio refiere tener 13 PTAR en el mismo, de las que indican la operación de solo una de ellas, aunque no indica cuales son. Asimismo, se considera que la Presa la Piedad (Laguna la Piedad), requiere desazolve.

Tabla 2. Diagnóstico ambiental del recurso agua, del Municipio de Cuautitlán Izcalli<sup>11</sup>.

Municipio	Contaminación por descargas	Contaminación por agroquímicos	Rastro de descarga		Unidades Piscícolas de Producción	PTAR municipales	Presas que requieren desazolve
			Drenaje Municipal	Cuerpos Receptores			
Cuautitlán Izcalli	44.67 -Mm <sup>3</sup> de aguas residuales	La mayor parte de la producción agrícola es de autoconsumo por lo cual el uso de agroquímicos es muy limitado	Se cuenta con una cobertura del 95%	Emisor Poniente y Río Cuautitlán	No se tiene Registro	13 PTAR 1 en funcionamiento	3 presas: Presa del Ángulo, Presa de Guadalupe, Presa la Piedad

Fuente: Plan de Desarrollo Municipal de Cuautitlán Izcalli 2022-2024. INEGI Banco de información 2014. INEGI.

El municipio indica en su plan de Desarrollo Municipal 2022-2024, la citada PTAR en operación es la denominada: Bosques del Alba II, que trata 712,735.20 m<sup>3</sup>/año, por lo que se determina que su infraestructura es insuficiente.

En la zona de influencia de la Laguna la Piedad, se cuenta con tres PTAR, la PTAR Lomas de Cuautitlán también conocida como PTAR Tepojaco, la PTAR La Piedad II y la PTAR Presa Lago de Guadalupe también llamada PTAR la Piedad.

- La PTAR la Piedad II fue construida en el año 2010 y se encuentra fuera de operación, por lo que los 18 LPS que podría tratar, son descargados a través de un canal a cielo abierto que conduce el agua por aproximadamente 341 m hasta el río Barranca de Zamorillas y finalmente es conducida a la Laguna la Piedad. Según datos de la Comisión Nacional del Agua al 08 de mayo de 2019 contenidos en la información que forma parte del Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales de Origen Municipal 2018. Su descarga se geolocalizó con el uso de Google Maps (2021) en las coordenadas: 19°39'43.56"N y 99°14'34.01"O y fue verificada en la visita realizada el 4 de octubre del año 2019.
- La PTAR Lomas de Cuautitlán, se encuentra abandonada, desmantelada y vandalizada. No cuenta con cerco perimetral. La información disponible sobre esta, se localiza en el acta de entrega recepción al municipio de fecha 13 de agosto de 2013, cuando la empresa constructora entregó esa infraestructura al municipio y en la que se señala que en su etapa final podría tratar hasta 55 LPS en un proceso de tratamiento por medio de bacterias denominado Biológico de tipo Aerobio conocido como SBR, por lo que este volumen de agua, pasa sin tratamiento hasta un canal a cielo abierto que conduce el agua por aproximadamente 292 m hasta converger con el agua sin tratar proveniente de la PTAR La Piedad II. No se encuentra información de esta PTAR en el inventario nacional de Plantas de tratamiento de la CONAGUA del año 2019, ni 2020, además, una vez analizada la documentación referente se infiere que el gobierno municipal puede referirse a ella también como PTAR Tepojaco, esto por su mención para la reconstrucción citada en el convenio de colaboración administrativa para realizar el programa integral de agua y saneamiento del lago "La Piedad" No. OPDM/CJ/CC/016/2019. Su descarga se geolocalizó

<sup>11</sup> Plan de Desarrollo Municipal de Cuautitlán Izcalli 2022-2024.

con el uso de Google Maps (2021) en las coordenadas: Latitud 19°39'31.65"N y Longitud 99°14'48.24"O y se verificó en campo en la visita del 4 de octubre del año 2019.

- La PTAR Lago de Guadalupe o PTAR la Piedad según datos del inventario nacional de PTAR 2019 de la CONAGUA, fue construida para tratar un total de 500 LPS mediante un sistema de LA y está diseñada para verter el agua tratada al río Cuautitlán y desde su construcción no ha entrado en operación, posiblemente por falta de infraestructura para conducir a ella el agua residual de tipo municipal, sin que se hayan encontrado otros datos que justifiquen el por qué esta PTAR no ha sido puesta en operación desde la finalización de su construcción en el año 2017. Se infiere que el municipio puede referirse a ella como PTAR La Piedad, siendo esta PTAR la Piedad diferente de la que se indica en el inventario nacional de plantas de tratamiento de la CONAGUA 2019 que se refiere a la PTAR La Piedad II, esto por la mención de su puesta en operación en el convenio de colaboración administrativa para realizar el programa integral de agua y saneamiento del lago “La Piedad” No. OPDM/CJ/CC/016/2019. Es importante mencionar que, según la Comisión Estatal del Agua del Estado de México (CAEM), en respuesta al requerimiento de información No. 00058/CAEM/IP/2018, mediante el que se solicita *“la información sobre cuantos litros por segundo puede tratar esta planta tratadora si trabajará al cien por ciento de su capacidad”*, informó que la PTAR Lago de Guadalupe cuenta con tres trenes de tratamiento de 250 LPS, por lo tanto, cuenta con una capacidad instalada de 750 LPS, que podrá tratar una vez que entre en operación.

Derivado del análisis de las PTAR mencionadas con anterioridad y la propia experiencia, se observa que las PTAR en nuestro país dejan de operar por diversas causas, como pueden ser:

- La falta de un sistema de tratamiento adecuado, lo que ocasiona que la Planta sea imposible de estabilizar y no se pueda obtener la calidad deseada, incumpliendo así con las NOM para su adecuada disposición.
- La elección de un sistema de tratamiento con costos elevados de operación y/o mantenimiento, lo que al largo o corto plazo ocasiona que la planta deje de operar, haciéndola vulnerable de sufrir deterioro, vandalismo y eventual abandono de la infraestructura.
- El diseño y/o construcción realizados por desarrolladores de asentamientos urbanos, que construyen las PTAR y las entregan al municipio, quien en ocasiones no está preparado para hacerse cargo de la operación y mantenimiento del sistema.
- Los sistemas son obsoletos y no son adecuados para tratar los caudales actuales o las calidades de estos, pues fueron diseñados para condiciones que ya no están vigentes y requieren actualización, ampliación y/o rediseño de proceso.
- El municipio no contó con el recurso suficiente para terminar la obra o el equipamiento de esta, por lo que la obra quedó inconclusa.
- La falta de obras de recolección de agua residual para ser conducida a la PTAR.
- La falta de inversión en personal capacitado para la operación de los sistemas de las PTAR.

Según indica la CONAGUA en su “*Diagnóstico del Programa Presupuestal S218 Tratamiento de Aguas Residuales*” del año 2016, hay causas directas e indirectas por las cuales no se trata la totalidad de aguas residuales colectadas:

- Las causas directas por las cuales no se trata la totalidad de las aguas residuales colectadas, es el número limitado de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales y la falta de operación (parcial o total) de algunas de ellas. Lo que se puede medir en la subutilización de los caudales instalados que, para el caso del municipio de Cuautitlán Izcalli, es de 1,218.29 LPS, que representa una subutilización del 78% de su infraestructura instalada que se encuentra sin operar y que no ha sido dada de baja del Inventario Nacional de PTAR (CONAGUA, 2016).
- Las causas indirectas se refieren a la dificultad para remover los contaminantes, cuando se trata de tratamientos primarios o secundarios; la falta de colectores y emisores que les harán llegar los volúmenes recolectados a través de las redes de alcantarillado, así como la insuficiencia de recursos económicos para pagar el costo por el consumo de electricidad y de los reactivos químicos para operarlas de forma eficiente (CONAGUA, 2016).

Otra causa que influye en la eficiencia de remoción de contaminantes se relaciona con las tarifas de los servicios públicos de agua potable, alcantarillado y saneamiento, las cuales resultan insuficientes para cubrir los costos del tratamiento en la mayoría de los casos (CONAGUA, 2016).

### 2.3. Parámetros de contaminación del agua residual existentes.

En nuestro país se llevó a cabo el monitoreo de la calidad del agua superficial en 5028 sitios (CONAGUA EAM, 2018), de los resultados de los sitios de monitoreo en cuerpos de agua superficiales, se puede observar que la región hidrológico-administrativa que más porcentaje de “muy contaminada” tiene en diversos parámetros es la XIII, región en la que se encuentra la Laguna la Piedad, ubicada en el municipio de Cuautitlán Izcalli, en el estado de México.

En esta región hidrológico-administrativa XIII correspondiente a Aguas del Valle de México, se encuentran parámetros que pueden considerarse como fuertemente contaminados por DBO<sub>5</sub> 14.1%, DQO en 25.4%, CF en 70.4% de los sitios monitoreados y en SST con buena calidad en un 54.9% (CONAGUA EAM, 2018). El total de los porcentajes obtenidos se ilustra en la Tabla 3.

Tabla 3. Distribución porcentual de sitios de monitoreo en cuerpos de agua superficiales en la región hidrológico-administrativa XIII Aguas del Valle de México (CONAGUA EAM, 2018)<sup>12</sup>.

Parámetro	Excelente	Buena Calidad	Aceptable	Contaminada	Muy Contaminada
DBO <sub>5</sub>	1.4	4.2	52.1	28.2	14.1
DQO	0	5.6	18.3	50.7	25.4
SST	25.4	54.9	18.3	1.4	0
CF	8.5	0	8.5	12.6	70.4

CF: Coliformes Fecales.

EAM: Estadísticas del agua en México

DBO<sub>5</sub>: Demanda Bioquímica de Oxígeno.

DQO: Demanda Química de Oxígeno.

SST: Sólidos Suspendidos Totales.

<sup>12</sup> *Íbidem*.

Para el sitio de estudio se encontraron datos de calidad del agua proporcionados por la CAEM, realizado el 6 de agosto del año 2019, resultado de un muestreo puntual. A continuación, se vierten los resultados en la Tabla 4., en los que se marcan en rojo los parámetros que están fuera de los LMP en la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Tabla 4. Resultados de calidad del agua de la CAEM 6 de agosto de 2019.

Parámetros	Unidades	Efluente PTAR la Piedad II	Descarga a la Laguna la Piedad	Cortina de la Laguna la Piedad	LMP NOM-001-SEMARNAT- 1996. Embalses Naturales. Uso Agrícola
<b>Físico-Químicos</b>					
Temperatura	°C	23.7	-	-	40
pH	U. de pH	9.26	-	-	5 - 10.0
SST	mg/L	<b>292</b>	48	79	125
SS	mL/L	0.9	1.7	1.6	2
Materia Flotante	(Ausencia, Presencia)	-	-	-	Ausencia
Cianuros	mg/L	<0.002	<0.002	<0.002	3
Fósforo Total	mg/L	10.8	5.4	3.9	30
Grasas y Aceites	mg/L	<b>144</b>	12	<b>46</b>	25
Nitrógeno Total	mg/L	<b>62.16</b>	35.84	45.36	60
DQO	mg/L	899	239	114	N.A.
DBO	mg/L	<b>344</b>	122	71	150
<b>Metales Pesados</b>					
Arsénico	mg/L	0.297	2.982	2.435	400
Cadmio	mg/L		1.039	0.784	400
Cobre	mg/L	0.046	0.0126	0.121	6
Cromo Total	mg/L	0.004	0.006	0.004	1.5
Mercurio	mg/L	<0.0003	0.0003	0.257	1
Níquel	mg/L	0.023	0.064	0.056	400
Plomo	mg/L	5.782	5.252	4.375	100
Zinc	mg/L	0.229	0.07	0.042	2000
Bacteriológicos	UFC/100mL	<b>74000x10<sup>6</sup></b>	<b>78000x10<sup>6</sup></b>	<b>61x10<sup>6</sup></b>	1000

LMP: Límites Máximos Permisibles.

pH: Potencial de Hidrógeno.

SST: Sólidos Suspendidos Totales.

SS: Sólidos Suspendidos.

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno.

DQO: Demanda Química de Oxígeno.

N.A. No Aplica

Enmarcados en rojo los parámetros que se encuentran fuera de los LMP.

En los resultados de los análisis de calidad del agua presentados por la CAEM, se puede observar que:

- Existe una alta carga contaminante de agua referente a coliformes fecales.
- Los datos de SST, Grasas y Aceites, Nitrógeno Total y DBO<sub>5</sub>, fueron reportados fuera de LMP únicamente en los efluentes de la PTAR la Piedad II.
- Los datos de Grasas y Aceites fueron reportados fuera de LMP únicamente en la Cortina de la Laguna la Piedad.
- Es un muestreo simple.
- No se encontró contaminación por metales pesados en el agua residual, lo que es consistente con el tipo de agua residual que se considera de tipo municipal.
- Los resultados de la descarga a la Laguna la Piedad y los resultados de la salida, que son los que se encuentran en la cortina, permiten interpretar que la laguna por sí misma, está depurando el agua residual y en apariencia el agua está dentro de norma, según lo indicado en la NOM-001-SEMARNAT-1996, excepto para bacteriológicos. El agua presenta un color y olor desagradables, por lo que se puede decir que la laguna está sufriendo un proceso de eutrofización.
- Se trata de un único muestreo realizado en periodo de lluvia del que se tenga conocimiento, lo que puede ser indicador de contaminación de los afluentes y del cuerpo de agua mismo, esto justifica la necesidad de llevar a cabo un saneamiento adecuado de las aguas que entran a la Laguna la Piedad, esperando así mejorar su calidad a lo largo del tiempo, logrando así su aprovechamiento.

En la Figura 7, se indican los sitios de muestreo que corresponden a la localización de los puntos en que se generaron estos datos, marcando únicamente los parámetros que resultaron como fuera de los LMP en la NOM-001-SEMARNAT-1996 conforme a la que se compararon los resultados. El orden de los sitios ilustra el sentido del flujo del agua en el sistema, el agua que sale de la PTAR La Piedad II, se incorpora al río Barranca de Zamorillas, que conduce el agua residual a la Laguna la Piedad en el sitio denominado descarga a la Laguna la Piedad, una vez que el agua tiene su tiempo de residencia en la Laguna, esta sale por el sitio denominado Cortina de la Laguna la Piedad.

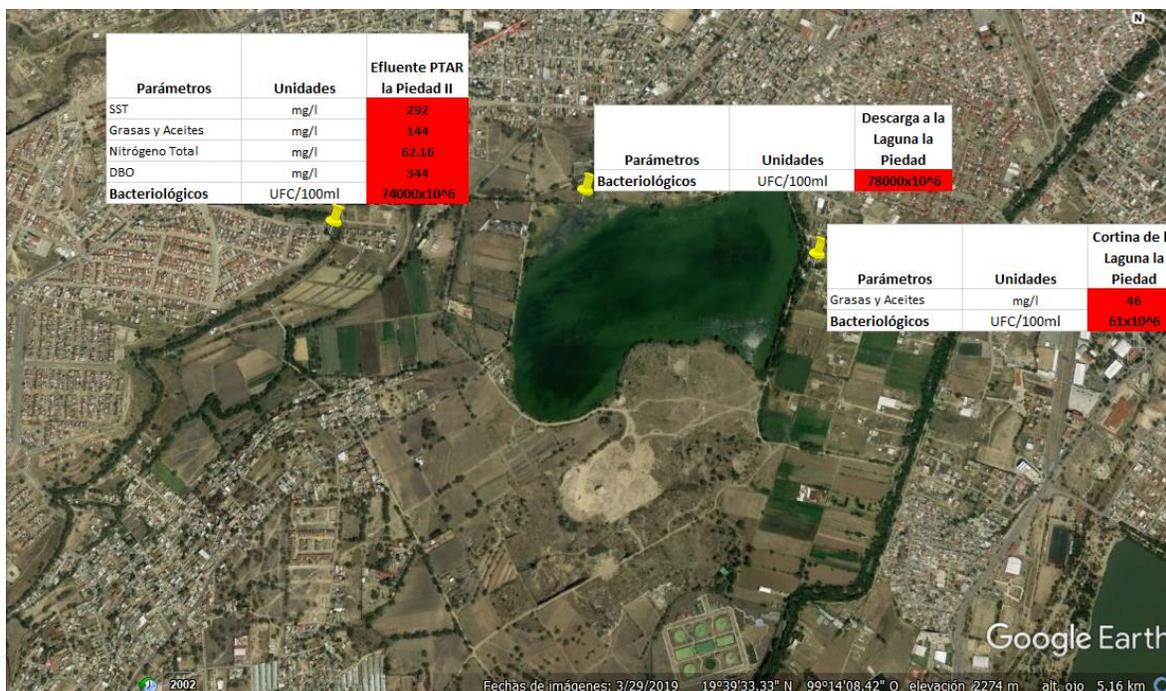


Figura 7. Ubicación aproximada de Sitios de Muestras de la CAEM y parámetros que exceden los LMP por cada uno de ellos. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020.

### 2.3. Esfuerzos para sanear la Laguna la Piedad.

En un esfuerzo por mostrar su interés por la conservación de los cuerpos de Agua del municipio de Cuautitlán Izcalli, en el Estado de México, así como el Organismo Operador (OO), el Consejo de Cuenca y la CAEM, entre otros, han planteado diversos instrumentos en los que llevan a cabo sus propuestas para revertir el daño que se ha hecho a estos cuerpos de agua, tal es el caso de la Laguna la Piedad.

Existen diversas propuestas para la mitigación del daño y rescate de la Laguna la Piedad. Los aspectos más relevantes se presentan a continuación.

#### 2.3.1. Propuesta del municipio de Cuautitlán Izcalli para el manejo de la Laguna la Piedad.

El municipio de Cuautitlán Izcalli, en su plan de desarrollo municipal 2019-2021, planteó las siguientes propuestas para el manejo de las lagunas que se encuentran en su demarcación, en las que se encuentra la Laguna la Piedad:

- La creación de un parque ecoturístico en la Laguna la Piedad, con la finalidad de proteger y vigilar los recursos forestales del municipio.
- Realizar limpiezas en las periferias de los cuerpos de agua municipal.

- Impulsar una cultura ambiental entre los habitantes de Cuautitlán Izcalli para promover un comportamiento responsable que mitigue el impacto ambiental.
- Construir humedales artificiales para la limpia ecológica de las lagunas.
- Construir un colector que capte las aguas residuales de los asentamientos urbanos circundantes y conducir las aguas; se sugirió la rehabilitación de la PTAR La Piedad II.
- Desazolve de la Laguna la Piedad.
- Programa Integral del Agua y Saneamiento del Lago “La Piedad”.

### 2.3.2. Propuesta del OO y el Consejo de Cuenca.

El Gobierno Federal, a través del Consejo de Cuenca del Valle de México, el OO OPERAGUA, representantes de la autoridad de Canadá, Federal y Municipal y el Comité de Cuenca de la Sierra de Guadalupe, firmaron el Convenio de Colaboración administrativa y asesoría profesional para realizar el programa integral de agua y saneamiento del lago (“La Piedad”), de fecha 20 de noviembre del año 2019, con vigencia hasta el 31 de diciembre del año 2020. En este convenio se indican los proyectos puntuales que conforman su portafolios de proyectos, con una descripción de lo que será cada una de estas acciones, como son:

- **Proyecto del Colector Marginal.**

Tiene como objetivo recolectar todas las aguas residuales domésticas sin tratar que descargan a la Laguna la Piedad, a través de canales naturales sin revestimiento. El volumen aproximado que alimentará al colector es de 250 a 275 LPS y tiene un alcance de 2550 m, será construido en el perímetro norte del cuerpo de agua por OPERAGUA y la CAEM, con un diámetro de 61 cm. Se estimó una inversión aproximada de 4 millones de pesos (MDP).

- **PTAR La Piedad o PTAR Lago de Guadalupe.**

Localizada en las coordenadas Latitud 19°39'8.31"N y Longitud 99°13'56.62"O. Esta PTAR se encuentra registrada en el inventario Nacional como PTAR Lago de Guadalupe con una capacidad de 500 LPS.

El objetivo es estabilizar el proceso de tratamiento de la PTAR, alimentando a la misma con el volumen de agua que recolectará el Colector Marginal el cual, de acuerdo con el convenio, es un volumen aproximado de 250 a 275 LPS. Este proyecto puntual es llevado a cabo por la CAEM y OPERAGUA. El efluente de agua a tratar cumplirá con la NOM-003-SEMARNAT-1997. El proceso se conforma por las siguientes operaciones unitarias: pretratamiento, cárcamo de bombeo, sedimentador primario, reactor biológico, sedimentador secundario, estructura de desinfección, espesador de lodos, digestores de lodos, filtro banda y efluente. Se estima una inversión de 3 MDP, para su puesta en operación.

- **PTAR Tepojaco o PTAR Lomas de Cuautitlán.**  
Localizada en las coordenadas 19°39'31.78"N y 99°14'49.09" O. Esta PTAR se conoce como PTAR Lomas de Cuautitlán.

El objeto es poner en operación el proceso de tratamiento de la PTAR, este proyecto puntual es llevado a cabo por la CAEM y OPERAGUA. El efluente de agua a tratar cumplirá la NOM-001-SEMARNAT-1996, será alimentada con un volumen de 55 LPS. Se estimó una inversión de 5.5 MDP.
- **PPA.**  
Este proyecto puntual se conforma de dos fases, la primera fase es una potabilizadora que será alimentada por un influente de 30 LPS y deberá tener una calidad según la modificación a la NOM-127-SSA1-2000. La segunda fase es una potabilizadora que tendrá un influente de 220 LPS e igual que la que se refiere en la primera fase, su efluente debe tener una calidad de conformidad con la indicada en la modificación a la NOM-127-SSA1-2000. Se estimó una inversión de 48 MDP.
- **HAM .**  
Tiene como objetivo proponer el tipo de HAM y la ubicación más viable para ser desarrollado dentro de la Laguna la Piedad, que permita la generación de sistemas ambientales acuáticos y el control de la contaminación en el cuerpo de agua. Los humedales artificiales han demostrado ser capaces de remover compuestos que contienen carbono, nitrógeno y fósforo en forma soluble, lo cual resulta relevante para reducir el fenómeno de eutrofización. El volumen sugerido a tratar es de 100 m<sup>3</sup> (el convenio no indica un gasto, solo un volumen) y se requiere un área de 1 a 1.5 Ha, siendo alimentado por un influente de agua negra de tipo doméstica, y logrará un efluente con la calidad indicada en la NOM-003-SEMARNAT-1997. Se estimó una inversión de 38 MDP.
- **Batimetría y geoquímica de los sedimentos acuosos.**  
Diagnosticar y analizar las condiciones geoquímicas de los sedimentos acuosos de la Laguna la Piedad, la cual se encuentra en el Municipio de Cuautitlán Izcalli, Estado de México, determinando la toxicidad de los sedimentos con base en la NOM-021-RECNAT-2000. Así como las características geoquímicas de los sedimentos acuosos, se podrá realizar un Plan de Manejo y Disposición Final de los sedimentos, considerando los mismos para ser parte de un composteo. Se estimó una inversión de 5.8 MDP.
- **Dragado de la Laguna la Piedad.**  
El dragado tiene como objetivo sacar las toneladas necesarias de sedimentos depositados en el fondo de la Laguna la Piedad, basado en la batimetría que se realizará y las corrientes dinámicas internas del cuerpo de agua. Se estimó una inversión de 5 MDP.
- **Estimación de monitoreo de contaminación atmosférica.**  
El objetivo de la estación es monitorear la contaminación atmosférica (NO<sub>x</sub>, CO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>) en la región de la Laguna la Piedad, con la finalidad de prevenir altas concentraciones de gases

de efecto invernadero, así como de PPM menos de 25 micras. Se estimó una inversión de 15 MDP.

- **Obra hidráulica de retroalimentación a la Laguna la Piedad.**  
Tiene por objetivo alimentar a la Laguna la Piedad con el excedente de agua tratada proveniente de la PTAR la Piedad, logrando con ello un espejo de agua constante.
- **Revestimiento y actualización topográfica de los canales de agua negras.**  
El objetivo es actualizar las condiciones topográficas y de nivelación de los canales principales de aguas negras que alimentaran al colector marginal y ver la posibilidad de revestirlos con concreto hidráulico.
- **Proyecto de sistema de alcantarillado compuesto.**  
El alcance de este proyecto es brindar el servicio de alcantarillado a las colonias de la zona alta en los alrededores de la Laguna la Piedad.
- **Talleres de sensibilización con un enfoque antropológico-social.**  
Los talleres tienen como objetivo generar sensibilidad en todos los grupos sociales y las comunidades aledañas a la Laguna la Piedad. Se estimó una inversión de 1.2 MDP.

La vigencia del Convenio arriba señalado terminó el pasado 31 de diciembre del año 2020. A la fecha se desconoce si se llevó a cabo o no la reprogramación de las acciones, los financiamientos, alguna *Adenda* o ampliación de este.

### 3. MARCO DE REFERENCIA.

El agua es un recurso indispensable, aproximadamente el 70% de nuestro cuerpo está constituido por agua y su presencia para la subsistencia de los seres vivos es obligada. El agua es tan importante para la vida y desarrollo del ser humano, que se utiliza en prácticamente todas las actividades cotidianas. El agua regula el clima de la Tierra, genera energía y limpia la atmósfera. Sin embargo, la disponibilidad de agua dulce en el planeta es de tan sólo el 2.5% y es de ese porcentaje del que tomamos para el consumo humano. Después de su uso y conforme ha pasado el tiempo, la contaminación de los cuerpos de agua se ha incrementado junto con el crecimiento urbano. Paralelamente, surgen los problemas de salud y degradación ambiental por la falta de cobertura de drenajes, uso de canales a cielo abierto y nulo tratamiento de agua (CEA, 2013).

Garantizar el suministro de agua en volumen y calidad suficientes, implica garantizar el derecho humano al agua, lo cual está establecido en el sexto párrafo artículo 4º de nuestra Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, lo cual está directamente relacionado con proporcionar el adecuado tratamiento al agua, antes de su consumo (potable) y después de que esta haya sido usada (agua residual).

#### 3.1. Aspectos Jurídicos Ambientales.

En México existe legislación que regula el recurso agua como bien nacional. El agua se cataloga como un derecho de rango constitucional por lo que deben considerarse diversos presupuestos inherentes a todo derecho en relación con su contenido y alcance, las obligaciones derivadas y la realización de estas en condiciones de igualdad, no discriminación y su interdependencia con otros derechos (Ávila *et al*, 2018).

La reforma constitucional en materia de agua de fecha 8 de febrero del año 2012 exige la elaboración de una nueva Ley General de Aguas que tome en consideración el derecho al agua como un derecho fundamental (Ávila *et al*, 2018).

A continuación, se indica la legislación y la normatividad aplicable al mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad, en el municipio de Cuautitlán Izcalli, en el Estado de México.

##### 3.1.1. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

El 8 de febrero del año 2012, se llevó a cabo una reforma constitucional que consagró el derecho a un medio ambiente sano y el derecho al agua como derecho fundamental y disponiendo en el artículo 4º los párrafos 5º y 6º que:

*“Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para*

*quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley.*

*Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la Federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines”.*

En materia de la propiedad de la tierra y el agua, el artículo 27 y que en un fragmento de su párrafo tercero dice:

*.... “En consecuencia, se dictarán las medidas necesarias para ordenar los asentamientos humanos y establecer adecuadas provisiones, usos, reservas y destinos de tierras, aguas y bosques, a efecto de ejecutar obras públicas y de planear y regular la fundación, conservación, mejoramiento y crecimiento de los centros de población; para preservar y restaurar el equilibrio ecológico”; ...*

En este marco constitucional, se contempla la capacidad del Honorable Congreso de la Unión para regular esta materia, en el art. 73, fracción XVII, así como las funciones en torno al suministro de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales a cargo de los municipios en el art. 115, fracción III (Ávila *et al*, 2018).

En materia de funciones y servicios públicos, el artículo 115, fracción III. Que a la letra dice:

4. *“Los municipios tendrán a su cargo las funciones y servicios públicos siguientes:*
  - a. *Agua Potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales”;...*

### 3.1.2. Ley de Aguas Nacionales.

Indica en su art. 1º que es reglamentaria del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en materia de aguas nacionales; es de observancia general en todo el territorio nacional, sus disposiciones son de orden público e interés social y tiene por objeto regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable.

Art. 7. Declara de utilidad pública en el apartado I. La gestión integrada de los recursos hídricos, superficiales y del subsuelo, a partir de las cuencas hidrológicas en el territorio nacional, como prioridad y asunto de seguridad nacional;

Este artículo justifica completamente cualquier trabajo que se refiera a la gestión integrada de los recursos hídricos.

### 3.1.3. Ley Federal de Derechos.

En sus disposiciones generales en el artículo 1º, establece que los derechos se pagarán por el uso o aprovechamiento de los bienes del dominio público de la Nación.

Determina el tipo de cuerpo receptor de las descargas de aguas residuales que, para el caso de la Laguna la Piedad, siendo este una aportación del río Cuautitlán en el estado de México, se tipifica como tipo B.

Por lo que la calidad del agua tratada deberá cumplir mínimo con los parámetros para esa tipificación de cuerpo receptor.

Art. 277-B que indica el monto del derecho a pagar por el municipio, organismos paraestatales o paramunicipales, determinado para el volumen descargado de forma trimestral por cada metro cúbico y que en su apartado I, en un cuerpo receptor tipo B, determina un valor de: \$2.13 pesos por m<sup>3</sup>. Si el volumen de agua tratada que entra a la laguna la Piedad es de 59 LPS (Figura 31), entonces su volumen trimestral de descarga en m<sup>3</sup> es de: 458,783 m<sup>3</sup>, por lo que se estima que, en el año 2022, tendría que pagar: \$977,209.92 pesos trimestrales por las descargas que se hacen a ese cuerpo de agua.

Art. 279 que indica que los ingresos que se obtengan por concepto del derecho por el uso o aprovechamiento de bienes del dominio público de la Nación como cuerpos receptores de las descargas de aguas residuales, se destinarán a la Comisión Nacional del Agua para la realización de los programas que al efecto establezca dicha Comisión, para la realización de acciones de infraestructura, operación y mejoramiento de eficiencia de saneamiento.

### 3.1.4. Ley Federal de Responsabilidad Ambiental.

Regula la responsabilidad ambiental que deriva de los daños ocasionados al ambiente, así como la reparación y compensación de dichos daños cuando sea exigible a través de los procesos judiciales federales, los mecanismos alternativos de solución de controversias, los procedimientos administrativos y aquellos que correspondan a la comisión de delitos contra el ambiente y la gestión ambiental (Comisión Económica para Latinoamérica y el Caribe (CEPAL), Observatorio del Principio 10 en América Latina y el Caribe, 2020).

En esta Ley, se incorpora en el art. 2º apartado VIII la definición del Estado Base que se refiere a la condición en la que se habrían hallado los hábitats, los ecosistemas, los elementos y recursos naturales, las relaciones de interacción y los servicios ambientales, en el momento previo inmediato al daño y de no haber sido este producido.

Prevé en el art. 7º, sentar las bases para otorgar certidumbre e inducir a los agentes económicos a asumir los costos de los daños ocasionados al ambiente, emitiendo normas oficiales mexicanas, que tengan por objeto establecer caso por caso y buscando el restablecimiento al Estado Base.

En el art. 13º, se prevé la reparación de los daños ocasionados al ambiente, restituyendo los hábitats, los ecosistemas, los elementos y recursos naturales, sus condiciones químicas, físicas o biológicas y la interacción que se dan entre estos, así como los servicios ambientales que proporcionan, mediante la restauración, restablecimiento, tratamiento, recuperación o remediación, llevando a cabo la restauración en el lugar en el que fue producido el daño.

### 3.1.5. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.

En el art. 1º se define como una Ley Reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto propiciar el desarrollo sustentable y establecer las bases para:

- I. *“Garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente sano para su desarrollo, salud y bienestar;*
- III. *La preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente;*
- V. *El aprovechamiento sustentable, la preservación y en su caso, la restauración del suelo, el agua y los demás recursos naturales, de manera que sean compatibles la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad con la preservación de los ecosistemas”;*

En el art. 92 indica que: *“Con el propósito de asegurar la disponibilidad del agua y abatir los niveles de desperdicio, las autoridades competentes promoverán el ahorro y uso eficiente del agua, el tratamiento de aguas residuales y su reúso”.*

Y en el art. 122 que a la letra dice: *“Las aguas residuales provenientes de usos públicos urbanos y las de usos industriales o agropecuarios que se descarguen en los sistemas de drenaje y alcantarillado de las poblaciones o en las cuencas, ríos, cauces, vasos y demás depósitos o corrientes de agua, así como las que por cualquier medio se infiltren en el subsuelo y en general, las que se derramen en los suelos, deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir;*

- *Contaminación de los cuerpos receptores;*
- *Interferencias en los procesos de depuración de las aguas”.*

### 3.1.6. Programa Nacional Hídrico 2020-2024.

Es un programa especial derivado del Plan Nacional de Desarrollo (PND), resultado de un proceso de consulta que inició con los foros para la construcción del PND, se complementó con 44 foros específicos para el PNH y establece en sus objetivos:

1. Garantizar progresivamente los derechos humanos al agua y al saneamiento, especialmente en la población más vulnerable.
4. Preservar la integridad del ciclo del agua a fin de garantizar los servicios hidrológicos que brindan cuencas y acuíferos.

El PNH busca atender cinco problemas públicos entre los que se destacan:

- Acceso a los servicios de agua potable y saneamiento insuficiente e inequitativo.
- Uso ineficiente del agua que afecta a la población y a los sectores productivos.
- Deterioro cuantitativo y cualitativo del agua en cuencas y acuíferos.

### 3.1.7. NOM-001-SEMARNAT-1996.

Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Esta norma tiene por objeto proteger la calidad de las aguas y bienes nacionales, para posibilitar sus usos y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. No aplica para descargas de aguas provenientes de drenajes separados de aguas pluviales.

En la Tabla 5, se indican los parámetros indicados en la NOM-001-SEMARNAT-1996, que serán tomados en cuenta para la propuesta conceptual de la PTAR que vierta el agua a la Laguna de la Piedad con un tratamiento adecuado para mitigar el daño que se ha ocasionado por el constante vertido de aguas residuales sin tratamiento, así como para obtener agua tratada de calidad apta para el uso agrícola. Para este trabajo se consideran los Límites Permisibles indicados para “Embalses, lagos y lagunas”, Valor Instantáneo (V.I.). En la Tabla 5. Se vierten los Límites permisibles para embalses, lagos y lagunas V.I.

Tabla 5. Límites Permisibles.

Parámetro	Unidades	LMP Embalses Naturales y Artificiales para Uso en riego Agrícola (B)	
		PD	PM
Potencial de hidrógeno	Unidades de pH	5 a 10	
Coliformes fecales	NMP/100 mL	1,000 y 2,000	
Temperatura	°C	40	40
Grasas y aceites	mg/L	15	25
Materia flotante	mg/L	Ausente	Ausente
Sólidos sedimentables	mg/L	1	2
Sólidos suspendidos totales	mg/L	75	125
Demanda bioquímica de oxígeno <sub>5</sub>	mg/L	75	150
Nitrógeno total	mg/L	40	60
Fósforo total	mg/L	20	30

NMP/100 mL: número más probable en 100 mililitros.

mg/L: miligramos por litro

PD Promedio Diario

PM Promedio Mensual

La NOM-001-SEMARNAT-1996, se actualizará con la NOM-001-SEMARNAT-2021 “Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación”, misma que según se indica en su **TRANSITORIO PRIMERO** entrará en vigor a los 365 días naturales, posteriores a su publicación en el Diario Oficial de la Federación (11 de marzo del año 2022), con excepción de lo previsto en el Segundo, Tercero, Cuarto y Quinto Transitorios que cito a continuación:

**“SEGUNDO.** Los parámetros y límites permisibles previstos en las tablas 1 y 2, así como el Apéndice Normativo entrarán en vigor el 3 de abril de 2023.

**TERCERO.** Los parámetros y límites permisibles de color verdadero y toxicidad aguda previstos en la Tabla 1, entrarán en vigor al cuarto año de la fecha de publicación de la presente Norma Oficial Mexicana en el Diario Oficial de la Federación.

**CUARTO.** Las autoridades competentes en el ámbito de sus atribuciones, podrán elaborar Lineamientos que deberán ser publicados en el Diario Oficial de la Federación, por los cuales los sujetos regulados puedan presentar programas para el cumplimiento oportuno de la presente Norma.

**QUINTO.** Hasta en tanto entren en vigor los parámetros y límites permisibles a que se refiere el artículo Segundo Transitorio, las descargas de aguas residuales seguirán sujetándose a los numerales 4.1, 4.2, 4.3, Tablas 2 y 3 establecidos en 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, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 06 de enero de 1997 y su aclaración publicada en el mismo medio de difusión oficial del 30 de abril de 1997.” sic.

Es importante indicar que este trabajo se realizó con los parámetros vigentes hasta el año 2022, por lo que no se llevaron a cabo los análisis correspondientes en las muestras obtenidas para poder

determinar si se cumple con todos los parámetros que serán considerados en la NOM-001-SEMARNAT-2021, Límites Permisibles de Embalses, lagos y lagunas, Volumen Instantáneo (V.I.).

### 3.1.8. NOM-003-SEMARNAT-1997.

Que establece los LMP de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público, que tiene como objeto proteger el medio ambiente y la salud de la población, y es de observancia obligatoria para las entidades públicas responsables de su tratamiento y reúso.

Para reúso en servicios al público con contacto directo y que considera el llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en ancha, remo, canotaje y esquí, fuentes de ornato, lavados de vehículos, riego de parques y jardines.

En la Tabla 6 se presentan los parámetros indicados en la NOM-003-SEMARNAT-1997, que serán tomados en cuenta para la propuesta conceptual de la PTAR que vierta el agua a la Laguna de la Piedad con un tratamiento adecuado para mitigar el daño que se ha ocasionado por el constante vertido de aguas residuales de tipo doméstico sin tratamiento, así como para obtener un agua que sea adecuada para el aprovechamiento recreacional del recurso hídrico.

Tabla 6. LMP de contaminantes en aguas residuales tratadas<sup>13</sup>.

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES					
TIPO DE REÚSO	PROMEDIO MENSUAL				
	Coliformes fecales (NMP/100mL)	Huevo de helminto (h/L)	Grasas y aceites (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	SST (mg/L)
SERVICIOS AL PÚBLICO CON CONTACTO DIRECTO	240	≥1 (en realidad debería ser ≤1)	15	20	20

La materia flotante deberá estar ausente en el agua residual tratada.

### 3.1.9. Instructivo para Asignación de Recursos del PROSANEAR.

El instructivo para la presentación y seguimiento del Programa de Acciones de Infraestructura, Operación y Mejoramiento de Eficiencia de Saneamiento, conforme al artículo 279 de la Ley Federal de Derechos, para la asignación de recursos del Programa de Saneamiento de Aguas Residuales (PROSANEAR), tiene como objetivo precisamente, el establecer el procedimiento de presentación y seguimiento del Programa de Acciones de infraestructura, operación y mejoramiento de eficiencias de saneamiento, que permita que se le asignen recursos federales provenientes del pago de derechos por el uso o aprovechamiento de bienes del dominio público de la Nación como cuerpos receptores de las descargas de aguas residuales. Lo anterior, conforme a lo establecido en los términos dispuesto en el artículo 279 de la Ley Federal de Derechos, concatenado con lo indicado

<sup>13</sup> Fuente: NOM-003-SEMARNAT-1997 Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público, Tabla 1.

en el artículo 277-B, fracción I de ese de ese mismo ordenamiento, todo ello a través del Programa de Saneamiento de Aguas Residuales.

### 3.2. Aspectos técnicos ambientales.

El incremento en la generación de aguas residuales ha obligado a la ingeniería a buscar, encontrar y aplicar alternativas de tratamiento de aguas residuales eficientes, autónomas y económicamente viables (Arias-Brick, 2013).

Es imperativo desarrollar e implantar nuevas soluciones, más sustentables, al eterno déficit en infraestructura para el manejo del agua residual, así como para ampliar y mejorar los sistemas de abastecimiento de agua. Los nuevos sistemas administrativos, sociales y tecnológicos deberán considerar las limitaciones y posibilidades propias de la región, con una alta dosis de innovación y adaptación, deslindándose en muchos casos de las soluciones convencionales y que cumplan con las legislaciones locales y presenten una menor huella de carbono (Noyola *et al.*, 2013).

La planificación ambiental hídrica en cuencas hidrográficas debe involucrar diversos elementos para poder llevar a cabo la descontaminación del cuerpo de agua receptor. Así que para la selección de la tecnología de las PTAR en países en vías de desarrollo se deben considerar, entre otros aspectos, la composición típica del agua residual cruda, la eficiencia de remoción de contaminantes por tipo de tecnología, los indicadores de desempeño por tecnología, aspectos ambientales sobre localización y la estrategia espacial para la localización (Rodríguez *et al.*, 2015).

#### 3.2.1. Parámetros de contaminación del agua residual de tipo municipal.

Los parámetros utilizados en la caracterización del agua residual, asociados con el contaminante que miden y los efectos o impactos derivados de una eventual descarga a un cuerpo receptor o a la salud humana. los principales grupos de contaminantes, el tipo de contaminante que se considera y su efecto, se presentan en la Tabla 7.

Existen valores de referencia para el agua residual municipal que permiten tipificar la calidad del agua. Estos son reportados en literatura internacional (Rodríguez-Miranda *et al.*, 2015) Tabla 8, así como valores medidos para las ciudades como las de México y Guadalajara (CONAGUA, 2007 Tabla 9).

La contaminación del agua se considera fuerte, media o débil según diversos parámetros que incluyen otros, además de los establecidos en las NOM, como es la DQO, COT, N-NH<sub>3</sub>, N-NO<sub>2</sub>, N-NO<sub>3</sub>, N<sub>Org</sub>, P<sub>Org</sub>, P<sub>Inorg</sub>, Cloruros, Sólidos Totales, Alcalinidad total, COVs y conductividad.

Tabla 7. Principales grupos de contaminantes del agua y sus efectos<sup>14</sup>.

ANÁLISIS PRINCIPAL	CONTAMINANTE CONSIDERADO	EFEECTO
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	Materia orgánica biodegradable	Abatimiento del oxígeno disuelto en cuerpo receptor. Crecimiento de microorganismos.
Demanda química de oxígeno (DQO) o Carbón orgánico total (COT)	Materia orgánica total	Mismos que DBO. Acumulación en cuerpo receptor. Riesgos de toxicidad.
Sólidos suspendidos totales (SST) o Volátiles (SSV) y fijos (SSF)	Materia en suspensión sedimentable y no sedimentable (coloidal)	Sedimentación y azolvamientos en cuerpos receptores. Digestión y liberación de materia orgánica e inorgánica.
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK), nitratos y nitritos (NO <sub>3</sub> y NO <sub>2</sub> ), fósforo total (Pt), ortofosfatos (PO <sup>3-4</sup> )	Nitrógeno y fósforo	Nutrientes que provocan eutrofización en cuerpos de agua. Contaminación de acuíferos.
Grasas y aceites	Grasas y aceites	Acumulación en drenajes y cuerpos de agua. Reducen la transferencia de oxígeno a los cuerpos de agua. Flotación de lodos. Contaminación visual.
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	Sales inorgánicas	Restringen el uso de agua tratada.
Coliformes fecales y huevos de helmintos	Patógenos y parásitos	Transmisión de enfermedades gastrointestinales.

Tabla 8. Representa la composición típica de aguas residuales crudas (Rodríguez-Miranda et al., 2015).

PARÁMETRO	UNIDAD	CONCENTRACIÓN*			CONCENTRACIÓN**			CONCENTRACIÓN***		
		FUERTE	MEDIA	DÉBIL	CRUDA	SEDIMENTADA	TRATADA BIOLÓGICAMENTE	FUERTE	MEDIA	LIGERA
Sólidos Totales (ST)	mg/L	1200	720	350	800	680	530	1000	500	200
SDT	mg/L	850	500	250				500	200	100
SST	mg/L	350	20	100	240	120	30	500	200	100
Sólidos sedimentables (SS)	mg/L	20	10	5				250	180	40
DBO <sub>5</sub>	mg/L	400	220	110	200	130	30	300	200	100
COT	mg/L	290	160	80						
DQO	mg/L	1000	500	250				800	450	160
N total	mg/L	85	40	20	35	25	20	86	50	25
N NH <sub>3</sub>	mg/L	50	25	12				50	30	15
N NO <sub>2</sub>	mg/L	0	0	0				0.1	0.05	0.001
N NO <sub>3</sub>	mg/L	0	0	0				0.4	0.2	0.1
N <sub>ORG</sub>	mg/L	35	15	8				35	20	10
P <sub>TOTAL</sub>	mg/L	20	10	6	10	8	7	17	7	2
P <sub>ORG</sub>	mg/L	5	3	1						
P <sub>INORG</sub>	mg/L	10	5	3	7	7	7			
Sulfatos	mg/L	50	30	20						
Cloruros	mg/L	100	50	30				175	100	15
Grasas y aceites	mg/L	150	100	50				40	20	0.5
Alcalinidad total	mg/L	200	100	50						
COVs	mg/L	400	400-100	100						
Coliformes totales	NMP/100mL	10 <sup>7</sup> -10 <sup>9</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup>	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>						

Fuente:\* Tomado de Metcalf y Eddy (2001);\*\* Tomado de Hammer (1971), \*\*\* Tomado de Hernández (1996)

<sup>14</sup> Noyola et al. (2013), *Selección de Tecnologías para el tratamiento de Aguas Residuales Municipales, guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*, Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Tabla 9. Valores de contaminantes en agua residual municipal.

Parámetro	Literatura internacional	Ciudad de México	Guadalajara
SDT (mg/L)	250 – 850	1,447	931
SST (mg/L)	100 – 350	252	364
SS (ml/L)	5 – 20	2	3.7
DBO (mg/L)	110 – 400	219	282
COT (mg/L)	80 – 290	Sin dato	Sin dato
DQO (mg/L)	250 – 1,000	576	698
NT (mg/L)	20 – 85	35	52.8
PT (mg/L)	4 – 15	10	19
Grasas y aceites (mg/L)	50 -150	58	156
pH (unidades de pH)	Sin dato	7.88	7.3
Conductividad eléctrica (µS/cm)	Sin dato	2,052	1,288
Coliformes totales (NMP/100mL)	10 <sup>6</sup> – 10 <sup>9</sup>	8.60 x 10 <sup>7</sup>	2.24 x 10 <sup>7</sup> (fecales)
COV (g/m <sup>2</sup> )	< 100 - > 400	Sin dato	Sin dato
Huevos de helminto (g/mL)	Sin dato	161	58

Fuente: CONAGUA, 2007<sup>a</sup>

### 3.2.3. Sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Muchos de los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en los sistemas naturales acuáticos han sido incorporados a los sistemas de tratamiento de agua residual creados por la ingeniería; en estos se controlan las variables del sistema y se maximiza la rapidez de ocurrencia de los procesos minimizando el tiempo requerido para la purificación. En los sistemas de tratamiento creados por la ingeniería, las reacciones se completan en fracciones del tiempo y del espacio que se requerirán en los ecosistemas acuáticos para conseguir la misma eficiencia (César Valdez *et al.*, 2003).

Los sistemas de alcantarillado y saneamiento de aguas residuales han probado ser eficientes en transportar y remover patógenos, contaminantes orgánicos y nutrientes, sin embargo, requieren un adecuado entendimiento en la operación y mantenimiento, así como de los procesos involucrados (Henze *et al.*, 2004), logrando el mejoramiento y aprovechamiento del agua.

El propósito principal del tratamiento del agua residual es remover el material contaminante, orgánico e inorgánico, el cual puede estar en forma de partículas en suspensión y/o disueltas, con objeto de alcanzar una calidad de agua requerida por la normatividad de descarga o por el tipo de reutilización a que se destinará (Noyola *et al.*, 2013).

El objetivo de depurar un agua residual se logra mediante la integración de operaciones (físicas) y procesos (químicos y biológicos) unitarios, que serán seleccionados en función de las características del agua residual a tratar y de la calidad deseada del agua tratada. Dependiendo de ello, es posible generar emisiones gaseosas a la atmósfera e invariablemente, la producción de material de desecho que puede ser un residuo sólido, como la materia retenida en las rejillas o tamices, o semisólidos en

forma de lodos (Noyola *et al.*, 2013), en la Figura 8. se presenta un esquema conceptual de un sistema de tratamiento de aguas residuales.

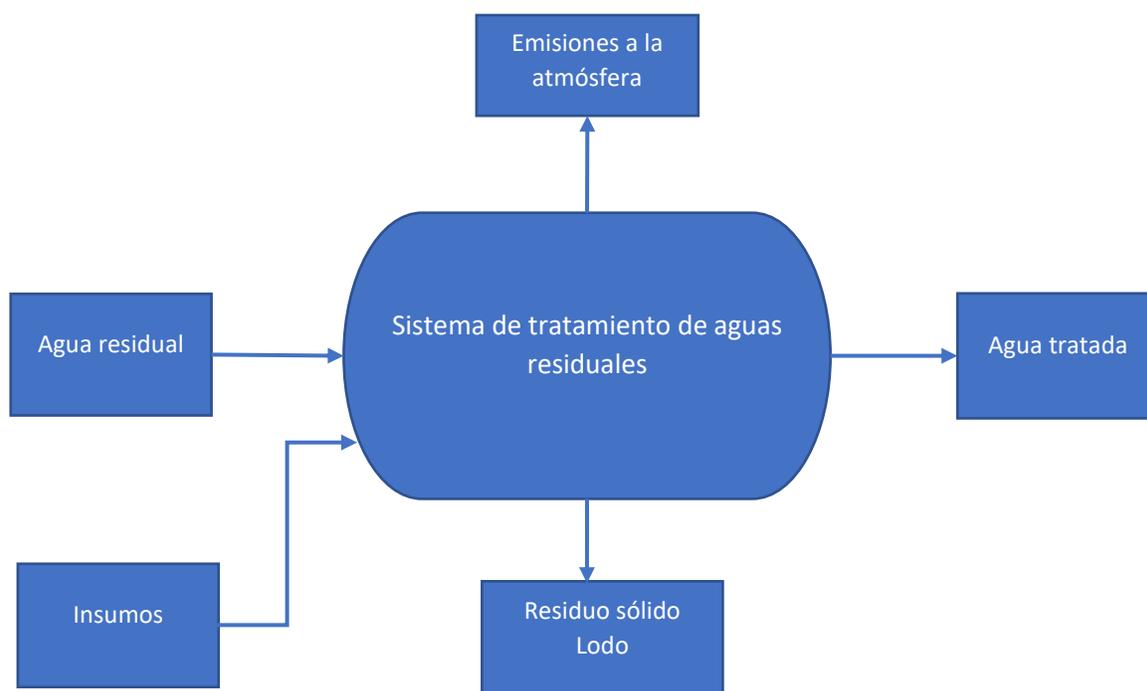


Figura 8. Esquema conceptual de un sistema de tratamiento de aguas residuales (Noyola *et al.*, 2013).

Por otro lado, los requerimientos de insumos tales como energía eléctrica y reactivos químicos, se darán en función de las tecnologías seleccionadas para integrar el sistema de tratamiento y, por ende, el costo de operación dependerá también de ello (Noyola *et al.*, 2013).

La complejidad del sistema de tratamiento es función de los objetivos propuestos. Teniendo en cuenta el gran número de operaciones y procesos unitarios disponibles para tratamiento de aguas, hasta finales del siglo pasado era común hablar de pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario de aguas residuales, como una manera de clasificar, siguiendo el orden de aparición, a las unidades de las plantas de tratamiento como se puede ver en la Tabla 10 y aunque por convencionalismos y lenguaje operativo aún se sigue utilizando, en los textos y publicaciones de los últimos años se ha optado por diferencias, las unidades que incluyen una reacción, ya sea de tipo biológica o química, de aquellas que solo implican un efecto físico, según se indica la CONAGUA en el Libro 25, Introducción al tratamiento de aguas residuales municipales del Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (CONAGUA, MAPAS 25, 2015).

Tabla 10. Clasificación de los procesos de tratamiento de aguas residuales<sup>15</sup>.

Clasificación	Remueve	Proceso
Tratamiento primario	Arenas Partículas gruesas Sólidos suspendidos	Rejillas Desarenadores Sedimentación
Tratamiento secundario	Materia orgánica disuelta	Tratamiento biológico (ejemplo, lodos activados)
Tratamiento terciario	Nitrógeno Fósforo Materia coloidal	Desnitrificación-nitrificación Remoción de fósforo Coagulación-floculación
Tratamiento Avanzado	Patógenos Microcontaminantes	Desinfección Oxidación forzada

Fuente: CONAGUA, MAPAS 25, 2015.

En nuestro país, según datos de la CONAGUA, entre los principales procesos de tratamiento de aguas residuales de tipo municipal por caudal tratado, se encuentran las PTAR LA con una aplicación de 52.9% de PTAR que usan estos sistemas de tratamiento, en segundo lugar se encuentran los sistemas duales con un 17.19%, después de esto se siguen empleando lagunas de estabilización en un 10.40% de los procesos, 5.22% en lagunas aireadas, 3.88% utilizan filtros biológicos, 3.31% emplean sistemas de tipo primario avanzado, 0.89% emplea sistemas de Reactor Anaerobio de flujo ascendente 0.03% emplea sistemas primarios y un 6.18% se aplica en otros tratamientos (aquí incluyen los sistemas de humedales artificiales). Esto se ilustra en la Figura 9, que representa una capacidad instalada de 181.15 m<sup>3</sup>/s, de la cual efectivamente se trata un caudal de 135.58 m<sup>3</sup>/s de acuerdo con el libro Estadísticas del Agua en México (CONAGUA, 2018).

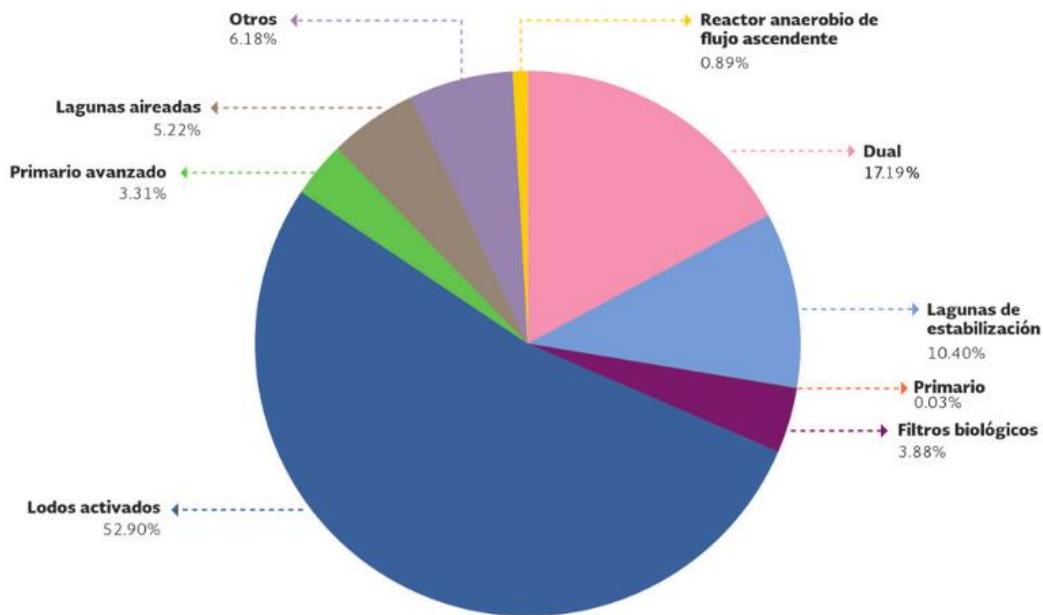


Figura 9. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales, por caudal tratado, 2017.<sup>16</sup>

<sup>15</sup> CONAGUA. (2015), Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales, Tomo 25. Ciudad de México: SEMARNAT-CONAGUA.

<sup>16</sup> CONAGUA. (2018). Estadísticas del Agua en México. 26 de noviembre de 2019, de SEMARNAT-CONAGUA Sitio web: [http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM\\_2018.pdf](http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf). Grafica 4.13.

CONAGUA estimaba que al 2017 se reutilizaban directamente (antes de su descarga) 39.8 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales ya tratadas (CONAGUA, 2018), mientras que indirectamente se reutilizaban 78.8 m<sup>3</sup>/s. Se sabe que es beneficioso reutilizar el agua tratada, pues así se puede sustituir algún volumen de agua de primer uso. Por lo que es necesario considerar que el agua de la Laguna la Piedad es utilizada como agua de riego principalmente, pero el tratamiento propuesto del agua residual que entra a la Laguna, así como la propia calidad de la laguna debe ser acorde al menos con lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-1996, para embalses cuyo uso es para riego agrícola.

Por lo anterior, en esta tesis se elaborará una matriz de selección de tecnologías, Para ello, se está considerando para su análisis el método convencional de tratamiento de aguas residuales municipales más empleado en México, que es el tratamiento por Lodos Activados; así como el más utilizado en América Latina, denominado lagunas de estabilización. De manera complementaria, se incluirá la tecnología de biodiscos o discos biológicos rotatorios y una más, basada en una tecnología no convencional, que se está impulsando en nuestro país debido a ventajas relacionadas con relativos bajos costos de operación y mantenimiento. Esta última tecnología es conocida como sistema de humedales artificiales, cuyo principio de operación se basa en sistemas de filtración acompañados de microorganismos y plantas vasculares.

A continuación, se describirá de forma general la funcionalidad de los sistemas de tratamiento de aguas residuales más relevantes para este trabajo, los cuales son: Sistema de lodos activados, laguna de estabilización y humedales artificiales.

### **3.2.3.1. Funcionamiento de una planta de tratamiento de tecnología de Lodos Activados (LA).**

El método de tratamiento mediante LA se desarrolló por primera vez en Inglaterra en el año 1914 y actualmente es el método estándar para el tratamiento de aguas residuales en países desarrollados (Méndez *et al.*, 2004). El sistema de LA en sus variantes completamente mezclada y aireación extendida es uno de los sistemas más utilizados en el mundo para el tratamiento de aguas residuales municipales. Ocupa el primer lugar en caudal tratado y el segundo lugar como número de sistemas usados en América Latina, después de las lagunas de estabilización (Noyola *et al.*, 2013).

Un sistema de LA es un sistema de mezcla completa, su nombre proviene de la producción de una masa activada de microorganismos capaz de estabilizar un residuo en medio aerobio. Este método está provisto de un sistema de recirculación y eliminación de lodos. El ambiente aerobio en el reactor se consigue mediante el uso de aireadores mecánicos que también sirven para mantener el líquido en estado de mezcla completa. Al cabo de un periodo determinado de tiempo, la mezcla de las nuevas células con las antiguas se conduce hasta un tanque de sedimentación para ser separados por sedimentación del agua residual tratada. Una parte de las células sedimentadas se recirculan para mantener en el reactor la concentración de células deseadas, mientras que la otra parte se purga del sistema (Méndez *et al.*, 2004).

En la Figura 10. se describe el tren de tratamiento de un sistema de aguas residuales de lodos activados.

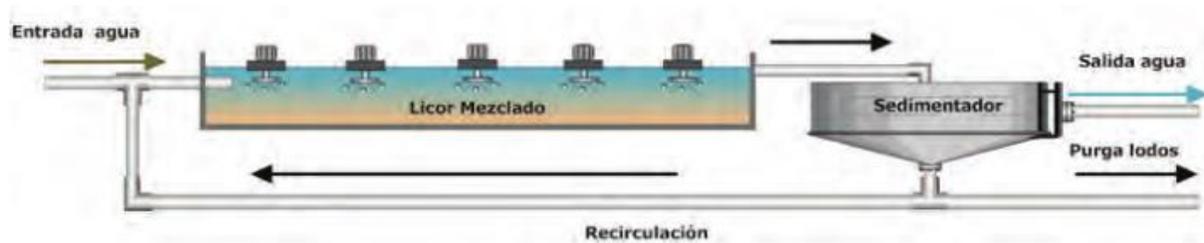


Figura 10. Descripción del tratamiento de aguas residuales de lodos activados (Noyola et al., 2013).

### 3.2.3.2. Funcionamiento de una planta de tratamiento de tecnología de Laguna de Estabilización.

Según CONAGUA, una laguna de estabilización es básicamente un método de tratamiento extensivo del agua residual, que consiste en el almacenamiento del agua por medio de la actividad bacteriana con acciones simbióticas de las algas y otros organismos. La aplicación de las lagunas como método de tratamiento se dio en forma casual, las primeras no se diseñaron, simplemente se usaron y funcionaron, según se indica la CONAGUA, MAPAS 27, 2015.

Al agua residual es descargada en una laguna de estabilización, el tratamiento se realiza en forma espontánea, un proceso de auto purificación o estabilización natural, en el que tienen lugar fenómenos de tipo físico, químico y biológico. En esta simple descripción se establecen los aspectos fundamentales del proceso de tratamiento del agua que se lleva a cabo en las lagunas de estabilización (CONAGUA, MAPAS 27, 2015):

- Es un proceso natural de autodepuración.
- La estabilización de materia orgánica se realiza mediante la acción simbiótica de bacterias, algas, y otros organismos superiores.
- Se presentan procesos físicos de remoción de materia suspendida.
- Se efectúan cambios químicos en la calidad del agua que, entre otros aspectos, mantienen las condiciones adecuadas para que los organismos puedan realizar la estabilización, transformación y remoción de contaminantes orgánicos biodegradables y en algunos casos, nutrientes.
- Se establecen cadenas tróficas y redes de competencia que permiten la eliminación de gran cantidad de microorganismos patógenos que se encuentran presentes en las aguas residuales. Por lo tanto, las lagunas de estabilización se consideran y se pueden proyectar, como un método de tratamiento de la materia orgánica y de remoción de los patógenos presentes en el agua residual.

En estos procesos la simbiosis entre bacterias y algas se aprovecha para degradar la materia orgánica; las primeras consumen materia orgánica y oxígeno y producen  $\text{CO}_2$ , mientras que las segundas consumen  $\text{CO}_2$  y producen oxígeno por medio de la fotosíntesis, lo que mantiene concentraciones de oxígeno disuelto adecuadas en la zona superior de la laguna. Un sistema de tratamiento basado en lagunas generalmente se compone de dos o tres estanques, conectados en serie como se puede ver en la Figura 11 (Noyola *et al.*, 2013).



Figura 11. Laguna de Estabilización, PTAR de Santa María Rayón, México (Noyola *et al.*, 2013).

La primera de las lagunas en serie es de tipo facultativo (zona aerobia en la parte superior y zona anaerobia en la parte inferior) con una profundidad entre 1 y 2 m; la segunda es de tipo oxidación o pulimento (no hay zonas anaerobias) con una profundidad menor a 1 m, donde se logra abatir la concentración de microorganismos patógenos. En algunos sistemas se instala una laguna anaerobia como primer elemento de la serie de tres lagunas. En este tipo de lagunas se retienen los sólidos suspendidos y materia flotante, liberando a la segunda laguna (facultativa) de esta carga. Las lagunas anaerobias tienen una mayor profundidad de entre 3 y 5 metros, por lo general (Noyola *et al.*, 2013). Existen también sistemas lagunares que incluyen aireadores, lo que se consideran arreglos a estos sistemas, aunque aumentan los costos de operación y mantenimiento. En la Figura 12 se puede ver un arreglo de lagunas aireadas en serie.

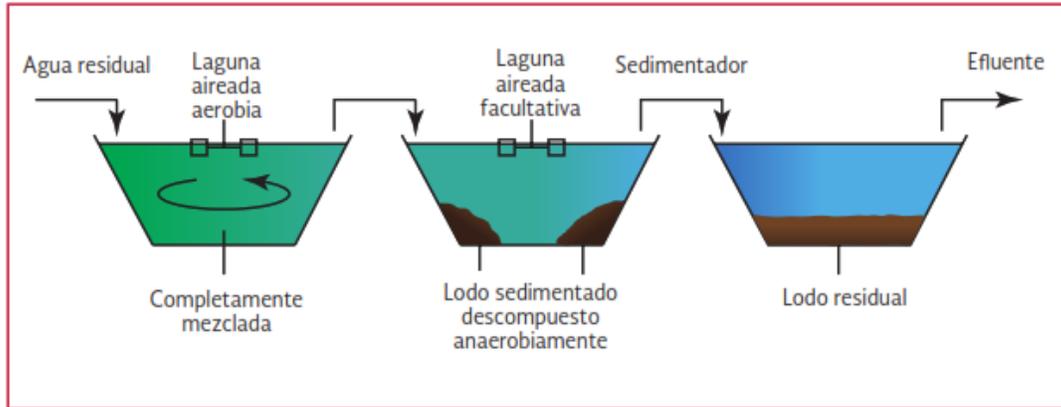


Figura 12. Tipos de lagunas aireadas (Facultativas) (CONAGUA, MAPAS 27, 2015).

Las lagunas aerobias de baja tasa se aplican como un postratamiento a efluentes secundarios, por lo que requieren tiempo de retención mayor para garantizar el tratamiento adecuado y se pueden hacer diseños para localidades mayores a 50,000 habitantes (CONAGUA, MAPAS 27, 2015).

#### 3.2.3.4. Funcionamiento de una planta de tratamiento de tecnología de Humedales Artificiales.

La observación de la mejora en la calidad del agua residual que, por descuido o desconocimiento, se vertieron en humedales naturales, dio lugar al desarrollo de humedales artificiales, donde se emulan los procesos de purificación existentes en los primeros, el inicio fue en Alemania a comienzos de los años sesenta donde se crearon pequeños prototipos. Los humedales artificiales fueron utilizados para la depuración de descargas con baja concentración de materiales orgánicos, o bien para el tratamiento de aguas grises, sin embargo, a partir de los años ochenta comenzaron a utilizarse en sistemas de mayor capacidad. En los años noventa fueron diseñados para tratamiento de aguas residuales municipales, aguas de retorno agrícola y las relacionadas con algunas industrias generadoras de aguas residuales de tipo orgánico. Para el año 2000 se habían formado un sin número de agrupaciones científicas involucradas con el desarrollo y mejoramiento de la tecnología, con importantes avances en el conocimiento de los mecanismos químicos, biológicos e hidráulicos (Vymazal *et al.*, 2008; Rodríguez, 2003) y según se indica la CONAGUA, MAPAS 30, 2015).

Los HA son concebidos como sistemas de depuración de aguas residuales en los que se incorporan elementos de ingeniería, diseñados, construidos y operados con propósitos específicos para la calidad de agua esperada, en función de un requerimiento de reúso o normativo. Mediante la remoción de materia orgánica permite mejorar considerablemente la calidad del agua (Kadlec y Knight, 1996), lo que se logra mediante el control hipotético de los mecanismos de purificación existentes en los sistemas naturales (CONAGUA, MAPAS 30, 2015). Se basan el proceso de degradación de contaminantes de las aguas residuales mediante la interacción de sus constituyentes principales, los cuales son el lecho o medio de soporte, las plantas acuáticas y los organismos depuradores. Estos constituyentes permiten que se lleven a cabo diversos mecanismos de degradación de los contaminantes, entre los que destacan la filtración, adsorción, fijación, asimilación bioquímica y sedimentación, entre otros (Aburto, 2011).

En las primeras etapas de operación del humedal, la acumulación de los sólidos sólo depende de la concentración del influente y de la capacidad de infiltración y sedimentación del medio. Posteriormente, previa aclimatación y establecimiento de las plantas y microorganismos, la depuración de la materia orgánica y de los compuestos asociados al nitrógeno se realiza mediante transformaciones no sólo físicas, sino también químicas y biológicas (Aburto, 2011).

Los humedales artificiales se clasifican por el tipo de flujo que presenta en: Humedales de Flujo Subsuperficial (HAFSS) y Humedales de Flujo Superficial (HAFS). La alimentación del sistema se lleva a cabo por alguno de los costados (HA de flujo horizontal o por la parte superficial del sistema (HA de flujo vertical) de tal manera que el agua se filtre a través del medio de soporte, conocido también como lecho o empaque, que está conformado por horizontes o capas de distinto espesor (Aburto, 2011).

Los HAFSS se caracterizan por que la circulación del agua se realiza a través de un medio granular, con una profundidad que depende de la profundidad que pueden alcanzar las raíces de las plantas. La vegetación se planta en este medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas. En función de su configuración hidráulica, pueden ser de flujo horizontal o flujo vertical (CONAGUA, MAPAS 30, 2015).

En la Figura 13 se ilustran los componentes de un HAFSS (CONAGUA, MAPAS 30, 2015).

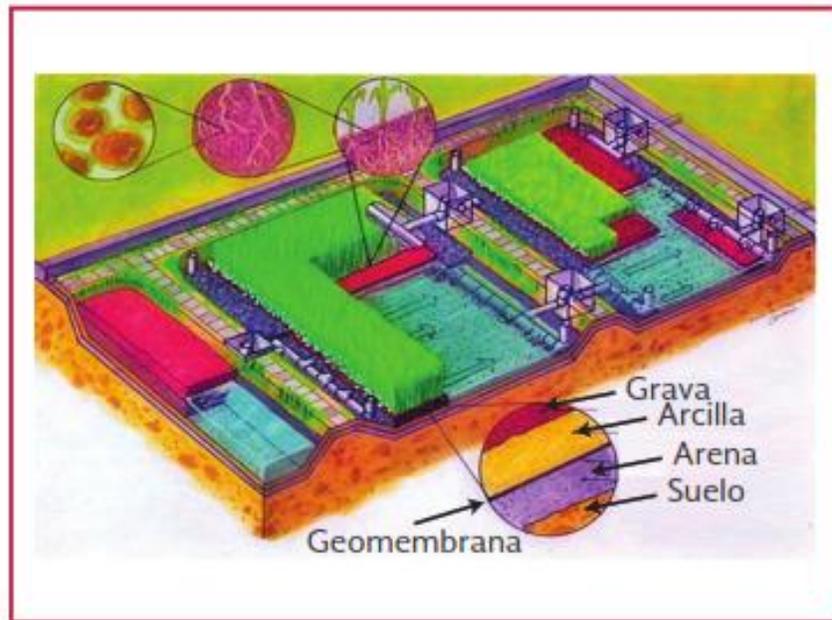


Figura 13. Componentes principales de un HAFSS (CONAGUA, MAPAS 20, 2015).

Los HAFS son aquellos donde el agua circula preferentemente a través de los tallos de las plantas y está expuesta directamente a la atmósfera. Este tipo de humedales es una modificación al sistema de lagunas convencionales. A diferencia de éstas, tienen menor profundidad (no más de 0.6m) y tienen plantas. Estos sistemas requieren más área que los de tipo subsuperficial y son una alternativa para cuando se requiere la remoción de nutrientes, en específico del fósforo según se indica la CONAGUA en el Libro 20 del Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (CONAGUA, MAPAS 20, 2015).

Un HAFSS, es un filtro de materiales granulares en donde se desarrolla un sistema de raíces de plantas, que generalmente pertenecen al género *Phragmites Sp.* y *Thypha Sp.*, conocidos comúnmente como carrizos o tules respectivamente. Este arreglo proporciona una matriz de grava y raíces a través del cual fluye el agua a tratar y donde se llevan a cabo diversos procesos de tratamiento, semejando el medio natural conocido como rizosfera. Estas plantas aportan el oxígeno atmosférico captado por las hojas a las raíces y rizomas, por lo que el agua residual se trata aeróbicamente por los microorganismos presentes en la rizosfera, y anaeróbicamente por aquellos microorganismos que se encuentran entre los intersticios del medio granular circundante. Las mayores ventajas sobre otros procesos son su relativo bajo costo de operación, su fácil instalación y mantenimiento, además de producir un efluente de buena calidad (DBO<sub>5</sub> promedio de 25mg/L) cuando son alimentados con aguas residuales domésticas. En la Figura 14 se ilustra un esquema de filtro de lecho de raíces (Noyola *et al.*, 2013).

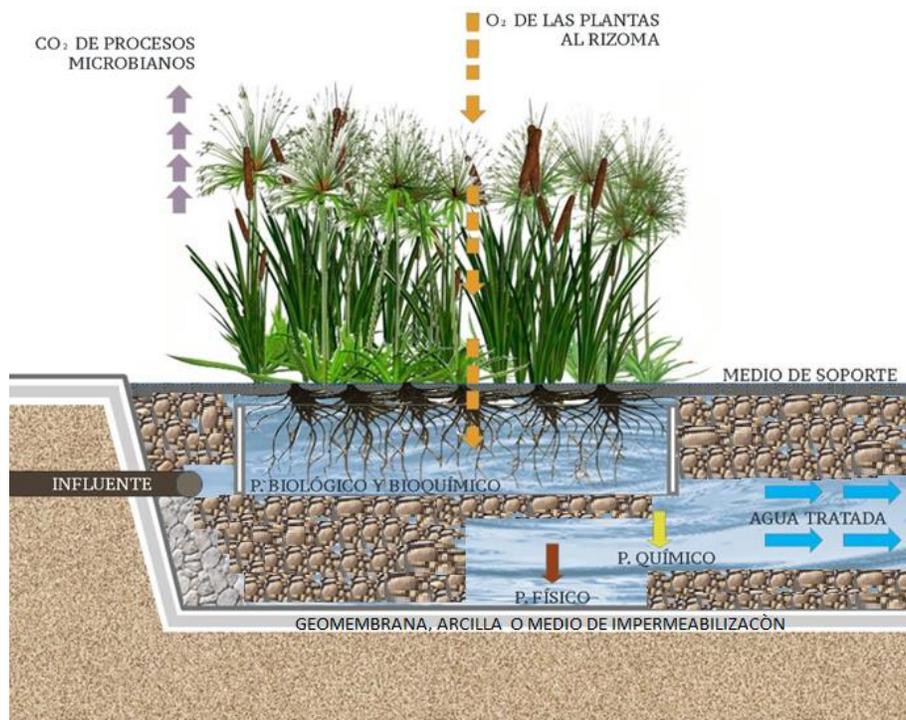


Figura 14. Características generales de un HA subsuperficial de flujo horizontal (Luna Pabello y Morales Ferrero, 2018).

Se enlistan ventajas y desventajas de este sistema de tratamiento<sup>17</sup>:

**Ventajas:**

- Bajos costos de operación y mantenimiento.
- Participación de miembros de la comunidad a beneficiar (construcción, operación y mantenimiento).
- Aspecto natural.
- Estéticamente agradables.
- Atrae vida silvestre (como aves y mariposas).
- Pueden generarse flores de ornato, forraje, materia prima para artesanías.
- Bajo costo energético.
- Baja generación de subproductos no deseados.
- Puede alcanzar la calidad del agua de normas internacionales vigentes.
- Menor costo de inversión en comparación con otros sistemas convencionales.
- Menor costo de operación.
- Tiempo de vida útil, por arriba de 25 años.
- Operados correctamente no generan malos olores, ni presencia de mosquitos.

**Desventajas:**

- Requieren amplias áreas para la construcción.
- Requieren altos tiempos de retención hidráulica.
- Durante periodos de paros o no alimentación del agua puede ser propenso a sufrir incendios.

La desventaja más grande del humedal, para el caso del agua que alimenta a la Laguna la Piedad, es la superficie disponible para su construcción, por lo que será necesario buscar el aprovechamiento de la tecnología ya construida de las PTAR de la zona, sobre todo por su capacidad de tratamiento en una menor área, y lograr el aprovechamiento de infraestructura actualmente ociosa.

---

<sup>17</sup> *Ibidem.*

## 4. METODOLOGÍA.

Durante el periodo de investigación bibliográfica se encontró poca información al respecto de la Laguna la Piedad, sin embargo, fue posible acudir al Archivo Histórico del Agua de la CONAGUA, así como llevar a cabo un cuestionario a personas que han vivido en el área desde hace 20 años o más, se recopiló la información generada por el municipio referente a todos los cuerpos de agua y al grupo de cuerpos relacionados con el sitio y no particularmente al cuerpo de estudio. Se recopiló información pública disponible relacionada al mejoramiento y aprovechamiento del agua, en particular a las plantas de tratamiento de aguas residuales de la zona, que incluye el estado de éstas, así como su influencia sobre la Laguna la Piedad.

Se encontraron datos históricos que la definen como un cuerpo de agua natural, un sólo dato de calidad del agua de la Laguna la Piedad, que principalmente recibe aguas residuales de tipo municipal sin tratamiento de las colonias que se encuentran aguas arriba y que se mezclan con las aportaciones naturales que convergen a su llegada por el río Barranca de Zamorillas, y no se encontraron datos del balance hídrico de la Laguna la Piedad, por lo que fue necesario producir datos propios, tanto de calidad del agua como datos de medición de caudal, con ayuda del Laboratorio de Microbiología Experimental de la Facultad de Química de la UNAM.

Para la determinación de los datos de medición de caudal, fue necesario llevar a cabo diversas visitas y recorridos, primero para conocer la zona, y después para determinar el total de las entradas y salidas que afectan a la laguna y a partir de esto se pudieron elegir los mejores sitios para tomar las muestras de calidad del agua y realizar las mediciones.

Una vez que se establecieron los sitios y se generaron los datos de calidad del agua y mediciones de los caudales, es posible determinar la mejor alternativa a nivel conceptual, para lo que es necesario establecer cómo funciona una laguna de oxidación, una PTAR LA y una PTAR HAFSS, y así desarrollar una estrategia para la selección del escenario conceptual más viable para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad, es necesario llevar a cabo diversas etapas, que van de la más viable de diseñar, construir y operar económicamente hablando, hasta las mayores inversiones que involucrarían echar a andar el total de las PTAR existentes, así como que el municipio garantizará la operación de las mismas.

Aunado a esto, se han realizado encuestas a los vecinos de la localidad que se encuentran relacionados con la Laguna la Piedad, principalmente para conocer el estado de la misma antes de sufrir los embates de las constantes descargas de aguas residuales, que se refiere al estado de la laguna en el momento previo a recibir las aguas residuales sin tratamiento y el momento actual, con esto se atiende la parte social y se lleva a cabo una propuesta que sea viable también para la localidad y se facilite la aceptación de los pobladores y vecinos, quienes son los beneficiarios directos.

Se considera necesario establecer el estado actual de la Laguna, denominado Escenario 0, descrito en el apartado 5.5. de esta tesis, así como la información recopilada, pues de esta forma, se puede establecer la mejor alternativa para una propuesta conceptual técnica, económica y ambiental para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad.

Para determinar el mejor escenario, se analizaron mediante matrices las diferentes tecnologías evaluadas, con ponderaciones que se definen principalmente por la adaptación de métodos de comparación existentes, la propia experiencia y el conocimiento de la zona de influencia, iniciando por un método a través del que se puede elegir el mejor sistema o sistemas de mejoramiento y aprovechamiento del agua para este cuerpo en particular.

Una vez que se ha determinado el mejor método de mejoramiento y aprovechamiento del agua, se plantearon diversos escenarios que incluyen tanto una PTAR LA, reconstrucción, rehabilitación y puesta en marcha de las plantas existentes, una PTAR HAFSS, que incluyen operaciones de una sola tecnología o del total de las PTAR disponibles o bien de mezclas de estas, considerando tanto los aspectos económicos, técnicos y ambientales principalmente de conformidad con la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-003-SEMARNAT-1997 para la determinación de la efectividad de los sistemas de tratamiento sobre el agua residual que entra a la laguna de la piedad y la del propio cuerpo de agua.

Finalmente, a partir del análisis de todos los datos y de las alternativas propuestas, se creó una matriz propia denominada “Matriz de viabilidad de escenarios”, que incluye datos que puedan permitir la comparación de dos tecnologías tan diferentes en su diseño, construcción, instalación, operación y mantenimiento, como son las PTAR LA y las PTAR HAFSS, permitiendo así, la competencia entre ambas tecnologías.

Se ilustra la metodología empleada en la Figura 15.

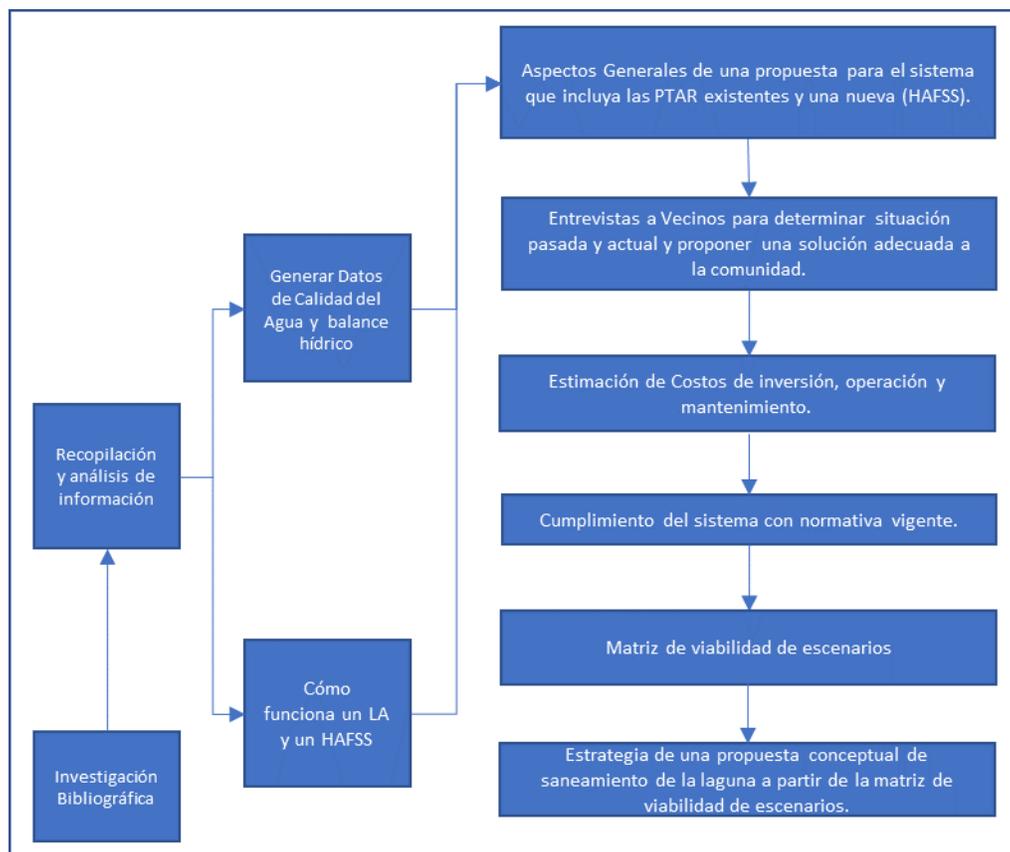


Figura 15. Metodología empleada.

- Se llevó a cabo la investigación bibliográfica para determinar los datos disponibles del sitio, así como conocer las diversas alternativas para presentar el escenario conceptual más viable para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna La Piedad.
- Se recopiló y analizó la información recopilada.
- Se llevaron a cabo visitas al sitio, para reconocerlo y generar datos de calidad del agua y balance hídrico. Se llevo a cabo un programa, y este se siguió hasta que la Universidad cerró sus puertas derivado de las instrucciones de la Secretaría de Salud como acción para prevenir el contagio de la COVID-19, generada por el virus Sars-CoV-2.
- Se seleccionó la bibliografía que permitió determinar cómo funciona una PTAR LA y un HAFSS.
- Se determinaron los aspectos generales de una propuesta conceptual para el sistema que incluya las PTAR existentes y una nueva PTAR HAFSS.
- Se llevaron a cabo entrevistas a vecinos para determinar la situación pasada y actual y proponer una solución adecuada a la comunidad.
- Empleando los datos recopilados, se estimaron costos de inversión, operación y mantenimiento de la propuesta conceptual.
- La propuesta conceptual, está basada en la normatividad vigente, en cuanto a la calidad del agua de descarga de las PTAR.
- Se elaboró la matriz de viabilidad de escenarios, incluyendo el escenario actual o escenario cero.
- Se elaboró una propuesta conceptual de saneamiento de la laguna a partir de la matriz de la viabilidad de escenarios.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para poder llevar a cabo las propuestas de alternativas de mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad, fue necesario llevar a cabo un recorrido a la zona de influencia del sitio, elección de los sitios para llevar a cabo las mediciones de caudal de flujo de las entradas y salidas del cuerpo de agua. A partir de los datos generados, es posible establecer el escenario cero y presentar los diferentes escenarios propuestos para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna.

### 5.1. Recorrido por la zona de influencia y diagnóstico.

Se llevaron a cabo dos visitas de reconocimiento del sitio de la Laguna la Piedad, una para conocer la Laguna, las zonas aledañas, así como sus entradas y salidas con fecha del 4 de octubre del año 2019 y otra para realizar un recorrido a través de los cauces y las diversas aportaciones que alimentan principalmente a la Laguna con fecha del 25 de enero del 2020.

Existen varias rutas de acceso al bordo de la Laguna y formas de transporte, siendo las más comunes las siguientes:

- En vehículo particular, tomando desde la ciudad de México la autopista 57-D México-Querétaro, desviándose en la FORD, pasando la salida del circuito exterior mexiquense en dirección hacia Querétaro, tomando la av. Constitución que pasa por el Ayuntamiento de Cuautitlán Izcalli siguiendo hasta la calle de Huixquilucan que se encuentra perpendicular a esta avenida, se sigue por la calle Huixquilucan hasta la Av. San Antonio, donde se gira a la derecha, se sigue por Av. San Antonio, que te lleva directamente al acceso bordo de la laguna.
- En transporte público, se puede tomar el tren suburbano desde la estación Buenavista y bajar en la estación Cuautitlán Izcalli, de donde salen rutas que van a la Piedad, también es posible tomar colectivos a partir del metro indios verdes o la estación Politécnico, sin embargo, los colectivos de estas estaciones del metro se consideran peligrosos por ser susceptibles de asalto, por lo que no se recomienda esta ruta.

En la visita de campo del 4 de octubre del año 2019, fue posible conocer la entrada de agua a la Laguna la Piedad, procedente del río Barranca de Zamorillas (1), la entrada de agua pluvial (2), la ubicación de la PTAR la Piedad II (3), la ubicación de la PTAR Lomas de Cuautitlán (4), El punto donde converge el Agua de las PTAR con el río Barranca de Zamorillas (5) el Vertedor de la Laguna la Piedad (6), la salida de la Laguna hacia el río Cuautitlán (7), la salida de la Laguna la Piedad hacia riego (8), una vista desde el sur de la Laguna hacia la PTAR Lago de Guadalupe (9) y vista de la laguna la piedad desde el nororiente de la Laguna (10). Con estos numerales, se ilustra la ubicación de cada uno de estos sitios en la Figura 16.

De estas visitas fue posible determinar los sitios más representativos para llevar a cabo los muestreos para generar los datos de calidad del agua y mediciones de caudal de las entradas y

salidas del cuerpo de agua. Sin embargo, luego de los resultados del primer muestreo, se observó que posiblemente hay otras descargas que no se pueden medir, ni integrar al flujo tratado, por encontrarse en la zona sur de la Laguna la Piedad y ser directas al cuerpo de agua, por lo que se llevó a cabo un recorrido de campo para verificar el total de las descargas que afectan al cuerpo de agua el 25 de enero del año 2020.

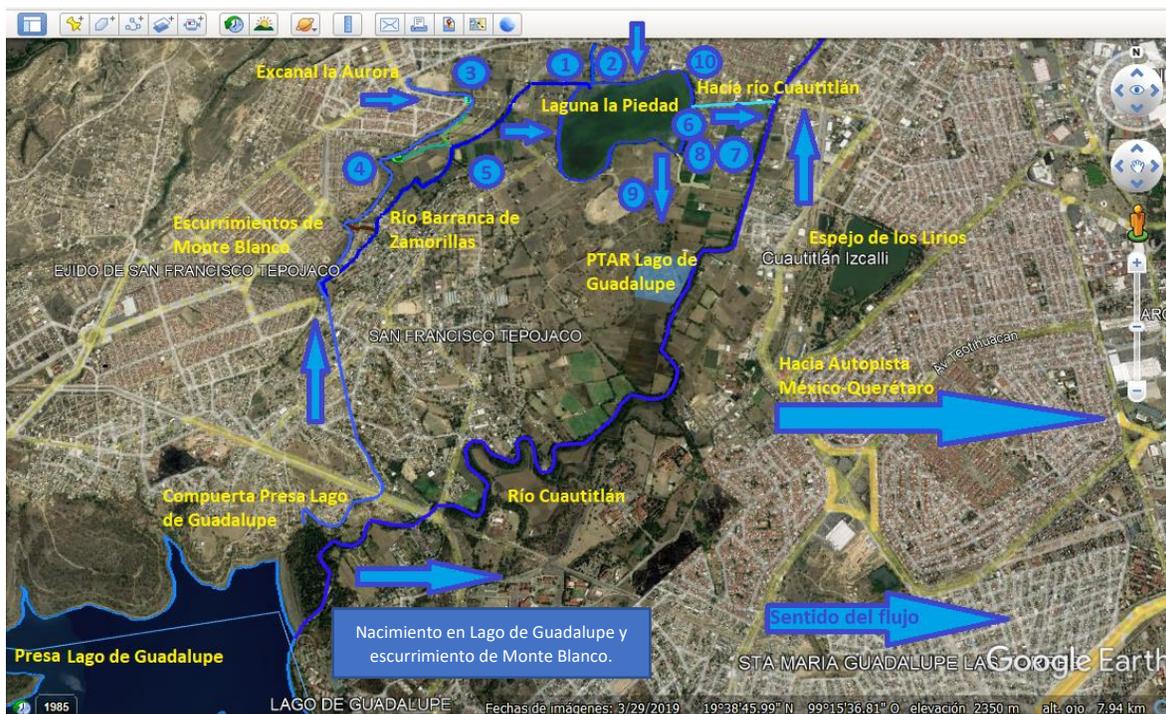


Figura 16. Ubicación de los sitios visitados el 4 de octubre de 2019. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020.

Como resultado de la visita del 4 de octubre del año 2019, se encontraron diversos elementos que pueden ser testimonio de la contaminación que sufre el agua, que son los siguientes:

1. Presencia de color verdoso del agua del vaso



Figura 17. Vista de la Laguna desde el lado norponiente, 4-octubre-2019.

2. Presencia de olor desagradable y color pardo-rojizo del agua del influente



*Figura 18. Entrada de Agua a la Laguna por el río Barranca de Zamorillas, 4-octubre-2019.*

3. Presencia de olor y color verdoso del agua que sale de la laguna al Río Cuautitlán



*Figura 19. Salida de agua de la Laguna hacia el río Cuautitlán, 4-octubre-2019.*

4. Presencia de espumas y natas que pueden encontrarse de manera frecuente en sistemas saprobios de aguas municipales



*Figura 20. Estado de contaminación visual de la Laguna, 4-octubre-2019.*

5. Ausencia de peces: Durante la visita no se apreciaron peces en la laguna, aunque si patos y garzas dentro del cuerpo de agua.



*Figura 21. Aves en el cuerpo de la Laguna, 4-octubre-2019.*

6. Presencia de residuos sólidos urbanos alrededor de la laguna y dentro del mismo vaso.



*Figura 22. Derecha RSU en el cuerpo de la Laguna, a la izquierda RSU en la salida a riego de la Laguna, 4-octubre-2019.*

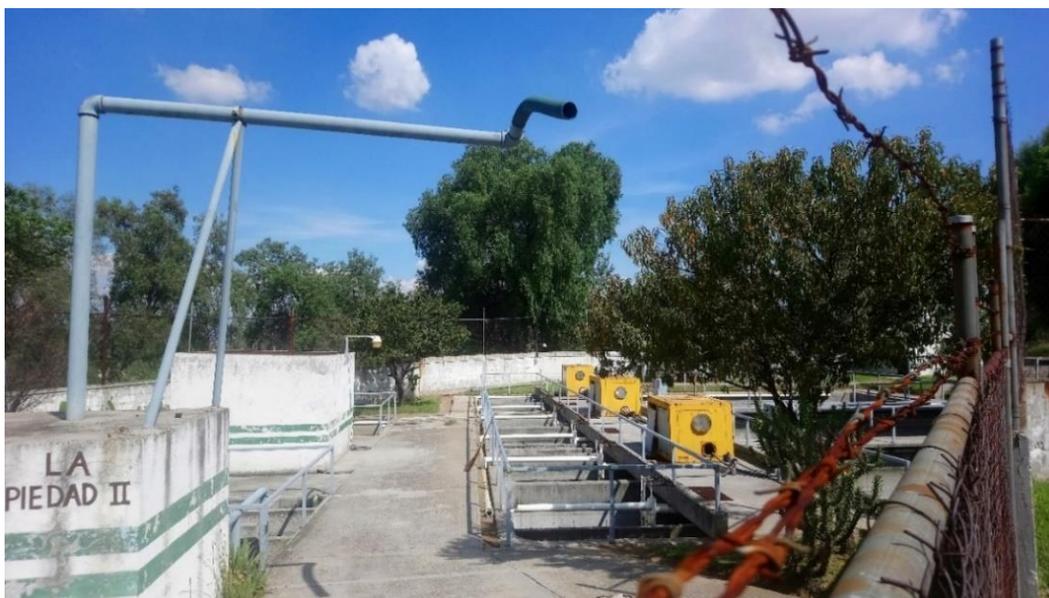
7. Presencia de color verdoso y turbidez en el vertedor de la Laguna, localizado en el bordo oriente de la misma.



*Figura 23. Vertedor de la Laguna, hacia la salida al río Cuautitlán, 4-octubre-2019.*

Durante el recorrido realizado el 4 de octubre del año 2019, fue posible conocer y verificar el estado de las 2 PTAR que descargan sus aguas al río Barranca de Zamorillas: la PTAR la Piedad II y la PTAR Lomas de Cuautitlán.

La PTAR la Piedad II dejó de operar por la falta de mantenimiento y reposición del sistema de aireadores, aunque se ha mantenido la infraestructura pues se cuenta con vigilancia constante por parte de personal pagado por el OO.



*Figura 24. Situación de la PTAR la Piedad II, 4-octubre-2019.*

La PTAR Lomas de Cuautitlán requiere de una reconstrucción, pues se encuentra sumamente deteriorada y no es posible verificar en las condiciones actuales si la obra civil, que permanece, se encuentra en condiciones de operar, además de que es necesario drenarla y derivar temporalmente el agua que sigue entrando a sus instalaciones, aparentemente por el sistema de drenaje subterráneo, esto para poder verificar la permeabilidad y capacidad de los 2 tanques instalados y rediseñar el propio sistema de tratamiento procurando mantener la misma área disponible.



Figura 25. Situación de la PTAR Lomas de Cuautitlán, 4-octubre-2019.

El 25 de enero del 2020, Se llevó a cabo un recorrido a través del Excanal de la Aurora, desde su inicio en la Presa Lago de Guadalupe y hasta su confluencia con el río denominado Barranca de Zamorillas, también conocido como Tepojaco, así como el recorrido desde la derivación del Excanal de la Aurora hasta dónde este se une con el río Barranca de Zamorillas.



Figura 26. Cauces de interés en la zona de influencia. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020.

Se llevó a cabo el recorrido por las zonas libres del cauce del río denominado Barranca de Zamorillas, conocido también localmente como Tepojaco, pues se encontraron varias zonas invadidas por

pobladores, que mantienen la zona como propiedad privada, cercada o bardeada y no permiten el ingreso para poder verificar otras descargas o extracciones de agua al río, aunque a simple vista, se pueden observar tuberías de PVC de 4" que se dirigen de los predios directamente al cauce.

Durante el recorrido del 25 de enero de 2019, a través de la zona de influencia de las aportaciones que en ese momento entraban a la Laguna la Piedad, se pudo observar que las aguas residuales que entran a dicha laguna por el río denominado Barranca de Zamorillas, son de tipo residual municipal Figura 27.



*Figura 27. Entrada de Agua Residual a la Laguna la Piedad. Barranca de Zamorillas, 25-enero-2020.*

En la Figura 28, se ilustran todos los puntos visitados y mediciones de caudal obtenidos durante el recorrido del 25 de enero del año 2020. Enmarcados en rojo se indican los sitios correspondientes a entradas a la Laguna y enmarcados en morado se indican los sitios que referentes a las salidas de la Laguna.

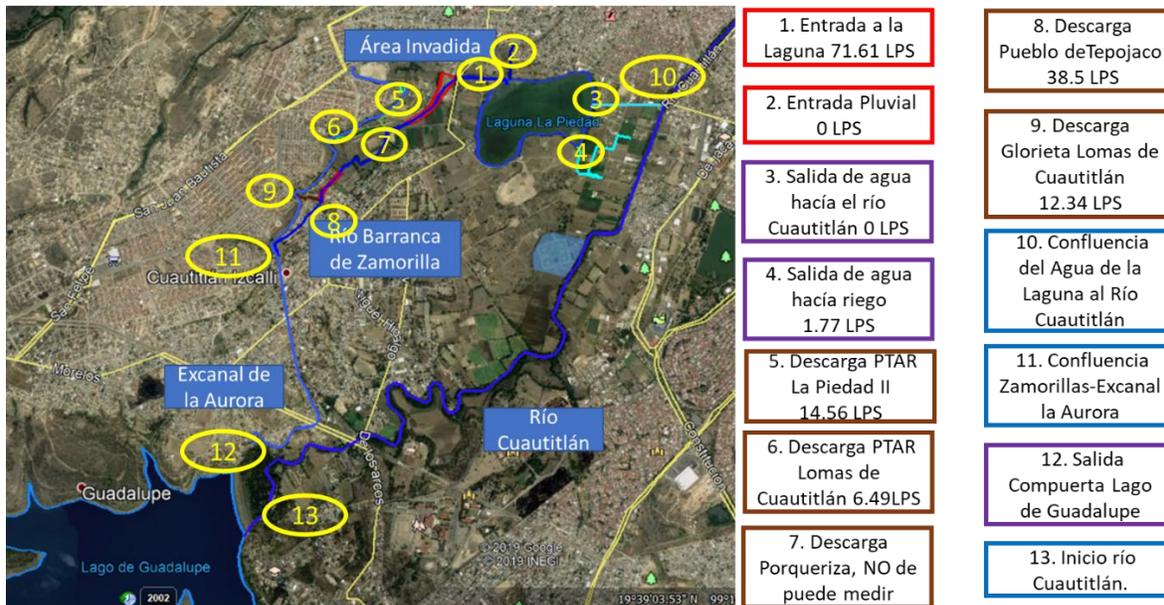


Figura 28. Localización de los sitios visitados y las mediciones de caudal el 25 de enero del 2020. Fuente Google LLC, Google Earth Pro, 2020.

De esta visita, se puede resaltar lo siguiente:

1. La calidad del agua que entra y sale de la laguna es de interés para el desarrollo de la propuesta de mejoramiento y aprovechamiento del agua.
2. Es necesario conocer las mediciones de caudal de las aportaciones que llegan a la Laguna la Piedad, con objeto de poder proponer una solución para su mejoramiento y aprovechamiento del agua, por lo que, junto con la recolección de muestras para análisis de laboratorio y determinación de calidad del agua, se llevó a cabo la medición del caudal de cada uno de los sitios propuestos.
3. Los sitios No. 1, 2 (entradas identificadas a la Laguna, marcadas en rojo), 5, 6 y 7 (Descargas provenientes de PTAR que no operan y una denominada por los vecinos como Porqueriza marcada en marrón), son los que representan la mayoría de las aguas que están entrando sin tratamiento alguno a la Laguna la Piedad. Todas se incorporan
4. Los sitios No. 3 y 4 (marcados en color morado), son todas las salidas de agua que se han identificado en la Laguna la Piedad.

## 5.2. Generación de datos hidrológicos y propuesta de los sitios para medir los caudales.

La Laguna la Piedad es un cuerpo de agua léntico que recibe constantemente agua por la aportación principal que se encuentra en el lado noroeste, la principal aportación de agua que entra a la laguna

es conducida hasta ella a través del río denominado Barranca de Zamorillas, la otra aportación que recibe la laguna es al norte por un canal natural denominado “Entrada Pluvial”.

Los volúmenes de agua que está recibiendo la Laguna se dividen en tres temporadas, lo que es completamente atípico para el general de los cuerpos de agua, pero en este particular, se tiene que considerar un periodo de tiempo particular, en el que con objeto de cumplir con la dotación de riego de las aguas que se aprovechan del cauce del río Barranca de Zamorillas y de la propia Laguna, durante el periodo estiaje se abre la compuerta de la Presa Lago de Guadalupe, lo que aumenta significativamente el caudal del río y de la propia Laguna, aun en mayor volumen que el registrado en temporada de lluvia, logrando anegar incluso la zona federal del lado norte de la misma. Por lo que las temporadas de la Laguna la Piedad son las siguientes:

- a) Temporada de lluvias.
- b) Temporada de estiaje.
- c) Temporada de estiaje con apertura continua de la compuerta de descarga de la presa Lago de Guadalupe hacia un túnel que pasa por debajo de la colonia Tepojaco y desemboca al río Barranca de Zamorillas.

El flujo hídrico de la Laguna la Piedad se puede ilustrar en la Figura 29. Esta Figura se elaboró para indicar el total de las entradas y las salidas que fluyen a través de la Laguna la Piedad, lo que permitirá entender los comportamientos de los datos de calidad del agua y determinar los caudales para el diseño de la propuesta de tratamiento de las aguas residuales que entran sin tratamiento a la Laguna.

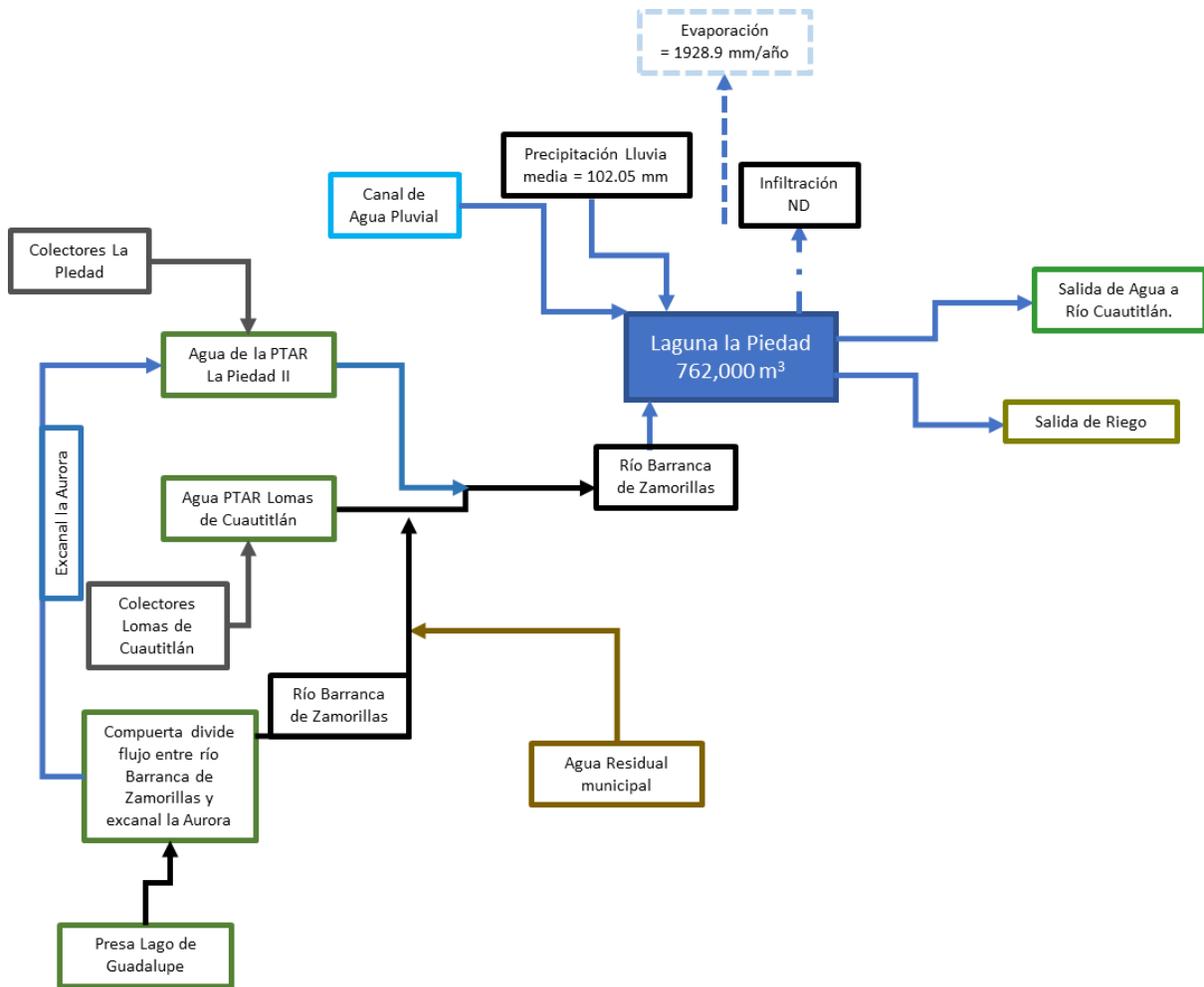


Figura 29. Flujo Hídrico del Total de Entradas y Salidas de la Laguna la Piedad.

Los datos de evaporación en un cuerpo de agua no pueden ser medidos directamente como la precipitación y las mediciones de caudal, por lo que lo más conveniente para este trabajo sería llevar a cabo un método denominado balance hídrico, los principales factores que inciden en la evaporación de una superficie son la radiación solar, la velocidad del viento requerida para transportar el vapor y el gradiente de humedad específica del aire sobre la superficie (Dugaro *et al.*, 2013), sin embargo, no existen las condiciones para llevar a cabo estas mediciones, tanto por seguridad como por la situación de distanciamiento social ocasionada por la pandemia del Virus SARS-CoV-2.

Según indica Dugaro *et al.*, 2013, el método del balance hídrico está basado en el principio de conservación de la masa aplicado a una parte del ciclo hidrológico, la evaporación (E) de un cuerpo de agua natural queda determinada por la diferencia entre las variables de entrega, precipitación (P) y caudal de entrada ( $Q_E$ ), y las variables de salida: almacenamiento en las orillas ( $V_s$ ) contra el caudal de salida ( $Q_s$ ) y la variación en el volumen de almacenamiento (DS).

$$E = P + Q_E - V_s - Q_s \pm DS$$

Sin embargo, se desconoce el valor de Vs y DS, además de que no fue posible llevar a cabo estas mediciones, por no contar con el espacio adecuado y seguro para poder recopilar estos datos, adicionalmente a que fue necesario dejar de visitar el sitio, con objeto de mantener el distanciamiento social implementado por el gobierno federal durante la pandemia ocasionada por el virus SARS-CoV-2, por lo que no se tienen datos de evaporación de la Laguna.

La precipitación se calculó con los datos históricos de la estación hidroclimatológica de la CONAGUA denominada San Martín de Obispo con clave 15098, que es la más cercana que se localizó en las coordenadas: 19° 37'18" N y: 99° 11' 34" O y que recopila datos de 1951 y hasta 2010, considerando los datos de precipitación normal resultando en un valor promedio anual de 770 mm, donde además se puede calcular la precipitación promedio en los meses de estiaje que es de 11.78 mm y la precipitación promedio en temporada de lluvias que es de 102.05 mm.

Con los datos históricos de la CONAGUA recopilados y generados en su estación hidroclimatológica se obtuvieron las medidas de precipitación de las que se puede determinar que existe un promedio de precipitación total anual en la zona de 160.7mm.

El agua que llega a la Laguna la Piedad, correspondiente a sus influentes y la propia agua de la Laguna, está clasificada para uso agrícola, por lo que aguas arriba de la Laguna la Piedad y en donde confluyen los efluentes de las dos PTAR la Piedad II y PTAR Lomas de Cuautitlán, también conocida como Tepojaco, al río Barranca de Zamorillas, existe un sitio denominado "El Acueducto", que a decir de los vecinos data de principios del siglo pasado. En este sitio se encontró que, durante la temporada de estiaje, se desvía aproximadamente el 40% del agua de las PTAR a la zona de riego que se encuentran en la margen izquierda del río Barranca de Zamorillas, esta es una derivación intermitente del agua que baja de esas PTAR y que se destina para riego, principalmente de avena durante la temporada de estiaje. El volumen de agua que finalmente entra a la Laguna, ya incorpora la aportación de estas PTAR que se encuentran sin operar.

En ese punto de confluencia de agua proveniente de las dos PTAR en temporada de estiaje, se ha encontrado que se descargan hasta 39 LPS de agua residual sin tratar que de forma intermitente se desvían para riego, por lo que es necesario tratar para lograr que el agua que actualmente recibe la laguna sea completamente saneada y entregada en la calidad indicada en las NOM-001-SEMARNAT-1996, para embalses naturales y uso agrícola.

Durante las diversas visitas y recolecciones de muestras, se llevó a cabo la medición de caudal en diferentes puntos, a través del método del flotador, del ministerio de agricultura y riego de Lima, Perú (DGIAR, 2015). Este método es el más sencillo de implementar en las condiciones como las que prevalecen en esta zona de inseguridad y falta de infraestructura aun cuando sólo permite estimar en forma aproximada el caudal.

Para llevar a cabo este método de medición de caudal se debe estimar la velocidad y el área del canal. El cálculo del caudal estimado se determina mediante la siguiente ecuación matemática:

$$Q = Fc \cdot A \cdot \frac{L}{T}$$

Dónde:

Q = es el caudal en m<sup>3</sup>/s

L = es la longitud entre el punto a y b en m

A = es el área en m<sup>2</sup>

T = es el tiempo promedio en segundos

Fc = es el factor de corrección.

El factor de corrección (Fc) relacionado con la velocidad, se seleccionó de acuerdo con el tipo de río o canal y a la profundidad de este, de acuerdo con los valores de la Tabla 11, que se encontraba entre canales de tierra con profundidad de agua > 15 cm, riachuelos cuya profundidad de agua es >15cm y canales de tierra cuya profundidad de agua es < 15 cm. Se empleó el Factor de 0.5.

Tabla 11. Determinación de Factor de Corrección Fc para cálculo de caudales por método del Flotador<sup>18</sup>.

TIPO DE CAUCE	FACTOR DE CORRECCIÓN Fc
Canal revestido en concreto, profundidad del agua > 15 cm	0.8
Canal en Tierra, profundidad del agua > 15 cm	0.7
Riachuelos profundidad del agua > 15 cm	0.5
Canales de tierra profundidad del agua < 15 cm	0.25 – 0.5

Como resultado de dichas mediciones es que se pudo definir el balance hídrico otorgando una ponderación definida por los flujos de entrada y salida identificados.

De los sitios que se midieron los datos obtenidos se presentan en la Tabla 12 y son útiles para dar a conocer el caudal que entra y sale de la Laguna la Piedad, permitiendo así determinar los volúmenes de entrada y salida de la laguna en las diversas temporadas.

Tabla 12. Recopilación de datos de medición de caudal obtenidos por sitio.

Fecha	Sitio 1: Entrada a la Laguna (LPS)	Sitio 2: Entrada pluvial a la Laguna (LPS)	Sitio 3: Salida de agua de la Laguna hacia el río Cuautilán (LPS)	Sitio 4: Salida de riego de la Laguna a riego (LPS)	Sitio 5: Descarga de la PTAR La Piedad II (LPS)	Sitio 6: Descarga de la PTAR Lomas de Cuautilán (LPS)
04-oct-19	40.00	0.00	32.00	0.00	18.00	10.00
25-ene-20	71.61	0.00	0.00	1.77	14.56	6.49
21-feb-20	64.63	0.00	0.00	37.99	17.83	21.27
23-mar-20	344.42	0.00	1427.28	14.71	16.19	22.91

Es importante notar que, en el mes de marzo, correspondiente a la temporada de estiaje, se observa un aumento significativo en el caudal. Esto se debe a que, durante este periodo, se lleva a cabo la apertura de la compuerta de la Presa Lago de Guadalupe por parte de la unidad de riego, razón por

<sup>18</sup> Ministerio de Agricultura y Riego (2015). Manual No. 5 Medición de Agua, Lima, Perú. Ministerio de Agricultura y Riego. Dirección General de Infraestructura Agraria y Riego. Lima, Perú. Pág. 3.

la que se identifica durante la temporada de estiaje la denominada en este trabajo: “temporada de estiaje con apertura de compuerta de la Presa Lago de Guadalupe”.

Debido a la emergencia sanitaria acaecida por el virus SARS-CoV-2, no fue posible llevar a cabo una campaña de medición tal y como se planteó originalmente. En la misma, se había considerado tomar las muestras de agua para analizar en el laboratorio su calidad y, al mismo tiempo, recopilar datos de medición de caudal. A pesar de haber sido suspendidas todas las visitas después del 23 de marzo del año 2020 y por tanto el programa de medición de flujos, los datos obtenidos de la campaña realizada se consideraron suficientes para trabajar y plantear una estrategia que permita cumplir con los objetivos del presente trabajo.

El mayor volumen medido de todas las aportaciones que entran a la Laguna se localizó en el Sitio 1: Entrada a la Laguna la Piedad, este dato se obtuvo el 23 de marzo del año 2020 y se debe a la apertura de la compuerta de la presa Lago de Guadalupe por parte de la unidad de riego que, durante los meses de marzo, abril y mayo, temporada en que se vierten hasta 350 LPS de agua para riego que son conducidos a través del río Barranca de Zamorillas y llegan a la Laguna la Piedad. Según datos previos<sup>19</sup>, se han medido hasta 120 LPS de agua que entra a la laguna en temporada de lluvias.

Durante los recorridos realizados para llevar a cabo el reconocimiento de la zona, la recolección de muestras y medición de caudales se pudo observar lo siguiente:

- En la zona sur oeste de la Laguna se encuentran diversas viviendas, de las cuales se estima podrían estar descargando agua directamente a la Laguna, se considera que un aproximado de 12 familias habitan esa zona. Esta zona habitacional, por ser sitios identificados como propiedad privada y que cuentan con bardas y protecciones, esta descarga o descargas no se pueden verificar. Los predios se encuentran a pie de camino, invadiendo lo que se considera zona federal y el acceso a la Laguna requeriría entrar en las propiedades.
- En el área sureste de la Laguna, se encuentra un campamento con una caseta que cuenta con un tinaco de aproximadamente 1,000 L y que sirve a un campamento de tráileres que cuenta con un sanitario y lavamanos en una sencilla caseta fincada en el predio a orillas de la laguna. Aun cuando el campamento se encontraba sin protecciones o bardas, no se observó alguna instalación sanitaria, ni algún sitio donde descargan el agua residual que pudiera resultar.
- En la zona sur de la Laguna se encontró una construcción de una casa habitación a la que el 23 de marzo del año 2020 se pudo acceder sin embargo, no se pudo apreciar sistema de alcantarillado en los alrededores, en este sitio fue posible tomar una muestra de agua de la Laguna con una toma que para extracción de agua para la construcción, se succionaba mediante una bomba de 1 caballo de fuerza, que extraía el líquido directamente de la Laguna y que a decir de los maestros constructores se encontraba extrayendo el agua a unos 10 m dentro del embalse.

---

<sup>19</sup> Fuente: López Lázaro (2022), Determinación de Factibilidad Técnica, Económica y Ambiental de Incorporar un humedal Artificial para el Saneamiento de la Laguna la Piedad, Estado de México, Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. En proceso de revisión.

En la Figura 30, se puede ver la localización de los puntos de descargas supuestas sin tratamiento a la laguna.

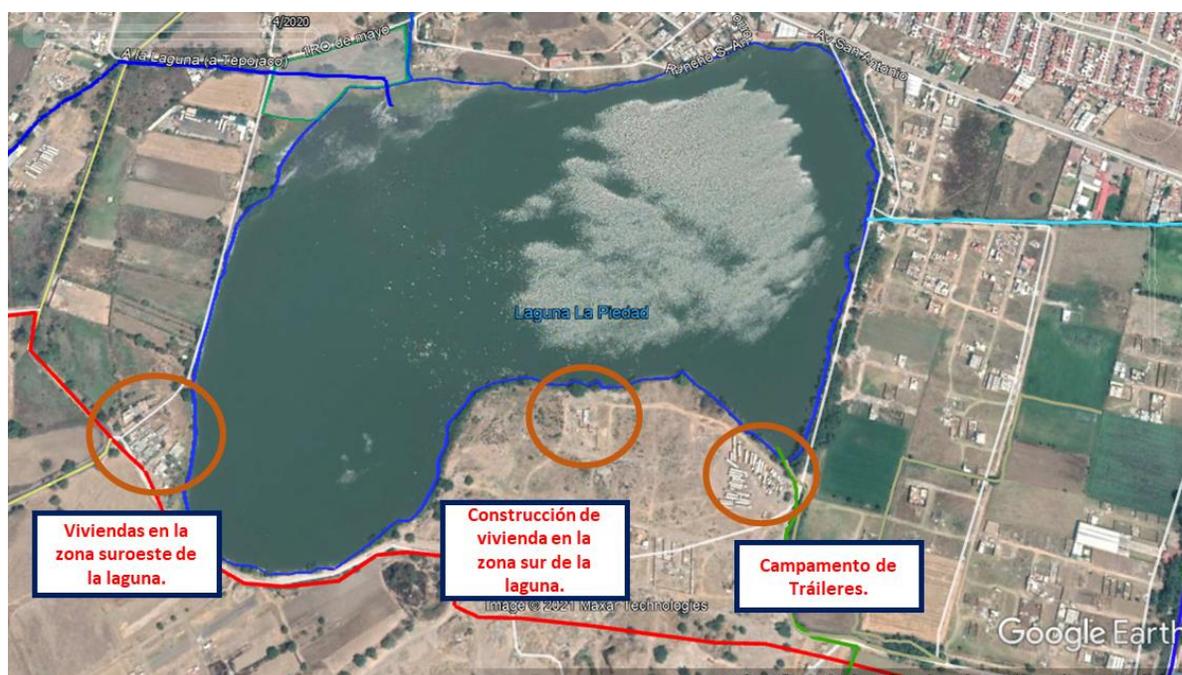


Figura 30. Localización de sitios que podrían estar descargando directo a la Laguna la Piedad. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020.

Estas viviendas y el campamento podrían estar descargando el agua residual directamente a la laguna. Según un conteo realizado a través de una vista satelital, se determinó que en el área existen un total de 12 viviendas. Se considera un promedio del consumo bajo, dado que en la zona existe un estrés hídrico elevado, según refirieron los propios pobladores durante las entrevistas (que se encuentran transcritas como parte de los anexos de este trabajo) llevadas a cabo en las que refirieron recibir agua de pipas y por tandeos en horarios reducidos de agua potable estimado, por clima predominante.

Según la Tabla 13, el consumo diario estimado para esta zona se indica en 184 L/hab/día de agua potable, los datos se obtuvieron de la CONAGUA en el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Libro 4, Datos Básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado, y son los que corresponden a un clima tipificado como cálido subhúmedo<sup>20</sup>, que es como se considera el clima en esta parte del municipio de Cuautitlán Izcalli, Estado de México.

El porcentaje considerado como aportación de aguas residuales es de 70 por ciento de la dotación de agua potable en L/hab/día, el restante puede consumirse antes de llegar a las atarjeas, así como

<sup>20</sup> Fuente: INAFED (2021), Información de las características generales de los municipios de Cuautitlán Izcalli en el Estado de México del Instituto nacional para el federalismo y el desarrollo municipal, recuperado el 20 de julio de 2021, <http://www.inafed.gob.mx/enciclopedia/municipios>

infiltraciones al alcantarillado procedentes de mantos acuíferos, corrientes o de la misma red de agua potable que pueden hacer variar el factor (CONAGUA, MAPAS 4, 2015).

*Tabla 13. Promedio del consumo de agua potable estimado por clima predominante<sup>21</sup>.*

Clima	Consumo l/hab/día			Subtotal por Clima
	Bajo	Medio	Alto	
Cálido húmedo	198	206	243	201
Cálido Subhúmedo	175	203	217	191
Seco o Muy Seco	184	191	202	190
Templado o Frío	140	142	145	142

Fuente: CONAGUA. (2015), Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado, Tomo 4. Ciudad de México: SEMARNAT-CONAGUA.

Según datos del último censo de población y vivienda del INEGI 2020, en el Estado de México hay un promedio de 3.7 personas por vivienda<sup>22</sup>, por lo que si hay 12 viviendas, incluido el campamento de tráileres en la zona sur de la laguna le Piedad, se puede determinar que descargan a la laguna sus aguas residuales 44.4 personas, lo que, según cálculos de producción de agua residual de la CONAGUA (CONAGUA, MAPAS 4, 2015), resultarían en un gasto medio de 0.66 LPS, que es un volumen despreciable, considerando que a la laguna entran por el río Barranca de Zamorillas hasta 59 LPS en temporada de estiaje.

En la Figura 31, se ilustra la información sobre el balance hídrico de la Laguna la Piedad, en el Estado de México, durante la temporada de Estiaje, según promedio de los datos obtenidos durante esta temporada los días 4 de octubre del año 2019, 25 de enero del año 2020 y 21 de febrero del año 2020.

<sup>21</sup> Fuente: CONAGUA. (2015), Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado, Libro 4. Ciudad de México: SEMARNAT-CONAGUA.

<sup>22</sup> Fuente: Ocupantes promedio por vivienda según el censo de población y vivienda del INEGI 2020 es de 3.7 habitantes por vivienda en el Estado de México, recuperado el 20 de julio de 2021, <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>

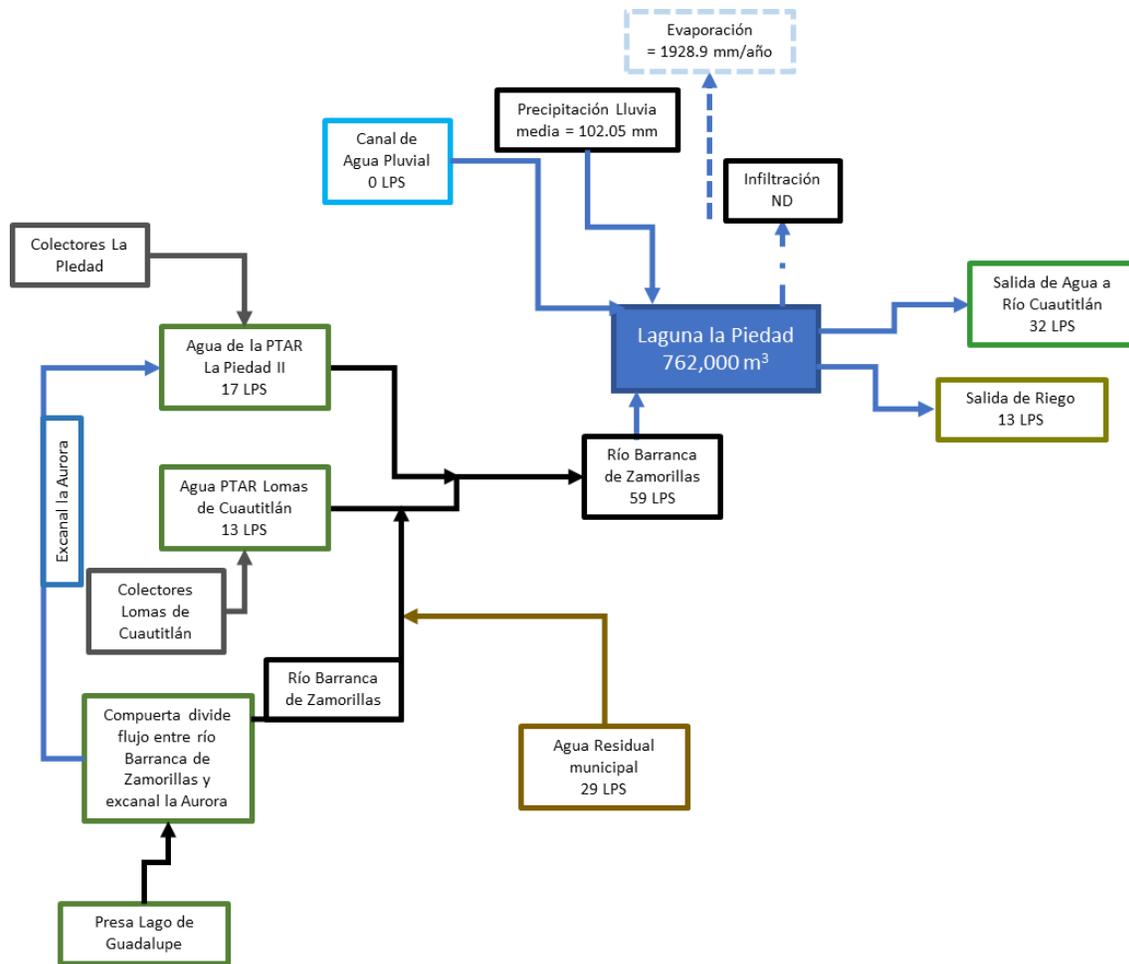


Figura 31. Flujo Hídrico de la Laguna la Piedad durante la temporada de estiaje (datos promedio).

En la Figura 32, se ilustra la información sobre el balance hídrico de la Laguna la Piedad, en el Estado de México, en temporada de Estiaje durante el periodo de apertura de la compuerta de la presa Lago de Guadalupe, según datos propios generados en sitio el 23 de marzo del año 2020.

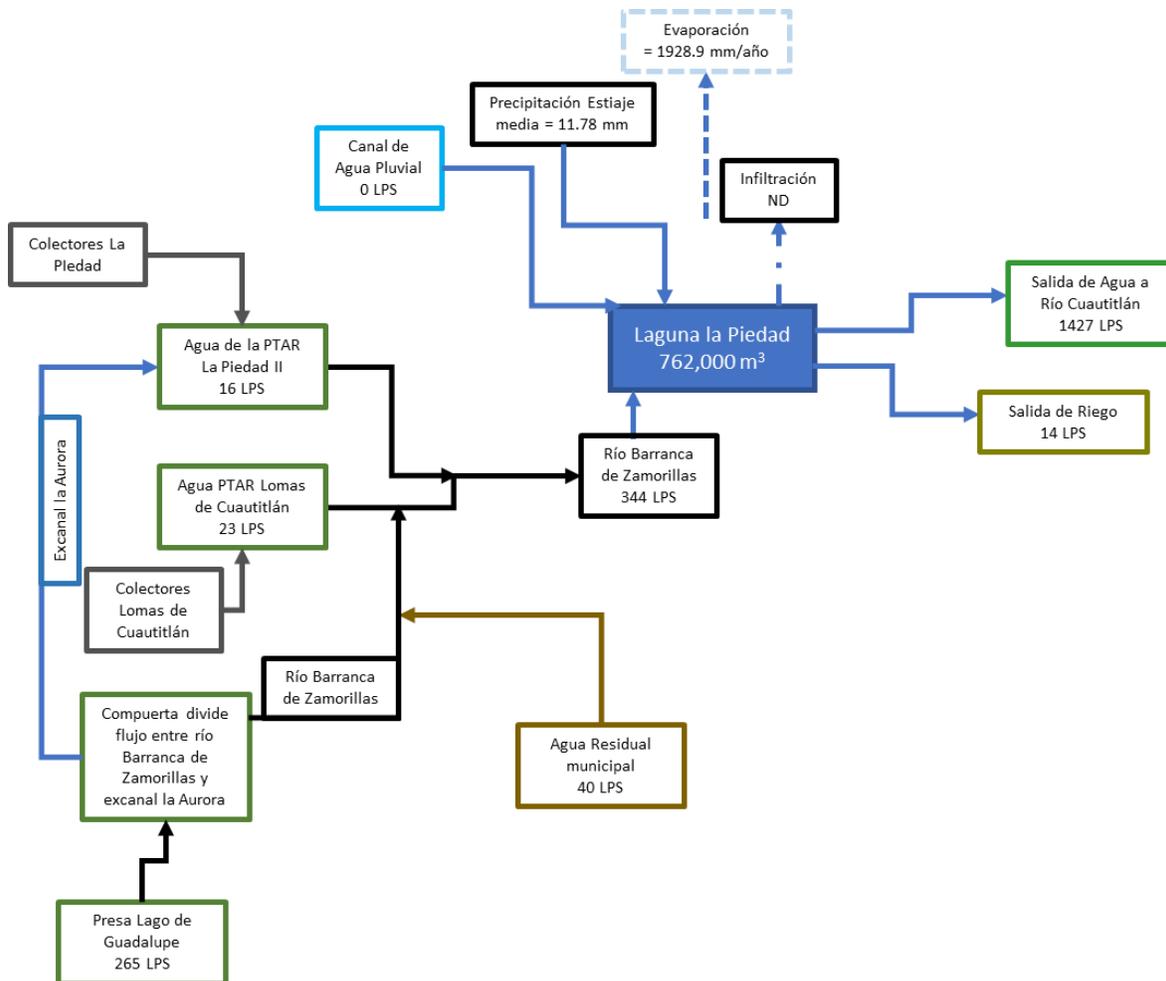


Figura 32. Balance hídrico de la Laguna la Piedad, en el Estado de México, en temporada de Estiaje con apertura de la compuerta de la Presa Lago de Guadalupe (Elaborado con datos propios).

En la Figura 33, se ilustra la información sobre el balance hídrico de la Laguna la Piedad, en el Estado de México, en temporada de lluvias. En la salida a los canales de riego, no se encontró agua saliendo por su compuerta.

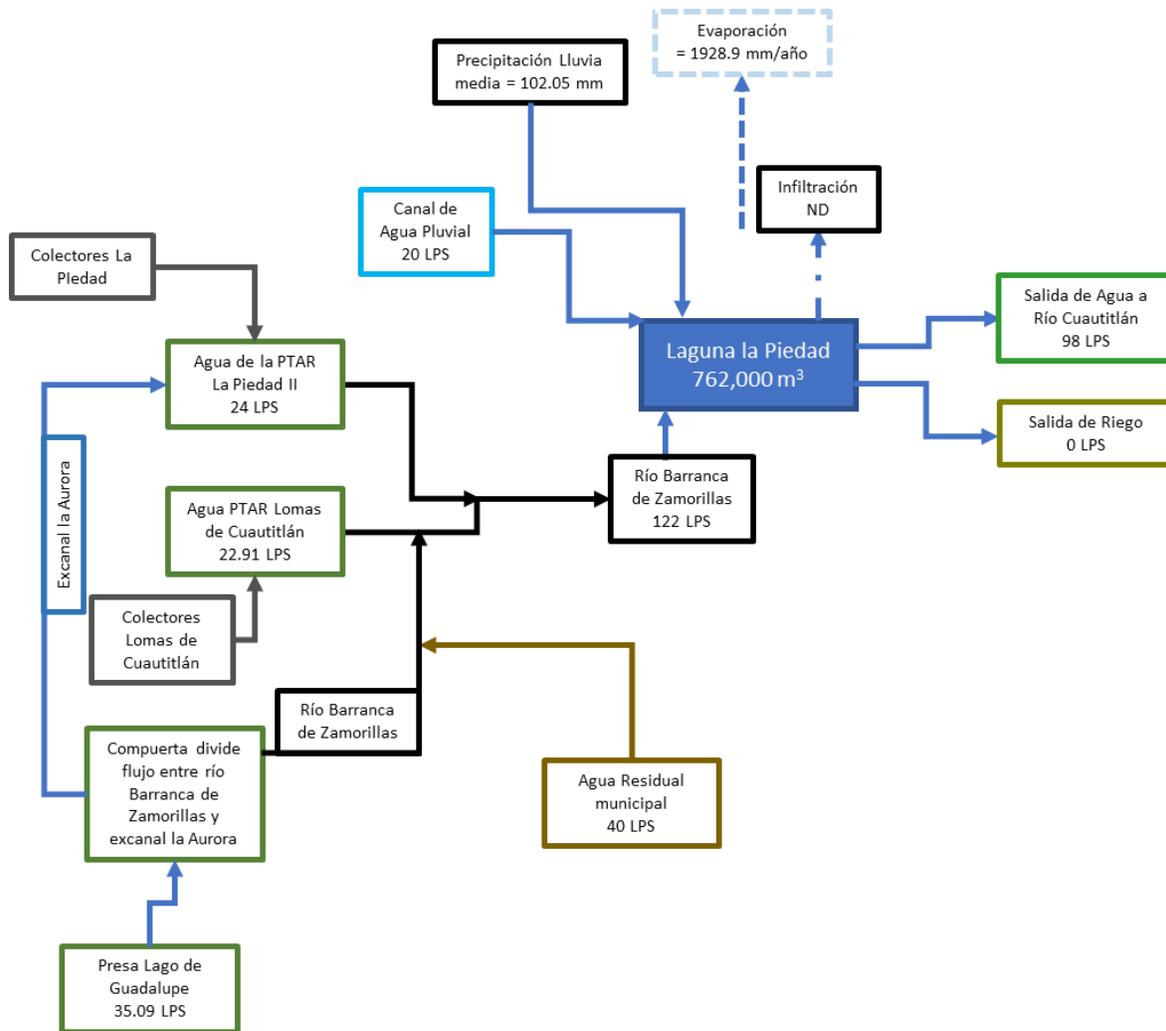


Figura 33. Balance hídrico de la Laguna la Piedad, en el Estado de México, en temporada de Lluvia<sup>23</sup> (Elaborado con datos propios).

Según los datos proporcionados por la CAEM al Consejo de Cuencas de Aguas del Valle de México y encargada de dar seguimiento al rescate de la laguna; indica que como resultado de su propio recorrido y estimando que a la Laguna la Piedad, se están vertiendo aguas residuales sin tratamiento de una población de 4,000 hab. y a que las fuentes principales de abastecimiento de esta población se deben a pipas que surten el agua, por lo que no podría calcularse el  $Q_{med}$  empleando las tomas o medidores.

Ahora bien, para una población de 4,000 habitantes, si cada habitante recibiera 184 L/hab/día, descargaría aproximadamente el 70% en volumen de agua residual que equivale a 128.8 L/hab/día. Por lo que se espera un  $Q_{med}$  de 5.96 LPS, este volumen se encuentra dentro de los caudales medidos

<sup>23</sup> López Lázaro (2022). *Evaluación de Factibilidad Técnica Económica y Ambiental de Incorporar un Humedal Artificial para el Saneamiento de Laguna la Piedad Estado de México*, Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. En proceso de revisión.

en campo, aunque este número está en congruencia con los propuestos por la CONAGUA (CONAGUA MAPAS 4, 2015).

Este  $Q_{med}$ , puede ser menor dado que por las encuestas realizadas, se sabe que los vecinos reciben el agua por periodos de hasta dos o tres veces por semana en horario matutino, lo que hace que las personas tengan que reservar agua para los días en que no hay servicio. Sin embargo, este dato es relevante, toda vez que para recibir apoyos en “*paripasú*” o por pagos de derechos, el gobierno federal aportará recursos, siempre y cuando los volúmenes de tratamiento sean consistentes con el número de habitantes registrados, pues los recursos otorgados son para descargas de aguas residuales de tipo municipal.

Según los datos que se conocen y los generados expedido, el caudal máximo que entra a la Laguna la Piedad sin tratamiento es de hasta 357 LPS, incluyendo los escurrimientos naturales, este volumen máximo fue registrado durante la temporada de estiaje con apertura de compuerta de la presa Lago de Guadalupe que sucede durante los meses de marzo a junio.

Durante la temporada de estiaje, sin apertura de compuerta, se midieron hasta 72 LPS. La medición de caudal durante la temporada de lluvia podría ser de hasta 350 LPS, volumen similar al dato registrado durante la temporada de estiaje con apertura de compuerta, es importante indicar que: Aun cuando estaba en el programa original tomar mediciones de caudal en temporada de lluvias, esto no fue posible dadas las condiciones de distanciamiento social debidas a la pandemia ocasionada por el virus SARs-CoV-2.

Se encontraron diversas descargas de aguas residuales, cuyas mediciones de caudal se vierten en la Tabla 14, indicando la ubicación y el caudal de flujo que se midió empleando el método de mediciones de caudales en canales, denominado método del flotador.

*Tabla 14. Aportaciones que llegan a la Laguna la Piedad, 25 de enero de 2020.*

Descarga	Coordenadas	Flujo LPS
Descarga Pluvial	19° 39' 46.22" N 99° 14' 09.68" O	0
Descarga PTAR La Piedad II	19° 39' 42.86" N 99° 14' 33.15" O	14.56
Descarga PTAR Lomas de Cuautitlán	19° 39' 32.46" N 99° 14' 46.16" O	6.49
Descarga Porqueriza	19° 39' 20.79" N 99° 14' 51.72" O	No se puede medir por cuestiones topográficas
Descarga Glorieta	19°39'17.17"N 99°14'53.47"O	12.34.
Río Barranca de Zamorillas	19°39'16.34"N 99°14'53.33"O	38.5
TOTAL: Entrada de las descargas a la Laguna La Piedad	19°39'47.15"N 99°14'10.33"O	71.89

Esto se puede esquematizar en la Figura 34.

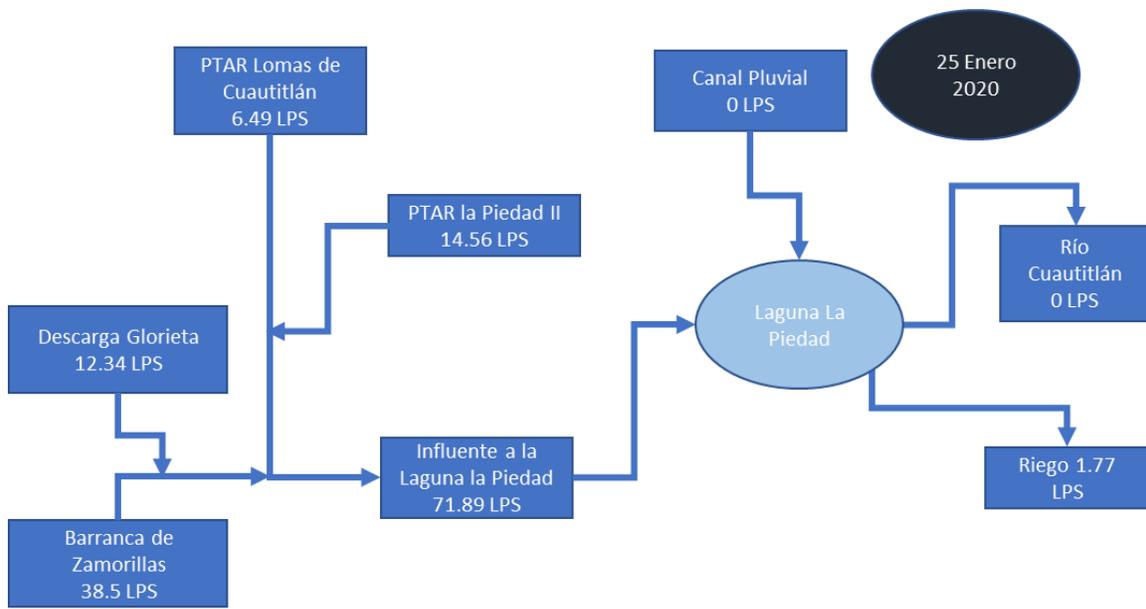


Figura 34. Medidas de caudal en sitio. 25 de enero de 2020.

La variabilidad en el caudal medido el 25 de enero de 2020, de las cuatro aportaciones que suman 71.89 LPS, contra los 71.61 LPS que se midieron a la entrada de la Laguna, pueden deberse a errores en el método de medición, que no es tan preciso por la irregularidad de los cauces, así como al error humano en la medición de los tiempos de desplazamiento del flotador, la hora de la toma de las muestras e incluso al factor de corrección aplicado.

Es debido a todos los datos de caudales medidos a la entrada de la laguna, así como su comportamiento, que se puede determinar que el caudal de flujo de entrada de agua residual sin tratamiento a la Laguna puede considerarse en 60 LPS que es el caudal que llega a la laguna en temporada de estiaje.

Si consideramos que es necesario que se cuente con sistemas de drenaje y alcantarillado que capte el agua residual de la zona y que este caudal sea conducido a una Planta de tratamiento, se concluye que este volumen de 60 LPS que actualmente se está captando en los canales de riego y a través del río Barranca de Zamorillas, corresponde al caudal de agua residual municipal que sin tratamiento esta hoy llegando a la laguna, los otros volúmenes intermitentes, corresponden a la temporada de lluvias y a la apertura de la compuerta de la presa Lago de Guadalupe.

### 5.3. Selección de los sitios para la toma de muestras de calidad del agua.

Se seleccionaron diferentes sitios para determinar la calidad del agua que entra en la Laguna la Piedad y se llevaron a cabo diferentes muestreos de tipo simple. El área de la laguna se considera como un sitio peligroso, por lo que no fue posible permanecer en el lugar por más de 24h para llevar a cabo una muestra compuesta, sin embargo, para fines de la propuesta conceptual de una estrategia que mejore la calidad del agua que llega a la Laguna la Piedad y del propio cuerpo de agua en sí, se considera suficiente esta información dado que durante el recorrido por la zona de influencia de las aportaciones que actualmente entran a la Laguna la Piedad, se pudo observar que

las aguas residuales que entran a dicha laguna por el río denominado Barranca de Zamorillas, son de tipo residual municipal.

Se planeó un programa de muestreos anual, que pudiera arrojar datos del comportamiento de la Laguna a lo largo del tiempo, sin embargo, no fue posible cumplir con este, pues en el año 2020, fue necesario suspender diversas actividades por causa de las medidas sanitarias implementadas por la Secretaria de Salud para la prevención del COVID-19 ocasionado por el virus SARs-CoV-2, por lo que no se contó con la infraestructura necesaria para llevar a cabo los análisis de las muestras. Es por lo anterior que únicamente se llevaron a cabo 2 muestreos de los 12 programados. Uno el 21 de febrero y otro el 23 de marzo del año 2020.

Los sitios propuestos en que se realizaron los muestreos simples que permitieron arrojar datos para el diseño de un sistema que favorezca el mejoramiento y aprovechamiento del agua en la Laguna La Piedad, Municipio de Cuautitlán Izcalli, en el Estado de México y también, para conocer la calidad del agua que está saliendo de la Laguna la Piedad.

En la Figura 35 se ilustra la ubicación de los sitios de muestreo.

*Tabla 15. Coordenadas de localización de los sitios propuestos.*

	Nombre del Sitio	Coordenadas	
		Latitud	Longitud
<b>Sitio 1</b>	Entrada a la Laguna	19°39' 47.15" N	99°14' 10.26"O
<b>Sitio 2</b>	Entrada Pluvial	19°39' 47.32" N	99°14' 09.08"O
<b>Sitio 3</b>	Salida al río Cuautitlán	19°39' 41.95" N	99°13' 47.15"O
<b>Sitio 4</b>	Salida a Riego	19°39' 31.24" N	99°13' 51.62"O
<b>Sitio 5</b>	Efluente de la PTAR La Piedad II	19°39' 43.13" N	99°14' 34.80" O
<b>Sitio 6</b>	Efluente de la PTAR Lomas de Cuautitlán	19°39' 31.73" N	99°14' 48.11" O
<b>Sitio 7</b>	Descarga Porqueriza	19° 39' 20.79" N	99°14' 51.72" O



Figura 35. Ubicación de los Sitios de Muestreo. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020.

El programa de muestreos se basa en un plan de monitoreo de recolección de muestras simples representativas del periodo de lluvia y estiaje, para poder determinar el flujo de agua y la calidad del agua que podría pasar a través del tiempo.

Los muestreos, se proponen de tipo simple, por lo siguiente:

La Zona es riesgosa en cuanto a seguridad, por lo que sería peligroso llevar a cabo muestreos compuestos que requieren la recolección de muestras por un periodo de al menos 24 horas, es por esto que en cada visita se contó con un actor social que acompañó durante la realización de estas actividades.

No se cuenta con un lugar seguro para poder permanecer en el área por periodos prolongados, por lo que durante cada visita se llevaron a cabo las mediciones de flujo de caudal de los sitios y una sola muestra puntual representativa de cada uno de los periodos de estiaje y lluvias.

Tabla 16. Programa de muestreos propuesto.

No.	Fecha de Muestreo	Periodo
1	21-feb-20	Estiaje
2	6-mar-20	Estiaje
3	23-mar-20	Estiaje
4	27-mar-20	Estiaje
5	17-abr-20	Estiaje
6	24-abr-20	Estiaje
7	22-may-20	Lluvias
8	01-jun-20	Lluvias
9	08-jun-20	Lluvias
10	15-jun-20	Lluvias
11	22-jun-20	Lluvias
12	29-jun-20	Lluvias

Las muestras fueron recolectadas en frascos de cristal y se preservaron para su traslado a 4 °C. Los datos de geolocalización de los sitios, la medición de Oxígeno Disuelto, temperatura y pH se obtuvieron empleando un equipo portátil HANNA Mod. No. HI9829.

Se tenía previsto analizar las muestras en el laboratorio de microbiología experimental, así como los análisis de COT y NT con apoyo del Laboratorio Universitario de Nanotecnología Ambiental del Instituto de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la Universidad Nacional Autónoma de México, elaborados por el M. en C. Mario Rodríguez Varela, sin embargo el jueves 26 de marzo del año 2020, la UNAM cerró sus puertas por la contingencia internacional ocasionada por la pandemia del virus SARS-CoV-2, razón por la que se suspendieron los muestreos y mediciones de caudales el 23 de marzo del año 2020 y las últimas muestras recolectadas se analizaron en un laboratorio privado con certificación EMA. Así que se contó con un número limitado de muestras que corresponden a la temporada de estiaje y a la temporada de estiaje con apertura de compuerta de la Presa Lago de Guadalupe. Con los datos recopilados y los existentes, se puede determinar que el agua que llega a la Laguna la Piedad tiene un grado de contaminación consistente con agua residual de tipo municipal.

Los datos representativos de contaminación del agua de la Laguna la Piedad, obtenidos a partir de los muestreos realizados el 21 de febrero del 2020 en la Tabla 17 y el 23 de marzo del año 2020 en la Tabla 18

Los análisis de calidad del agua de las muestras recolectadas 21 de febrero del año 2020, se realizaron en el Laboratorio de Microbiología Experimental de la Facultad de Química de la UNAM Pueden consultarse los datos generados en la Tabla 17. Los de NT y COT, con ayuda del Laboratorio Universitario de Nanotecnología Ambiental del Instituto de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UNAM, sin embargo, debido a las medidas implementadas que obligaron al cierre de las escuelas durante el confinamiento por la pandemia de SARs-CoV-2, se perdieron estas muestras.

Tabla 17. Resultados de los muestreos realizados el 21 de febrero del año 2020.

Parámetro	Sitio 1. Entrada de agua a la Laguna	Sitio 2. Entrada de agua Pluvial a la Laguna	Sitio 3. Salida de agua de la Laguna hacia el río Cuautitlán	Sitio 4. Salida de Agua de la Laguna hacia riego	Sitio 5. Descarga PTAR La Piedad II	Sitio 6. Descarga PTAR Lomas de Cuautitlán	Sitio 7. Descarga Porqueriza	LMP NOM- 001- SEMARNAT -1996
Hora, H	12:05:00	11:26:00	Al momento de llevar a cabo el recorrido y toma de muestras en la zona, no se presentó flujo de agua a la salida la Laguna por lo cual la muestra no se pudo obtener.	10:26:00	13:25:00	13:50:00	13:02:00	
Temperatura °C	17.87	19.87		17.26	19.71	21.26	19.67	40
pH	7.15	6.28		8.20	6.83	7.13	7.24	5 a 10
SDT Sólidos Totales Disueltos, ppm	5.73	349		362	651	562	522	75
Latitud, N	19°39'47.15"	19°39'47.32"	19°39'41.95"	19°39'31.24"	19°39'43.13"	19°39'31.73"	19°39'20.79"	
Longitud, O	99°14'10.26"	99°14'9.08"	99°13'47.15"	99°13'51.62"	99°14'34.80"	99°14'48.11"	99°14'51.72"	
N-NH4, mg/L colorimétrico	86	28		18	132	58	58	
Fosfatos, mg/L	63.38	11.66	0.00	15.92	66.41	36.66	66.66	

Enmarcados en rojo los parámetros que se encuentran fuera de los LMP.

La ubicación de los sitios de muestreos efectuados el día 21 de febrero del año 2020, se ilustran en la Figura 36.



Figura 36. Ubicación de los sitios de muestreo de fecha 21 de febrero del 2020. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020.

Los análisis de calidad del agua de las muestras recolectadas el 23 de marzo del año 2020, se realizaron en el laboratorio IDECA, S.A. de C.V. (Investigación y Desarrollo de Estudios de Calidad del Agua, S.A. de C.V.), que cuenta con la acreditación EMA: AG-010-154/12 y aprobación de CONAGUA CNA-CGA-1968, vigentes al momento de llevar a cabo los análisis. En la Tabla 18, se vierten los datos de calidad del agua obtenidos.

Tabla 18. Resultados de los muestreos realizados el 23 de marzo de 2020.

Parámetro	Sitio 1. Entrada de agua a la Laguna	Sitio 2. Laguna la Piedad	Sitio 3. Salida de agua de la Laguna hacia el río Cuautitlán	Sitio 4. Salida de Agua de la Laguna hacia riego	Sitio 5. Descarga PTAR La Piedad II	Sitio 6. Descarga PTAR Lomas de Cuautitlán	Sitio 7. Descarga Porqueriza	LMP NOM- 001- SEMARNAT- 1996
Hora, H	12:41:08	10:38:02	11:38:57	10:06:25	13:47:51	13:27:41	13:16:21	No aplica
Temperatura °C	19.48	20.48	20.78	19.74	21.22	22.96	19.41	40
pH	6.63	6.09	7.03	6.65	6.56	6.67	6.31	5 a 10
SDT Sólidos Totales Disueltos, ppm	234	248	252	252	755	776	218	75
Latitud, N	19°39'47.15"	19°39'33.9"	19°39'41.95"	19°39'31.24"	19°39'43.13"	19°39'31.73"	19° 39'20.79"	No aplica
Longitud, O	99°14'10.26"	99°14'00.5"	99°13'47.15"	99°13'51.62"	99°14'34.80"	99°14'48.11"	99° 14' 51. 72"	No aplica
SST, mg/L	<b>90</b>	<b>54</b>	<b>58</b>	<b>68</b>	<b>145</b>	<b>195</b>	<b>186</b>	20
SS, mg/L	0.4	<0.1	<0.1	0.1	< 0.1	<0.1	0.5	1
Coliformes Totales, NMP/100mL	≥ 24x10 <sup>3</sup>	≥ 24x10 <sup>3</sup>	≥ 24x10 <sup>3</sup>	≥ 24x10 <sup>3</sup>	≥ 24x10 <sup>3</sup>	≥ 24x10 <sup>3</sup>	≥ 24x10 <sup>3</sup>	No aplica
Coliformes Fecales, NMP/100mL	<b>≥ 2.4x10<sup>4</sup></b>	<b>≥ 2.4x10<sup>4</sup></b>	<b>≥ 2.4x10<sup>4</sup></b>	<b>≥ 2.4x10<sup>4</sup></b>	<b>≥ 2.4x10<sup>4</sup></b>	<b>≥ 2.4x10<sup>4</sup></b>	<b>≥ 2.4x10<sup>4</sup></b>	240
Nitratos N- NO <sub>3</sub> , mg/L	< 0.020	0.021	< 0.020	0.040	< 0.020	0.031	< 0.020	
Nitritos N- NO <sub>2</sub> , mg/L	< 0.020	< 0.020	< 0.020	< 0.020	< 0.020	< 0.020	< 0.020	
N-NT, mg/L	<b>63.574</b>	<b>63.131</b>	<b>59.406</b>	<b>67.507</b>	<b>87.701</b>	<b>63.49</b>	<b>60.643</b>	40
DBO <sub>5</sub> , mg/L	<b>89.00</b>	<b>40.00</b>	<b>51.00</b>	<b>38.00</b>	<b>1554.00</b>	<b>1609.00</b>	<b>87.00</b>	20
Grasas y Aceites, mg/L	<b>24</b>	9.1	<b>15.8</b>	12.4	<b>82.1</b>	<b>90</b>	<b>26.4</b>	15
Fosforo Total, mg/L	6.108	11.46	9.347	9.58	8.135	9.603	6.952	20
DQO, mg/L	<b>159.00</b>	<b>179.00</b>	125.00	<b>149.00</b>	<b>3965.00</b>	<b>3475.00</b>	<b>150.00</b>	No aplica

Enmarcados en rojo los parámetros que se encuentran fuera de los LMP.

Durante la recolección de muestras el día 23 de marzo del 2020, se intercambié el Sitio 2, denominado Entrada de Agua Pluvial, por un sitio nuevo en la Laguna la Piedad, del que se obtuvo una muestra 10 metros aguas adentro, desde la orilla de la zona sur de la Laguna, se ilustran en la Figura 37, debido a que la descarga de agua pluvial presentaba una medición en su caudal de 0 LPS al momento de hacer el muestreo, además de que un vecino se encontraba realizando la obra civil de una casa, por lo que estaban extrayendo agua de la Laguna en ese punto, y no se cuenta con ningún servicio de suministro de agua o alcantarillado en esa zona. Se consideró oportuno e importante tener algún dato de la calidad del agua dentro del vaso de la Laguna la Piedad,

encontrándose que la misma se encontraba contaminada con parámetros fuera de NOM en SDT, CT y NT. Y según la Tabla 8, se puede indicar que hay una contaminación débil para los parámetros SDT y CT y de media a fuerte en NT, según Metcalf y Eddy (2001).



Figura 37. Ubicación de los sitios de muestreo del 23 de marzo de 2020. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020.

En rojo se señalan los parámetros que se encontraron fuera de los LMP indicados en las NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997, por lo que se puede determinar que se trata de un agua contaminada, según los datos vertidos en la Tabla 8 que representa la composición típica de aguas residuales crudas (Rodríguez-Miranda *et al.*, 2015).

La ubicación de los sitios considera los análisis de calidad del agua en los puntos de contaminación que indican el total del agua que está entrando en la Laguna la Piedad, aunque la aportación del canal de agua pluvial en temporada de estiaje es prácticamente nula.

Por causa de que no fue posible muestrear en temporada de lluvias, no se observó valor en la medición del caudal durante la campaña de muestreo, con objeto de conocer el comportamiento de la calidad del agua con la esperada dilución causada por la precipitación pluvial, así como verificar que el canal se mantenga libre de descargas de aguas residuales, los vecinos de la Zona en diversas ocasiones, han presentado escritos a OPERAGUA (de fechas 27 de septiembre de 2019, 27 de

Febrero de 2020, y 11 de septiembre de 2020, contenidos en los Anexos de este trabajo), solicitando no descargar aguas residuales en el canal de aguas pluviales. Mientras este canal de aguas pluviales se mantenga sin descargas de aguas residuales, se puede considerar que el agua es apta para descargar a la Laguna la Piedad.

Analizando los datos obtenidos y los existentes, se puede determinar que el agua que entra a la Laguna la Piedad se encuentra contaminada, dentro de los parámetros considerados como concentración media en la Tabla 8. Por lo que es necesario crear medidas y acciones que puedan recuperar el cuerpo de agua que al día de hoy se encuentra contaminado y en peligro de desaparecer.

#### **5.4. Evolución y estado actual de la Laguna la Piedad y propuestas de mejoramiento y aprovechamiento del agua, resultante del cuestionario aplicado a pobladores.**

Se elaboró un cuestionario que puede consultarse en el Anexo 9.3 con apoyo de la antropóloga Angélica Dorantes, colaboradora del Grupo Académico Interdisciplinario Ambiental (GAIA)-UNAM. La aplicación del mismo se efectuó a los habitantes cercanos a la Laguna la Piedad, vía remota, lo anterior debido a la imposibilidad de hacerlo en persona por causa de la pandemia causada por el virus del SARS-CoV-2.

Se logró la obtención de seis cuestionarios, a partir de los datos proporcionados fue posible ilustrar el estado de la Laguna antes de la influencia ocasionada por los asentamientos urbanos, los cuales se han desarrollado de manera creciente y han vertido sus aguas sin tratamiento por un periodo prolongado de tiempo, estimado en más de 20 años según la información recabada. La aplicación de este cuestionario permite conocer las propuestas de mejoramiento y aprovechamiento del cuerpo de agua, desde la perspectiva de los pobladores.

Las personas encuestadas, con más de 60 años de edad, indicaron que antes del año 2000, era posible pescar carpas, carpa huachinanga y mojarra en la Laguna la Piedad y que esta pesca se realizaba principalmente en semana santa, donde sacaban varios kilos de estos peces y los repartían entre las personas de los ejidos, pobladores y personas que estaban en los alrededores. Comentan que la contaminación de la Laguna se debe principalmente a las aguas residuales que se vierten sin tratamiento por los canales a cielo abierto, que se utilizan para riego, así como por el río Barranca de Zamorillas, la que se incrementó a partir de la construcción de diferentes fraccionamientos que incluso construyeron la PTAR Lomas de Cuautitlán y PTAR La Piedad II, que actualmente se encuentran sin operar.

Los vecinos refieren además diferentes fuentes de contaminación puntuales e intermitentes a la Laguna la Piedad como son:

1. Un basurero de desperdicios industriales a un costado de la laguna, cuyos lixiviados posiblemente alcanzaban la laguna, aunque éste ya no existe pues aparentemente era clandestino y se logró clausurar con la acción de los propios pobladores.

2. Los pobladores indican que el área era principalmente de riego para las parcelas de los ejidos de Huilango, la Piedad y Tepojaco, hasta que se autorizó por parte del municipio el permiso para el fraccionamiento Lomas de Cuautitlán de descargar las aguas residuales a la Laguna la Piedad, lo que, a decir de los encuestados, terminó con la pesca en la Laguna y la muerte de otra fauna, además de que dejó de ser agua viable para el riego de algunas parcelas.
3. Clandestinamente entre el año 2001 ó 2002, se lavaron pipas de amoníaco (compuestos químicos), lo que provocó la muerte de los peces, que presuntamente aparecieron flotando o al abrir las compuertas para el riego, salían las carpas muertas, por lo que en 2003 dejó de haber pesca en la zona.

Principales efectos negativos mencionados por los encuestados:

1. Cambió la vegetación por objeto de la contaminación del agua, por lo que ya no es posible obtener plantas comestibles del lugar como lo son: quelites, malvas, huazontles, entre otros mencionados.
2. Dejó de ser factible la pesca, pues actualmente no hay peces en el cuerpo de agua.
3. Pérdida de un lugar de esparcimiento.
4. Aun cuando siguen llegando los patos cada año, dejaron de llegar los pelícanos, entre otras aves migratorias.

Adicionalmente, se enlistan las propuestas resultantes de estas entrevistas con las personas de la localidad:

- Construir un Centro Recreativo, área verde de esparcimiento, con asadores, palapas y lugares para descansar con la familia.
- Construir un Corredor turístico que permita la pesca y la convivencia con zona de restaurantes o puestos de comida.
- Construir una ciclovía.
- Rehabilitar un área natural que permita la relajación, cerca de la ciudad.

## 5.5. Discusión de los Resultados y planteamiento del Escenario 0.

Desde hace más de 20 años ininterrumpidos, la Laguna la Piedad ha sido contaminada por el vertido constante que ha recibido de agua residual de las colonias que se encuentran aguas arriba y que vierten sus aguas contaminadas a los cauces que alimentan el cuerpo de agua. De un agua que antes se usaba como de riego, en la que era posible la pesca y la recreación de los habitantes cercanos, hoy en día se puede observar que, empleándose los canales de riego y los cauces naturales para conducir las aguas negras sin tratamiento directo al cuerpo de agua, se hace evidente el daño que el tiempo y el constante vertido de esas aguas residuales sin tratamiento pueden generar en este tipo de cuerpos de agua. Esta situación eventualmente puede resultar en la pérdida de este cuerpo de agua por eutrofización, muerte de la flora y fauna propia del sitio y su azolve. Lo anterior contribuye a disminuir significativamente la capacidad de almacenamiento, además de aportar

gases de efecto invernadero que propician el calentamiento global, así como la pérdida de calidad del cuerpo de agua.

Como se ha mencionado, los canales de riego, los ríos y arroyos naturales, se han utilizado para la descarga de las aguas residuales sin que se haya encontrado alguna propuesta o proyecto que esté considerando la separación de las descargas de aguas residuales para ser conducidos a través de colectores para su correcta conducción hacia alguna de las PTAR existentes o la construcción de alguna PTAR nueva, por lo que, aun cuando no es objeto de esta tesis la conducción de las aguas residuales al cuerpo lagunar de estudio, es necesario resaltarlo, dado que esto por sí mismo supone un problema de salud, pérdida de espacios de esparcimiento, pesca y aprovechamientos que no se pueden hacer de esa agua como para recreación, cultivos de mayor calidad y usos humanos.

En el área de la Laguna la Piedad, se cuenta con 3 PTAR que no operan, dos de ellas se localizan aguas arriba de la laguna y descargan por canales de riego hasta el río Barranca de Zamorillas en la confluencia del agua que baja desde el Excanal la Aurora y hasta el sitio denominado Acueducto, desde donde pueden ser derivados hasta 40 LPS para Riego. La PTAR La Piedad II recibe las aguas residuales de la Colonia la Piedad y la descarga sin tratamiento en el Excanal la Aurora, en un caudal medido de hasta 18 LPS. La PTAR Lomas de Cuautitlán recibe parte de las aguas de la zona poniente de las colonias la Piedad I y la Herradura a través de un sistema de colectores del que no se encontró el trazo, que son descargadas sin tratamiento hacia los canales de riego, en dicho canal de riego baja también la aportación proveniente de la PTAR la Piedad II cuyas aguas sin tratamiento, también son descargadas por otros canales de riego hasta la zona del Acueducto desde donde pueden ser derivadas para riego y/o incorporarse a la Laguna la Piedad a través del río Barranca de Zamorillas, lo que se ilustra en la Figura 38. No se cuenta con información sobre los sistemas de colectores y drenaje existentes en esas colonias.

En las visitas se pudo constatar que existen más descargas a lo largo del río Barranca de Zamorillas, agua arriba del sitio del Acueducto y de las descargas de las PTAR Lomas de Cuautitlán y la Piedad II, que son conducidas principalmente a cielo abierto o bien por simples tuberías de PVC que descargan las aguas residuales de las colonias y de los domicilios particulares de forma directa, domicilios que invaden las zonas federales del río que no permiten el acceso al recorrido por las márgenes del cauce, lo que imposibilita a determinar el número de descargas, la calidad del agua y el volumen de las mismas.

La tercera planta de tratamiento, es la denominada PTAR Lago de Guadalupe, esta PTAR no ha sido puesta en operación pues no cuenta con los sistemas de colectores que conduzca algún agua residual de la zona hacia ella, está ubicada en el cauce del río Cuautitlán, aguas arriba de la descarga de agua que es conducida desde el vertedor de la Laguna la Piedad hacia ese río Cuautitlán, esta propiamente no está localizada dentro de los niveles topográficos que permitan una conducción del agua tratada desde esa PTAR hacia el punto más cercano a la Laguna de la Piedad, lo que supondría primero vencer una carga hidráulica de 7 metros y segundo crear otro punto de descarga de agua tratada a la Laguna, posiblemente en la zona sur, considerando que muchas de las PTAR dejan de operar por falta de recursos, y que infraestructura adicional para retornar el agua a la laguna, implica mayor gasto de operación, se corre el riesgo de que se elija descargar el agua tratada al río Cuautitlán, desviando agua que originalmente en su trayectoria llegaría a la Laguna, lo que

perturbaría el volumen de agua que entra a la misma, afectando así su equilibrio hidráulico Figura 39.

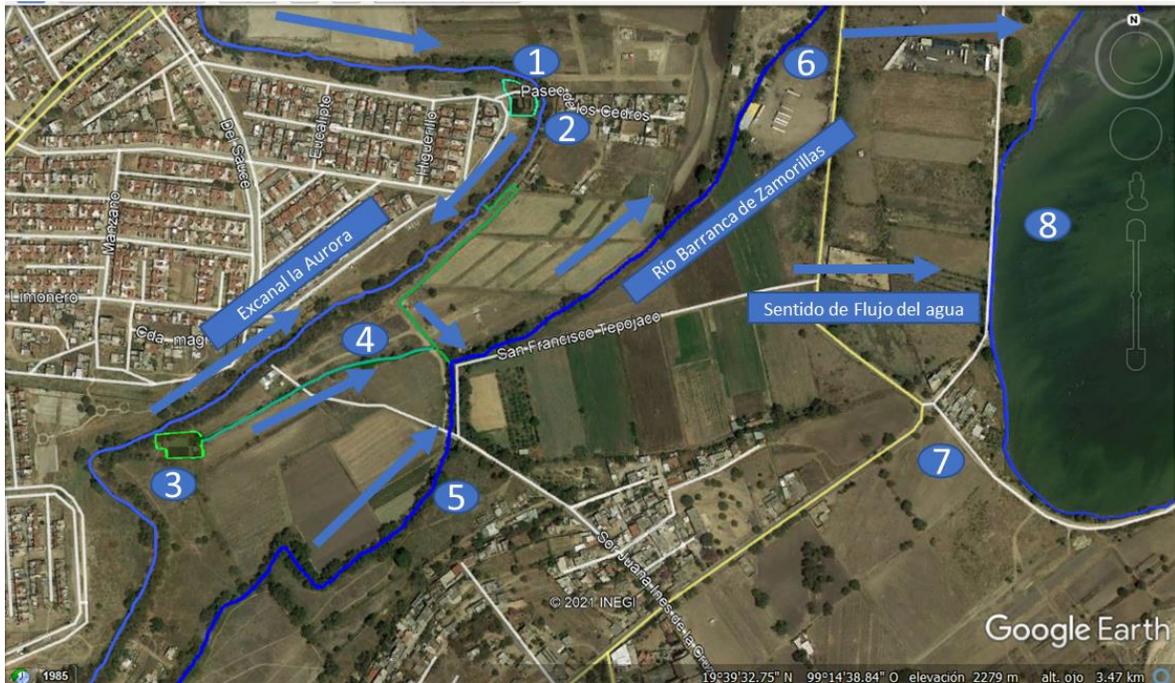


Figura 38. Planteamiento del Escenario 0. Descargas sin tratamiento desde las PTAR La Piedad II y Lomas de Cuautitlán hacia la Laguna la Piedad. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020.

A continuación, se explican los numerales ilustrados en la Figura 38 del escenario 0 y consta de los siguientes elementos:

1. PTAR La Piedad II capacidad de operación de 18 LPS, estado actual: sin operar.
2. Descarga de las aguas provenientes de la PTAR La Piedad II, vertidas sin tratamiento a la parte alta del Excanal la Aurora.
3. PTAR Lomas de Cuautitlán capacidad de operación de 55LPS, estado actual: desmantelada.
4. Descarga de las aguas provenientes de la PTAR Lomas de Cuautitlán, vertidas sin tratamiento al canal de aportación del Excanal la Aurora al río Barranca de Zamorillas. En tiempos de estiaje, parte de esta agua se desvía por un acueducto para riego.
5. Río Barranca de Zamorillas antes de la confluencia con el Excanal la Aurora, que recibe diversas descargas de las colonias que se encuentran aguas arriba.
6. Río Barranca de Zamorillas con todas las aportaciones de aguas residuales sin tratamiento que llegan a la Laguna la Piedad, este reúne todas las captaciones que se vierten y se estiman en 59 LPS durante el periodo de estiaje, por lo que se asume que este volumen es en su mayoría el que corresponde a las aguas residuales vertidas sin tratamiento de forma constante a la Laguna la Piedad.
7. Descargas puntuales no verificadas de diversos puntos al sur de la Laguna la Piedad, estimadas en 0.094 LPS de aguas residuales sin tratamiento vertidas constantemente al cuerpo de agua.

8. Cuerpo de agua de aspecto pardo, con presencia de RSU visible en su superficie, sin que se aprecie vida en el agua (peces), con resultados de calidad del agua que indican su contaminación, por lo que cumple con las condiciones para decir que se encuentra en proceso de eutrofización y por lo tanto está disminuyendo su capacidad de almacenamiento por azolve resultante.

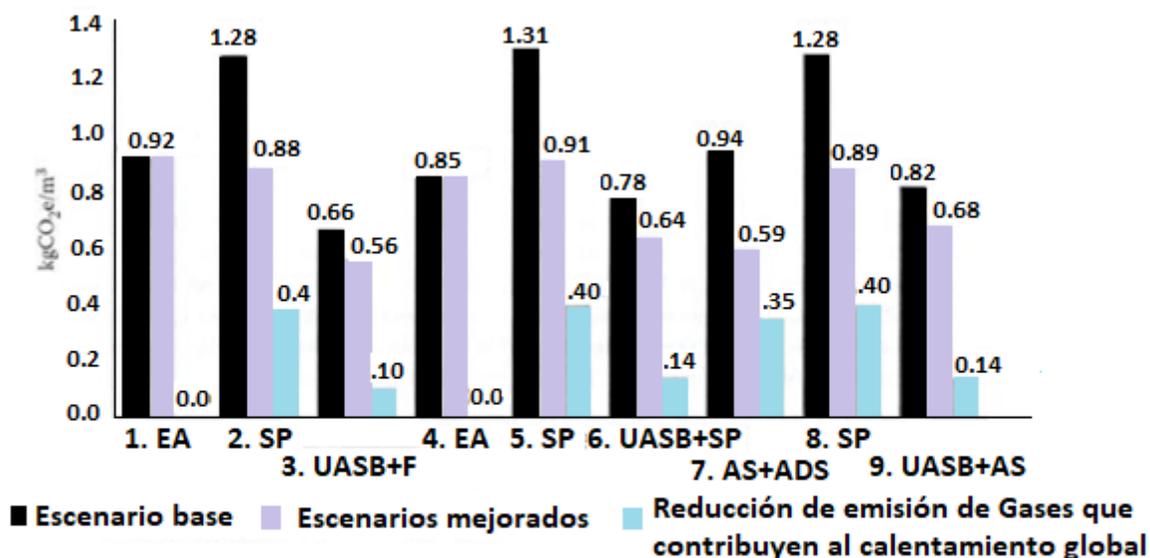


Figura 39. Elevaciones desde una descarga desde la PTAR Lago de Guadalupe y hacia la Laguna la Piedad. Fuente Google LLC, Google Earth Pro, 2020.

Es por estos factores de descargas puntuales y constantes que la Laguna, en su Escenario 0, se encuentra contaminada y es necesario plantear los diversos escenarios que puedan llegar a su mejoramiento y aprovechamiento del agua y entonces su eventual recuperación.

El cuerpo de agua de la Laguna la Piedad, actualmente se encuentra trabajando como una laguna de estabilización, pues logra mejorar la calidad del agua desde su punto de entrada y hasta la salida en el vertedor, desafortunadamente no se cuenta con estudios de batimetría para determinar el tiempo de residencia hidráulico, ni las diversas profundidades del agua que actualmente es de tipo residual en ese cuerpo lagunar, así como otros datos de calidad del agua en diversas partes y profundidades de la Laguna. El costo de no tratar el agua que entra a la laguna, además de que se reducen las posibilidades de aprovechamiento de ésta, se puede considerar como el más alto, incluso de lo que en dinero se pueda invertir en una alternativa de mejoramiento y aprovechamiento del agua, aunque éste no se pueda contabilizar económicamente, por lo que será necesario plantear un modelo para poder darle una ponderación, el costo se puede considerar en la huella de carbono, que es más elevado en un cuerpo de agua contaminado contra otros que no están contaminados.

La liberación de gases que contribuyen al calentamiento global y al fenómeno del cambio climático es un aspecto que ha tomado en fechas recientes gran importancia, las PTAR tendrán diferente impacto ambiental en esta materia, en función del tipo de proceso biológico involucrado (fuente directa) y del nivel de consumo de energía eléctrica proveniente de combustibles fósiles (fuente indirecta) (Noyola *et al.*, 2013). Estudios de la huella de carbono en las PTAR indica que el mayor volumen de emisiones de CO<sub>2</sub> de los trenes de tratamiento corresponde a las lagunas de estabilización y si se considera que la Laguna la Piedad se comporta como una, entonces se puede decir que el costo más elevado en este sentido es el de no tratar el agua de la Laguna la Piedad, lo que otorga la posibilidad de una ponderación para comparar el costo del escenario cero contra otras tecnologías.



(Escenarios 1, 2, 3, caudal 13 LPS; 4, 5, 6, caudal 70 LPS; 7, 8, 9, caudal 620 LPS).

kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>: kilogramos de dióxido de carbono emitidos por metro cúbico.

LPS: Litros por segundo.

EA: Lodos Activados con aireación extendida

SP: Lagunas de Estabilización.

UASB+F: Tratamientos anaerobios con postratamientos.

UASB+SP: Tratamientos anaerobios con sistemas de lagunas de estabilización.

AS+ADS: Lodos activados con sistema de distribución de aire a partir de biogás.

UASB+AS: Tratamientos anaerobios con lodos activados.

Figura 40. Huella de carbono (emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub>) de los trenes de tratamiento más representativos en México (Güereca L.P. *et al.*, 2015).

El comportamiento de las emisiones de tres tipos de PTAR en México, que incluye el escenario base (Negro) el escenario mejorado (lila) y el escenario de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (azul), en el que se comparan las tecnologías de los Lodos Activados con aireación extendida (EA), las Lagunas de estabilización (SP), seguido por producción de electricidad en la PTAR de lodos activados con sistema de distribución de aire a partir de biogás (AS+ADS) y los tratamientos anaerobios con postratamiento (UASB+F), siendo el escenario SP el de mayor aportación de CO<sub>2</sub> a

la atmósfera mientras que los UASB+F son el escenario que menos emisiones tiene a la atmósfera, según se indica en la Figura 40 (Guereca L.P. et al., 2015).

## **6. ESTRATEGIA PARA LA SELECCIÓN DE LA PROPUESTA CONCEPTUAL MÁS VIABLE DE MEJORAMIENTO Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA INTEGRAL DE LA LAGUNA LA PIEDAD.**

Para estar en condiciones de determinar una estrategia de una propuesta conceptual para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad, en Cuautitlán Izcalli, Estado de México, es necesario determinar la mejor opción, que sea viable de ser realizada en los rubros técnico, económico y ambiental. Una infraestructura que considere estos aspectos tendrá posibilidad de ser implementada y correría menor riesgo de ser una infraestructura construida, pero que finalmente podría terminar sin ser operada, como sucede en muchos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en nuestro país.

De no existir acciones para mitigar o prevenir estos daños, más cuerpos de agua en nuestro país se seguirán deteriorando, para dar lugar a sitios insalubres, donde no exista vida silvestre propia de ese ecosistema, o que resulte sumamente elevado el costo de su recuperación y acondicionamiento, para ser empleada con fines productivos. Adicionalmente, esos cuerpos acuáticos contaminados, generan gases de efecto invernadero y pueden llegar a eutrofizarse, con el consecuente detrimento en la calidad del agua que contienen en sus cuerpos. Es por lo anterior que resulta impostergable generar estrategias, que sean factibles de ser realizadas y operadas, en las que participe la comunidad y de ser posible, generen productos que puedan ser aprovechados para beneficio económico de los propios vecinos de la zona. Aunado a esto, sumar la posibilidad de recuperar estos espacios y convertirlos en sitios de esparcimiento, para esa zona y localidades aledañas.

### **6.1. Elaboración de una matriz de selección de tecnologías.**

Para determinar la mejor propuesta conceptual de una PTAR que contribuya al mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad, es necesario llevar a cabo la evaluación de diversos procesos convencionales, basados en la experiencia propia del país.

#### **6.1.1. Matriz de selección de tecnologías base.**

Como se mencionó anteriormente, los métodos de tratamiento más utilizados en las PTAR municipales en México son las lagunas de estabilización (30.3%), las cuales tienen el inconveniente de requerir grandes superficies de terreno para su construcción. En segundo lugar, están los sistemas de lodos activados (30.1%), cuya principal desventaja son los altos requerimientos de energía que se traducen en elevados costos de operación y mantenimiento, aunado a la producción de lodos secundarios que deben ser tratados antes de su disposición (CONAGUA, 2016). Ambos sistemas están diseñados para remover principalmente materia orgánica de tipo carbonoso y reducir el contenido de microorganismos de origen entérico, dejando concentraciones relativamente altas de nitrógeno y fósforo, lo cual propicia el fenómeno de eutrofización (Luna-Pabello *et al.*, 2014). Por otra parte, están los Humedales Artificiales (HA) que es una ecotecnología relativamente reciente y poco difundida, por lo que comparativamente existe un menor número de plantas de tratamiento de este tipo, además de que el porcentaje de agua que tratan es

significativamente más bajo. No obstante, este tipo de tecnología logra reducir la concentración de carbono, nitrógeno y fósforo, mediante los procesos de biotransformación y mineralización intrínsecos a su funcionamiento (Luna-Pabello *et al.*, 2014). Por lo anterior, es que se han elegido estas tecnologías para llevar a cabo la Matriz de selección de procesos base.

Los factores que se consideran para seleccionar el tipo de proceso o de tratamiento del agua residual son variados, entre ellos se consideran: la procedencia y características del agua residual, el caudal a tratar, el tipo de tecnología, los recursos financieros disponibles, la normatividad vigente en materia de descargas de aguas residuales, el porcentaje de eliminación de nutrientes, el tamaño y tipo de población que benefician, la disponibilidad de terreno, la topografía y el clima (Merino, 2017).

Para poder plantear la mejor estrategia para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad, es necesario presentar una comparativa de tecnologías que podrían emplearse, solas o en conjunto. Se llevó a cabo el análisis de los datos de la Tabla 19 que sugiere valores que van del 1 al 5. El valor de 1 para el que menos cumple la característica y 5 para el que cumple mejor (Luna-Pabello y Ramírez-Carrillo, 2009).

Las ponderaciones se otorgaron de conformidad con la propia experiencia en sistemas de tratamiento de tipo municipal, planteando la aplicación a la tecnología en la zona y como resultado del trabajo de investigación realizado para llevar a cabo este trabajo de tesis. Para la matriz presentada, se analizaron aspectos técnicos, económicos, ambientales y otros criterios adicionales.

Los resultados de la matriz de selección de tecnología base indican que la mayor ponderación y entonces la mejor tecnología para llevar a cabo el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna se encuentra entre un sistema de Lodos Activados y un Humedal Artificial, obteniendo la mejor ponderación el sistema del HA seguido de la PTAR LA.

Dentro de los criterios considerados para otorgar las ponderaciones, no está impactando el volumen tratado por superficie de tratamiento. En este sentido, comparativamente existe una gran diferencia, por unidad de superficie, entre la capacidad de tratamiento de una PTAR LA respecto de una PTAR HA. Por tal motivo, se llevó a cabo un nuevo análisis de los datos obtenidos con nuevas ponderaciones y consideraciones que se desarrollan en el apartado 6.2.2 de esta tesis. De esta forma, se pretende sentar las bases para el planteamiento de diversos escenarios sobre los que se puede elegir de manera más adecuada la estrategia de tipo conceptual que mejor coadyuve al mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna.

Tabla 19. Comparación técnica, económica y ambiental con diferentes sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales<sup>24</sup>.

Concepto	Biodiscos	Laguna de Oxidación	Lodos Activados	Humedal Artificial	Reactores Secuenciales Discontinuos (Bach)
<b>Evaluación Técnica</b>					
Capacidad del caudal a tratar	4.0	3.0	5.0	1.0	3.0
Incumplimiento de uno o más parámetros en el efluente	<b>Tóxicos, fósforo y nitrógeno.</b>				
	4.0	2.0	4.0	5.0	4.0
Tiempo de construcción	3 meses	3 meses	10 meses	4 meses	3 meses
	5.0	5.0	3.0	4.0	4.0
Requerimientos de reactivos químicos	<b>No</b>				
	5.0	4.0	4.0	5.0	4.0
Sencillos de la operación	<b>Menos complejo</b>				
	3.0	5.0	3.0	5.0	2.0
Requerimientos de Automatización	<b>Menos complejo</b>				
	3.0	4.0	3.0	5.0	1.0
Tiempo de Estabilización	3 meses	3 meses	1 mes	10 meses	1 mes
	4.0	<b>4.0</b>	3.0	5.0	3.0
Estabilidad del Sistema	Estabilidad	Estabilidad	Estabilidad	Estabilidad	Estabilidad
	2.0	<b>4.0</b>	3.0	5.0	3.0
Área requerida para la instalación	<b>Poca Superficie</b>				
	4.0	1.0	5.0	1.0	4.0
Requerimientos de personal calificado	<b>No requiere</b>				
	2.0	5.0	2.0	5.0	2.0
Requerimiento de mano de obra de construcción	<b>Poca Mano de Obra</b>				
	3.0	4.0	4.0	5.0	3.0
Mantenimientos requeridos	<b>Poco mantenimiento</b>				
	3.0	4.0	4.0	5.0	3.0
Tiempo de vida útil	<b>Vida útil</b>				
	4.0	4.0	5.0	5.0	3.0
Estandarización de la tecnología en México	<b>Nivel de uso</b>				
	4.0	3.0	5.0	3.0	3.0
<b>Valor Promedio</b>	<b>3.57</b>	<b>3.50</b>	<b>3.79</b>	<b>4.14</b>	<b>3.14</b>
<b>Evaluación Económica</b>					
Costo total de construcción	<b>Más económico</b>				
	3.0	5.0	3.0	4.0	3.0
Costo de operación	<b>Más económico</b>				
	2.0	4.0	2.0	5.0	2.0
Costo de Mantenimiento	<b>Más económico</b>				
	3.0	4.0	3.0	5.0	2.0
Costo total por m <sup>3</sup> de agua tratada	<b>Más económico</b>				
	3.0	4.0	3.0	4.0	3.0
Costos de energía por m <sup>3</sup> de agua tratada	<b>Más económico</b>				
	3.0	4.0	2.0	5.0	2.0
Costos de reactivos por m <sup>3</sup> de agua tratada	<b>Más económico</b>				
	4.0	5.0	4.0	5.0	4.0
Viabilidad económica	<b>Más económico</b>				
	3.0	4.0	3.0	5.0	3.0
Costos de personal asociado con la operación	<b>Más económico</b>				
	3.0	4.0	3.0	5.0	3.0
<b>Valor Promedio</b>	<b>3.0</b>	<b>4.25</b>	<b>2.88</b>	<b>4.75</b>	<b>2.75</b>
<b>Evaluación ambiental y otros criterios adicionales</b>					
Cantidad de subproductos no deseados	<b>Poca generación</b>				
	4.0	3.0	4.0	5.0	4.0
Viabilidad ambiental	<b>Viabilidad</b>				
	3.0	2.0	4.0	5.0	4.0
Calidad de Subproductos no deseados (peligrosos, domésticos o de manejo)	<b>Más económico</b>				
	5.0	3.0	5.0	5.0	4.0
Estético	<b>Amigable con el entorno</b>				
	2.0	1.0	3.0	5.0	2.0
<b>Valor Promedio</b>	<b>3.5</b>	<b>2.25</b>	<b>4.0</b>	<b>5</b>	<b>3.5</b>
<b>TOTAL</b>	<b>10.07</b>	<b>10.00</b>	<b>10.66</b>	<b>13.89</b>	<b>9.39</b>

<sup>24</sup> Luna-Pabello y Ramírez Carrillo (2009). Humedales Artificiales una Ecotecnología sustentable para la Depuración de Aguas Residuales. ALDEQ 2008-2009. No. XXIV. 194-202.

### 6.1.2. Matriz de selección de tecnologías.

Basado en la Matriz de Decisión establecida en la publicación denominada: “*Selección de Tecnologías para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales, guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*”<sup>25</sup> (Tabla 21), se analizarán los procesos de Tratamiento de Aguas Residuales elegidos mediante la matriz de selección de procesos base: que son un proceso de Lodos Activados y un proceso de Humedal Artificial. La ponderación se ha dado de conformidad con la indicada por Noyola *et al.* (2013). No obstante, los valores se han asignado a partir de la información recopilada de otras PTAR en el país, lo indicado por Luna-Pabello y Ramírez Carrillo, 2009, la propia experiencia y participación en proyectos de diseño, construcción, puesta en marcha y operación de diversas PTAR, empatando esta experiencia con la información recopilada y disponible de la Laguna la Piedad.

Es indispensable diseñar una propuesta de un sistema de PTAR que sea viable en su construcción, operación y mantenimiento; que su viabilidad se base en criterios técnicos, económicos y ambientales, que permitan asegurar que la PTAR se mantendrá en operación y esta no se volverá otra infraestructura más que quede abandonada en nuestro país.

Los porcentajes de los factores mencionados se aplicarán para ambas tecnologías, cada uno con la ponderación determinada a cada una de ellas, dado que el objetivo es que ambos sistemas funcionen de forma sistemática, con el objeto de sanear la Laguna la Piedad. En la Tabla 20 se vierten las consideraciones generales para determinar la ponderación que se otorgó a cada factor.

La información que se empleó para otorgar dichos valores, se realizó con el análisis de la información recopilada, así como en la propia experiencia, a partir de lo que se adaptó la información según el citado libro: “*Selección de Tecnologías para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales, guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*”(Noyola *et al.* 2013), la técnica de evaluación propuesta ayuda a elegir el mejor proyecto desde el punto de vista técnico, basado en la Matriz de Decisión establecida. Dicha matriz correlaciona los distintos aspectos que pueden ser evaluados en un proceso de tratamiento de aguas residuales. Considera las diversas circunstancias de aplicación al sitio en particular, mediante la asignación de los rubros según los criterios y los evaluadores, la ponderación se indica según la importancia que otorgue el evaluador (Noyola *et al.*, 2013).

La Tabla 20 expresa las consideraciones empleadas en la Matriz de Selección de Tecnologías de la Tabla 21, en la que se comparan las tecnologías de LA y HA, dado que éstas son las que se consideraron de alta relevancia para la propuesta conceptual y cuyos resultados evidenciaron una mayor viabilidad al asignar valores a los rubros evaluados, en comparación con las otras tecnologías como son: los sistemas de biodiscos, las lagunas de oxidación y los reactores secuenciales discontinuos (SBR por sus siglas en inglés). Considerados los datos recopilados y analizados previamente, las ponderaciones obtenidas fueron de 70.03 para LA y 77.45 para HA.

Como se desprende del análisis, resulta con mayor puntaje una PTAR HA y por lo tanto se señala como el más adecuado para la selección de la tecnología, sin embargo, la comparación realizada no hace explícito el valor del volumen, ni de la calidad del efluente a obtener, presuponen volúmenes

---

<sup>25</sup> Noyola A., Morgan-Sagastume y J.M., Güereca L.P. (2013), *Selección de Tecnologías para el tratamiento de Aguas Residuales Municipales, guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*, Instituto de Ingeniería de la UNAM.

iguales con efluentes de la misma calidad, lo que en la operación no ocurre para el caso de los dos sistemas comparados.

Un sistema de LA trata mayor volumen de agua en menos superficie, reduciendo principalmente contaminantes carbonosos y dejando alto contenido de nutrientes (nitrógeno y fósforo) resultando esto en altos costos operativos debido a sus elevados requerimientos de energía eléctrica.

Un HA trata menor volumen de agua, por superficie ocupada, pero obteniendo efluentes de alta calidad (menor contenido de nitrógeno y fósforo) con bajos costos operativos, pero mayor área de operación.

La inclusión de la tecnología de HA se considera viable para la disminución de la eutrofización del agua contenida en la laguna, así como la obtención de agua tratada de calidad apta para cultivos aprovechables. Sin embargo, cuando se considera el volumen total que se requiere para sanear completamente el agua que entra a la laguna, así como que continuamente se siguen vertiendo aguas residuales a la misma un HA contribuirá de manera complementaria a mitigar el daño ambiental hecho a la Laguna. Por tal motivo, se debe evitar descargar aguas residuales a los cauces de los ríos y al cuerpo de agua, así como hacer lo necesario para poner en marcha las PTAR LA que no están actualmente operando y la realización de obras complementarias que se analizarán en los diversos escenarios planteados en este trabajo, los cuales se desarrollan más adelante en el apartado 6.2.

A continuación, se describen los puntos y las consideraciones que al respecto de las dos tecnologías se hicieron para otorgar las ponderaciones y obtener los puntajes indicados.

1. **Aplicabilidad del proceso:** El proceso debe ser el adecuado para las características del agua residual a tratar, así como la calidad del agua que se requiere (Noyola *et al.*, 2013), se considera que tanto el proceso de Lodos Activados como el de Humedales Artificiales es adecuado para el agua residual que alimenta a la Laguna.

1.1. **Intervalo de flujo en el cual el sistema es aplicable:** Los procesos se diseñan y aplican para un determinado intervalo de flujo. El proceso de la PTAR LA se puede diseñar para caudales desde 1 LPS hasta más de 24,000 LPS, según los volúmenes tratados por las PTAR que existen en México. En cambio, las PTAR HA, suelen ser diseñar para tratar caudales relativamente pequeños, debido sobre todo a su alto requerimiento de área.

1.2. **Tolerancia a variaciones de flujo:** Para PTAR LA, las variaciones drásticas pueden afectar el TRH y la eficiencia del proceso, pues en caso de que falte flujo la carga orgánica puede verse disminuida, causando estrés en los microorganismos que en el operan y sería difícil lograr la estabilización del sistema. Las variaciones fuertes de Caudal pueden afectar la eficiencia de los sistemas de HA (CONAGUA MAPAS 30, 2015), sobre todo si no se cuenta con tanque de homogeneización y pretratamiento. Lo que se suele hacer en México, cuando se tienen variaciones al alza, es derivar lo que la PTAR no puede tratar, por lo que el volumen excedente, estaría entrando a la Laguna La Piedad sin tratamiento. Sin embargo, también por experiencia se afirma que las derivaciones de los excedentes se dan principalmente en

temporada de lluvias, cuando el agua además llega con una calidad diferente resultado del efecto de dilución propiciado por el agua que precipita.

- 1.3. **Características del agua residual:** Tanto el proceso de LA cómo el proceso de HA, son capaces de remover los contaminantes como los presentes en el influente de la Laguna y en el propio cuerpo de agua, en ambos casos se encontró información referente a sus capacidades de remoción.
- 1.4. **Eficacia de la remoción:** Tanto el proceso de LA cómo el proceso de HA, puede remover los contaminantes presentes en el agua del sistema hídrico de la Laguna la Piedad. No obstante, el HA logra una mayor remoción de compuestos nitrogenados y fosforados en comparación a un proceso de LA.

Tabla 20. Comentarios de las consideraciones para la aplicación de las ponderaciones<sup>26</sup>.

Factor	Comentarios de la Evaluación	Ponderación asignada
Aplicabilidad del proceso	Por las características del proyecto se propone una PTAR con una capacidad de 60 LPS, se desea que el proceso seleccionado pueda operar en el intervalo de flujo dado, que sea tolerante a variaciones de flujo y que pueda tratar con eficiencia el agua residual del influente, evitando la derivación de agua sin tratar. Se asigna la ponderación de 10, pues ambas tecnologías operan mejor si el caudal a tratar se mantiene constante.	10
Generación de Residuos	La generación de residuos es un rubro importante, pues todas las PTAR los generan, no se cuenta con un sitio para la correcta disposición, por lo que será necesario contar con un sitio y promover el reúso de estos residuos, para mantener la vida útil del sitio de disposición de Residuos. Los RSU que se recojan, pueden ser retirados y dispuestos a través de una compañía especializada.	5
Aceptación por parte de la comunidad	En la comunidad se reconoce la necesidad de sanear la laguna, incluso hay participación ciudadana, a través del municipio o de actores sociales, para acudir mensualmente a retirar RSU. La población desconoce los usos de la tecnología de Aguas Residuales, se ha manejado la creación de un humedal artificial, que podría funcionar como área recreativa, por lo que no se considera que la parte social sea un inconveniente, pues la percepción de los vecinos del correcto tratamiento es la de un beneficio.	5
Generación de subproductos con valor económico o de uso	Si se logra que el agua de la Laguna la Piedad cumpla con las condiciones indicadas en la NOM-003-SEMARNAT-1996, será seguro su reúso público con contacto directo, además será necesario promover el reúso de los residuos sólidos que se obtengan de los procesos de tratamiento. Esto requiere campañas y educación para que las personas de la comunidad que podrían beneficiarse tengan la conciencia y el conocimiento necesarios para la implementación de los nuevos proyectos de inversión.	7
Vida útil	Es importante que la infraestructura tenga una vida útil lo más larga posible, sin que sea complicado o una desventaja el relacionamiento y el mantenimiento a lo largo del tiempo.	15
Requerimiento de área	La extensión territorial para la construcción de una PTAR HA tiene mayor requerimiento que una PTAR LA, existe área para construir cualquiera de las dos tecnologías comparadas.	8
Costo	La tecnología propuesta para la elaboración del diseño de esta tesis, pretende ser una opción viable económicamente, tanto en gastos de inversión inicial, así como operación y mantenimiento, reduciendo al máximo el uso de reactivos y buscar la aplicación de energías limpias para el suministro eléctrico. Se considera que esta zona es marginal, por lo que la propuesta de selección de la tecnología y el costo de operación es un detalle de alta importancia para garantizar la continua operación de un sistema de tratamiento.	15
Diseño y Construcción	Es necesario que los criterios de diseño sean adecuados para coadyuvar de forma real al mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad.	10
Operación	El diseño deberá presentar una operación, que sea simple, flexible y confiable. Pues esto ayudara a disminuir los costos de gastos de operación y administrativos, en caso de que fuera posible llevar a cabo la construcción de este diseño de infraestructura propuesta y su operación.	10
Entorno e impacto ambiental	Se considera que aproximadamente el 100% del área se encuentra impactada, lo que favorece los trámites para los CUSTF y MIA correspondientes. Mejorar la calidad del agua que entra en la Laguna la Piedad, coadyuvando a su rescate y mejorando también el entorno con una PTAR que pudiera ser un pasaje recreativo que justificaría la presencia de personal que mantenga la seguridad de la infraestructura de la PTAR propuesta y los alrededores, podría reducir el vertido de RSU y Aguas Residuales sin tratamiento a la Laguna, mejorando de muchas formas el entorno e impacto social.	20
<b>Total</b>		<b>100</b>

<sup>26</sup> Los factores considerados se basan en el método para selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales municipales: guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas, Noyola *et al.*, 2013.

Tabla 21. Matriz de Selección de Tecnologías<sup>27</sup>.

#	A	B	Proceso Evaluado: Lodos Activados			Proceso Evaluado: Humedal Artificial		
			C	D	E	C	D	E
%	Rubros Evaluados	Calificación: 0 = No aplica 1 = Deficiente 3 = Adecuado 5 = Muy Bueno	C/5 (excepto en renglones 7.3, 8.5 y 10.7)	D*A	Calificación: 0 = No aplica 1 = Deficiente 3 = Adecuado 5 = Muy Bueno	C/5 (excepto en renglones 7.3, 8.5 y 10.7)	D*A	
<b>1</b>	<b>10</b>	<b>Aplicabilidad del proceso</b>		<b>0.8</b>	<b>8</b>		<b>0.6</b>	<b>6</b>
1.1		Intervalo de flujo en el cual el sistema es aplicable	5			1		
1.2		Tolerancia a variación de flujo	3			3		
1.3		Características del agua residual	3			5		
1.4		Eficacia de remoción	5			5		
1.5		Suma 1.1 C, 1.2 C, 1.3 C, 1.4 C, la suma entre 20, en la celda 1.5D		0.8			0.65	
<b>2</b>	<b>5</b>	<b>Generación de Residuos</b>	<b>3</b>	<b>0.6</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>5</b>	<b>Aceptación por parte de la Comunidad</b>	<b>1</b>	<b>0.2</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>0.6</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>7</b>	<b>Generación de Subproductos con valor económico o de reúso</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>10</b>	<b>Vida útil</b>	<b>3</b>	<b>0.6</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>0.6</b>	<b>6</b>
<b>6</b>	<b>8</b>	<b>Requerimiento de área</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>8</b>	<b>1</b>	<b>0.2</b>	<b>1.6</b>
<b>7</b>	<b>15</b>	<b>Costo</b>		<b>0.6</b>	<b>9</b>		<b>0.6</b>	<b>9</b>
7.1		Inversión	3			1		
7.2		Operación y Mantenimiento	3			5		
7.3		Sumar las casillas 7.1 C y 7.2 C y dividir el total entre 10. El resultado se anota en la casilla 7.3 D		0.6			0.6	
<b>8</b>	<b>10</b>	<b>Diseño y construcción</b>		<b>0.9</b>	<b>9</b>		<b>1</b>	<b>10</b>
8.1		Criterios de diseño	5			5		
8.2		Experiencia del contratista	5			5		
8.3		Tecnología ampliamente probada	5			5		
8.4		Complejidad en la construcción y equipamiento	3			5		
8.5		Suma 8.1C, 8.2C, 8.3C y 8.4C y dividir el total entre 20. El resultado anotar en la casilla 8.5D		0.9			1	
<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Operación</b>		<b>0.06</b>	<b>6</b>		<b>0.93</b>	<b>9.2</b>
9.1		Flexibilidad de operación	3			3		
9.2		Confiabilidad del proceso	5			5		
9.3		Complejidad de operación del proceso	1			5		
9.4		Requerimiento de personal	1			5		
9.5		Disponibilidad de respuestas y centros de servicio	5			5		
9.6		Suma 9.1C, 9.2C, 9.3C, 9.4C y 9.5C y dividir el total entre 25. El resultado en la casilla 9.6D		0.6			0.92	
<b>10</b>	<b>20</b>	<b>Entorno</b>		<b>0.7</b>	<b>13.3</b>		<b>1</b>	<b>20</b>
10.1		Influencia de la temperatura	5			5		
10.2		Producción de ruido	1			5		
10.3		Contaminación Visual	3			5		
10.4		Producción de malos olores	5			5		
10.5		Generación de Gases de Efecto Invernadero (Huella de Carbono)	3			5		
10.6		Condiciones para la reproducción de animales dañinos	3			5		
10.7		Suma 10.1C, 10.2C, 10.3C, 10.4C y 10.5C y 10.6 y dividir el total entre 30. Resultado en la casilla 10.7D		0.7			1	
<b>11</b>	<b>100</b>	<b>Sumar los valores de la columna E y anotar el resultado en la casilla 11E.</b>			<b>70.3</b>			<b>77.45</b>

La ponderación se otorgó de conformidad con lo indicado en la citada guía, considerando las siguientes calificaciones: 0 = No aplica, 1 = Deficiente, 3 = Adecuado y 5 = Muy bueno; además para cada rubro se tomó en cuenta lo siguiente:

<sup>27</sup> Matriz Basada en la Matriz de decisión, propuesta por Noyola *et al.*, 2013.

2. **Generación de Residuos:** Todos los procesos de tratamiento de aguas residuales tendrán una generación de residuos sólidos. Sin embargo, el volumen de lodos biológicos generado es mayor para la PTAR LA que en la PTAR HA. En esta última lo que principalmente se obtiene es material vegetal procedente de la poda de las plantas que crece sobre el sistema de soporte.
3. **Aceptación por parte de la comunidad:** Una PTAR LA suele ser una estructura con poca vista arquitectónica, y algún riesgo por el tipo de desinfección, mientras que la PTAR HA es más agradable a la vista y se puede emplear como andador recreativo, ambas pueden tener generación de olores, sin embargo, las condiciones actuales de la Laguna la Piedad hacen prioritarias las acciones para el tratamiento del agua residual que entra a la Laguna. Se ha aplicado un cuestionario a los vecinos con apoyo de la participación de los actores sociales que buscan la recuperación del cuerpo de agua y se considera que estos estarían a favor de un sistema de tratamiento que permitiera recuperar ese cuerpo de agua, sobre todo si este sistema les permite recuperar los espacios de esparcimiento que actualmente están sin poder aprovecharse, por lo que no se considera que sea un problema contar con la aceptación de la comunidad.
4. **Generación de subproductos con valor económico o de uso:** Del uso de ambas tecnologías, se pueden obtener subproductos con valor económico, para las PTAR LA se puede buscar el aprovechamiento de los lodos para los propios cultivos de la zona, si cumplen con la calidad necesaria de conformidad con la NOM-004-SEMARNAT-2002 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, así como la venta de la propia agua residual tratada para su reúso. Para las PTAR de HA, dada la calidad que se puede obtener en estos sistemas, se puede proponer el reúso del agua para el cultivo de flores de ornato que pueden venderse a mayor precio que los cultivos de forraje, así como el reúso del agua tratada, dada la calidad de la misma, en cultivos de hidroponía, acuaponía y piscicultura.
5. **Vida útil:** Se considera que ambas tecnologías, si son bien diseñadas, pueden cumplir con un tiempo de vida útil de hasta 20 años, siempre y cuando sean operadas correctamente y reciban un mantenimiento adecuado.
6. **Requerimientos de área:** Es mayor el área requerida para una PTAR-HA, que para una PTAR-LA en relación con los caudales de volumen que pueden tratar.
7. **Costo:** El costo de construcción y equipamiento, puede volverse similar para ambas PTAR. No obstante, se considera que la PTAR HA puede amortizar más rápido el costo de inversión durante su periodo de operación, así como en los costos de mantenimiento. Asimismo, el costo de operación y mantenimiento de la PTAR LA es más elevado que el de la PTAR HA, principalmente por los requerimientos de equipos y el consumo eléctrico de los mismos. Por lo que fue necesario considerar los costos de diseño, construcción, operación y mantenimiento al momento de asentar esta ponderación en la Matriz de Selección de Tecnologías.
  - 7.1. **Inversión:** Se considera que es similar, sin embargo, es necesario contar con más estudios, como el de mecánica de suelos, para poder determinar el costo real de la obra civil, así como la inversión en equipos de operación y reactivos, que son considerados menores para una PTAR HA en comparación con los requeridos para una PTAR LA.

- 7.2. **Costo de operación y mantenimiento:** Se considera que es más competitivo el costo para una PTAR HA que para una PTAR LA, pues se incluye en este, los gastos de energía eléctrica, el insumo de reactivos y el costo de refacciones y de material de mantenimiento, mismos que son más bajos en una PTAR HA. Mientras que los gastos administrativos y de personal, pueden ser equivalentes, según el personal que se contrate para la operación, mantenimiento y administración de las PTAR, aunque los Municipios y los Organismos Operadores suelen optar por personal sin preparación que resulta en mano de obra económica, lo que incide de forma directa o indirecta en los gastos de operación y mantenimiento.
8. **Diseño y construcción:** Es importante dar la calificación adecuada a este rubro, pues contar con personal calificado para el diseño y construcción, puede parecer caro, pero garantiza el diseño adecuado y la propia durabilidad de la infraestructura, resultará en una mayor operabilidad del sistema.
- 8.1. **Criterios de diseño:** Ambas tecnologías están ampliamente estudiadas y diversas modificaciones se han probado satisfactoriamente en los diseños, por lo que es posible contar con un dominio alto en la práctica ingenieril sobre los modelos teóricos o empíricos que se propongan para el diseño de este sistema.
- 8.2. **Experiencia del contratista:** Elegir contratistas que tengan amplia experiencia para el diseño y construcción de ambas tecnologías seleccionadas, y considerar la participación del constructor hasta la estabilización de los sistemas, puede ser decisivo en las buenas prácticas de operación de los sistemas.
- 8.3. **Tecnología ampliamente probada:** La tecnología propuesta ha sido ampliamente probada a nivel nacional e internacional.
- 8.4. **Complejidad en la construcción y equipamiento:** Dados los puntos 8.2 y 8.3, y complementando con un estudio de mecánica de suelos, se considera que es muy buena la calificación que ambas tecnologías pueden tener en este rubro.
9. **Operación:** Se considera que la operación de una PTAR HA es relativamente más sencilla en comparación con la operación de una PTAR LA, sin embargo, ambas con el personal calificado adecuado son funcionales, la diferencia radica principalmente en la dificultad de operar cada una, así como la capacidad y funcionamiento de cada una de ellas.
- 9.1. **Flexibilidad de operación:** Se considera que la operación de ambas tecnologías es aceptable, pues una vez diseñadas y construidas, se aceptan poco las variaciones hidráulicas, aunque es posible retirar temporalmente de operación algún equipo sin afectar significativamente el sistema.
- 9.2. **Confiabilidad del proceso:** Ambas tecnologías se consideran muy buenas en su confiabilidad, son seguras para su operación continua, sin que fallen y podrán mantener la calidad requerida del efluente.

- 9.3. **Complejidad de operación del proceso:** Si se cuenta con el diseño, manual de operación y personal calificado, la complejidad de operación es baja para ambas tecnologías seleccionadas.
- 9.4. **Requerimiento de personal:** Se considera que una PTAR HA puede operar con menor personal que una PTAR LA, aunque los sistemas de automatización y control que pueden usarse en las PTAR actualmente son capaces de disminuir el requerimiento de personal en las PTAR LA.
- 9.5. **Disponibilidad de repuestos y centros de servicio:** Para ambas tecnologías este rubro obtiene una calificación de elevada, pues son tecnologías actuales en el mercado.
10. **Entorno e impacto al medio ambiente:** Tratar adecuadamente el agua residual, es un factor que puede impactar en el entorno y en el medio ambiente, la falta de tratamiento resulta en un impacto negativo al entorno. Aunque la perturbación del entorno con una construcción de infraestructura como una PTAR tiene influencia sobre el paisaje, la generación de contaminación sonora y hasta la generación de efectos de gases invernadero.
- 10.1. **Influencia de la Temperatura:** La temperatura media de la localidad es adecuada para la operación de este tipo de sistemas.
- 10.2. **Producción de Ruido:** Se considera que la PTAR HA tiene una ponderación alta para ruido dado que su generación es mínima, mientras que la PTAR LA, según su operación se puede considerar que es una ponderación baja a media, sobre todo en caso de haber compresores y aeradores, pero esto se puede amortiguar con muros perimetrales.
- 10.3. **Contaminación Visual:** Se considera que la PTAR HA tiene una calificación alta pues no impacta negativamente el paisaje, incluso se pueden elegir plantas de ornato para el proceso, mientras que la PTAR LA, se puede considerar que es deficiente, pues su obra civil impacta el paisaje, aunque pueden crearse diversas áreas verdes y frutales, en los que se puede reusar la propia agua del sistema.
- 10.4. **Producción de malos olores:** Una PTAR bien operada, no debe producir malos olores, aunque el agua del influente siempre tendrá ese inconveniente, que puede ser disminuido con un buen diseño y operación de un sistema de tratamiento adecuado y bien operado.
- 10.5. **Generación de gases de efecto invernadero:** Una PTAR LA genera gases de efecto invernadero, pues requiere el uso de energía eléctrica, por lo que su generación se puede considerar indirecta, mientras que una PTAR HA puede considerarse una menor generación, pues su consumo de energía eléctrica es mucho menor.
- 10.6. **Condiciones para la reproducción de animales dañinos:** Ambas tecnologías con una operación y mantenimiento adecuadas, obtienen buenas ponderaciones para este rubro.

De esta matriz, se puede determinar que los sistemas más viables para desarrollar la estrategia de una propuesta conceptual de mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad son

los sistemas de tratamiento por medio de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial y los sistemas de Lodos Activados. Cabe señalar que la sola implementación de estas tecnologías, por si mismas, no resolverán la problemática de la calidad del agua de la laguna de forma autónoma. Para ello, es necesario establecer e impulsar una estrategia asociada con el manejo y uso del agua que en su totalidad entra a la Laguna.

Asimismo, se debe tener presente que, desde el punto de vista de capacidad de volumen tratado, la PTAR que se proponga deberá ser capaz de tratar los caudales intermitentes que llegan a la laguna, lo que representa una desventaja para cualquiera de las dos tecnologías. Para la PTAR LA la intermitencia representa un reto para operar de manera estable el agua residual que recibe y para la tecnología de una PTAR HA, el volumen a tratar es excesivo (solo podría tratar hasta 2 LPS, para lo que existe un área disponible que puede ser completamente aprovechada para su construcción). Por tal motivo se refuerza la necesidad de llevar a cabo diversas estrategias de mejoramiento y aprovechamiento del agua, empleando otras ponderaciones complementarias al caudal a tratar.

## **6.2. Estrategias de mejoramiento y aprovechamiento del agua para la Laguna la Piedad.**

Las siguientes estrategias se han elaborado en forma esquemática tomando en cuenta la información recopilada sobre las aportaciones de agua residual que entran a la Laguna la Piedad, el terreno propuesto para la construcción de una PTAR, la adaptación de métodos comparativos, el caudal a tratar, el impacto ambiental de los sistemas de tratamiento, así como un planteamiento que coadyuve a mitigar el daño y recuperar el espacio de la Laguna la Piedad como área de esparcimiento. A partir de la Matriz de Selección de Tecnologías, así como de la infraestructura disponible, con lo que se plantean las diversas estrategias y de ellas elegir la mejor opción para desarrollar una propuesta conceptual de la estrategia para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad en Cuautitlán Izcalli, Estado de México.

Las consideraciones para cada uno de los escenarios son las siguientes:

- Costos índices de inversión en el diseño y construcción de los sistemas de tratamiento.
- Costos índices de energía eléctrica en la operación de los sistemas propuestos.
- Porcentaje de remoción de contaminantes de los sistemas propuestos.

Para la determinación de los costos índice se estimó mediante el uso del prontuario del IMTA de Aplicación de Costos Índice de PTAR (2012), por lo que es necesario la aplicación de INPC para actualizar los costos.

Para ajustar los precios de 2012, a los costos de inversión índice obtenidos se aplica la fórmula del Índice Nacional de Precios al Consumidor (INPC) adecuada de la presentada por Miranda-Alcibar, 2018.

$$Costo Actual = \frac{Costo 2012 \cdot INPC 2021}{INPC 2012}$$

Donde:

**Costo Actual:** es el valor de la inversión a precios de febrero de 2021

**Costo 2021:** es el valor de la inversión obtenido a precios de 2012.

**INPC 2021:** es el valor de INPC en febrero de 2021.

**INPC 2012:** es el valor del INPC en enero de 2012.

Los datos de INPC fueron extraídos de <https://www.elcontribuyente.mx/inpc/> el 20 de marzo del año 2021, que se vierte en la Tabla 22.

Tabla 22. INPC de enero de 2012 a febrero 2021<sup>28</sup>.

	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DECIEMBRE
2021	110.21	110.907										
2020	106.447	106.889	106.838	105.755	106.162	106.743	107.444	107.867	108.114	108.774	108.856	109.271
2019	103.108	103.079	103.476	103.531	103.233	103.299	103.687	103.67	103.942	104.503	105.346	105.934
2018	98.795	99.17137	99.49216	99.15485	98.99408	99.376465	99.9091	100.492	100.917	101.44	102.303	103.02
2017	93.60388	94.14478	94.72249	94.83893	94.72549	94.96364	95.32274	95.79377	96.0935152	96.69827	97.695174	98.272883
2016	89.38638	89.77778	89.91	89.62528	89.22561	89.324028	89.55691	89.80933	90.3577439	90.90615	91.616834	92.039035
2015	87.1101	87.27538	87.63072	87.40384	86.96737	87.113108	87.24082	87.42488	87.752419	88.20392	88.685468	89.046818
2014	84.51905	84.73316	84.96529	84.80678	84.53558	84.682072	84.91496	85.21997	85.5963399	86.06963	86.763778	87.188984
2013	80.89278	81.29094	81.88743	81.94152	81.66882	81.619238	81.59219	81.82433	82.1323397	82.52299	83.292265	83.770058
2012	78.34305	78.50231	78.54739	78.30098	78.05382	78.413667	78.8539	79.09054	79.4391189	79.84104	80.383437	80.568243

Para poder obtener los costos a febrero de 2021, aplicándose los valores indicados en la Tabla de INPC.

El Municipio ha considerado una inversión para la construcción de un humedal artificial de 38 MDP a precios de 2019, según los datos del convenio de colaboración administrativa y asesoría profesional para realizar el programa integral de agua y saneamiento del Lago ("La Piedad") No. OPDM/CJ/016/2019 de fecha 20 de noviembre del año 2019.

Es por lo anterior que se actualiza el precio obtenido para la construcción del HA según lo indicado mediante la aplicación de costos índice del IMTA de 2012 a 2019, así que se adiciona a los 38 MDP el valor de 0.91 MDP a precios de 2021, proponiendo un costo para el Estimado de factores necesarios para llevar a cabo la construcción y puesta en operación de la PTAR o las PTAR propuestas en los diversos escenarios en 38.91 MDP a precios de 2021.

Se calculó su precio, basado en un proyecto base para esa PTAR HA, aunque según Miranda-Alcibar, 2018, el costo de una PTAR HA a precios de 2018 puede ser de hasta 40.1 MDP, lo que es consistente con el dato de la proyección empleado para determinar el valor de una PTAR HA.

Para poder ejecutar el proyecto de la PTAR nueva, será necesario invertir, al menos 37 MDP en proyectos, avalúos, compras de predios, cambios de usos de suelos, manifestaciones de impacto ambiental, preparación del terreno, estudios de mecánica de suelos, ingeniería básica de los proyectos, así como la puesta en operación y su estabilización. Los precios arrojados en el índice del IMTA, indican que estos costos son indicativos y se deben tomar con reserva y hay factores como la

<sup>28</sup> Fragmento de enero de 2012 a febrero de 2021 el INPC extraído el 20 de marzo de 2021 de la tabla presentada en <https://www.elcontribuyente.mx/inpc/>

distancia a la que se encuentren los servicios del lugar de construcción, la topografía, el tipo de suelo o la zona económica, que influyen positiva o negativamente en el costo de construcción en hasta un 50% según la información recopilada (IMTA, 2012). En este caso, se parte de que no se cuenta con ninguno de los elementos necesarios para llevar a cabo la obra en sí.

Para el cálculo de los precios de los sistemas de tratamiento mediante tecnología de Lodos Activados de 10 a 19 LPS puede ser de 1.6 MDP por litro y arriba de 20 LPS, se puede valorar en 1.3 MDP por litro, lo que incluye el diseño, la construcción y la puesta en operación de los sistemas, según datos recopilados de la Comisión Estatal del Agua de Jalisco en su inversión en diseño, construcción y puesta en marcha de diversas PTAR en el estado de Jalisco dentro del programa Gestión Integral del Agua 2020<sup>29</sup>, por lo que se empleó esta base para determinar la inversión de las PTAR propuestas con esta tecnología.

Para el cálculo de los porcentajes de remoción, se empleó el artículo “*Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales*” (Noyola et al., 2013), considerando únicamente las remociones para las tecnologías propuestas según se indica en la Tabla 23 y en la que se enmarcan en rojo los porcentajes de remoción utilizados empleando el valor promedio de estos. Para la remoción de las tecnologías PTAR propuestas se emplearon los resultados del muestreo de fecha 23 de marzo del año 2020, por ser estos los de mayor concentración encontrada. Para el caso del humedal artificial, se ha empleado el valor de remoción de coliformes fecales de 5 log<sub>10</sub> según la memoria de cálculo del humedal artificial del bosque de Aragón, diseñado y construido por personal del Laboratorio de Microbiología Experimental de la Facultad de Química de la UNAM.

Tabla 23. Eficiencia de remoción por tecnologías<sup>30</sup>.

TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO	REFERENCIA	SST	DBO <sub>5</sub>	DQO	N NH <sub>3</sub>	N ORG	N NO <sub>3</sub>	N TOTAL	P PO <sub>4</sub>	P TOTAL	COLIFORMES
Lodo activado convencional	RAS (2000)	80-90	80-95	80-95			15-20			10-25	
	Yañez (1995)	85-98	70-98								95-98
	Fair (1954)	55-95	55-95	50-80							90-98
	Von Sperling (1996)	80-90	85-93					30-40		30-45	60-90
Laguna anaerobia – humedal	Caicedo (2005)	87-93	80-90					37-48		45-50	

Enmarcados en rojo los porcentajes de remoción seleccionados.

Para todas y cada una de las propuestas son necesarios: estudios de mecánica de suelos, tramites de uso de suelos, tramites ambientales, batimetría de la laguna y manifestaciones de impacto ambiental, entre otros.

A continuación, se desarrollarán cada uno de los escenarios propuestos. El estado actual de la Laguna será considerando como Escenario 0, descrito en el apartado 5.5. de este trabajo, en el que ninguno de sus influentes recibe tratamiento alguno.

<sup>29</sup> Comisión Estatal del Agua de Jalisco (2020), Presentación 20 PTAR Saneamiento de la de fecha 31 de marzo de 2020, extraído 26 junio 2020 [https://deudapublica.jalisco.gob.mx/sites/default/files/paginas/archivos/Presentaci%C3%B3n%20PTARs%20Saneamiento\\_31mar20.pdf](https://deudapublica.jalisco.gob.mx/sites/default/files/paginas/archivos/Presentaci%C3%B3n%20PTARs%20Saneamiento_31mar20.pdf)

<sup>30</sup> Extracto de la Tabla 2 del artículo “*Eficiencias de remoción de contaminantes por tecnologías*” (Miranda et al., 2015).

### **6.2.1. Propuestas de mejoramiento y aprovechamiento del agua para la Laguna la Piedad: Escenario 1.**

Esta propuesta considera la rehabilitación de la PTAR la Piedad II en cuyo efluente se midieron en promedio en temporada de estiaje hasta 17 LPS y la reconstrucción de la PTAR Lomas de Cuautitlán en cuyo efluente se midieron en promedio 13 LPS de agua que actualmente pasa sin ser tratada, sin embargo, estas dos aportaciones se diluyen en su confluencia con el río Barranca de Zamorillas y su puesta en marcha beneficiaría directamente a los cultivos que la emplean antes de que llegue a este río y que en periodo de estiaje derivan hasta 40 LPS a través del sitio denominado “Acueducto” hacía los cultivos que se encuentran en la margen derecha de dicho río. Por lo que su beneficio es indirecto para la Laguna la Piedad.

Se consideran como Escenario 1 esta rehabilitación y reconstrucción, por tratarse de PTAR que ya es infraestructura existente, pero que sin embargo están fuera de operación.

Aguas abajo de la confluencia de estas dos aportaciones al río Barranca de Zamorillas, se propone la construcción de una PTAR de tecnología convencional de Lodos Activados de hasta 59 LPS, determinados por el caudal medido en el río Barranca de Zamorillas estos datos de capacidad de las PTAR se obtienen de la Figura 34. Medidas de caudal en sitio de fecha 26 de enero de 2020. La Estrategia 1 y el flujo de corrientes se esquematiza en la Figura 41. Esta PTAR de 59 LPS, captaría el total del agua que entra a la Laguna la Piedad y que se considera es agua residual sin tratamiento, el flujo adicional que se ha reportado, se considera extraordinario y su principal aportación sería de Agua Pluvial y agua de la Presa Lago de Guadalupe que se vierte durante el periodo de estiaje con apertura de compuerta de la Presa.



Figura 41. Propuesta Escenario 1 para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020.

En la Tabla 24, se indican los porcentajes de remoción y la calidad del agua resultante una vez que el agua es tratada en las PTAR propuestas. Los valores de los parámetros marcados en rojo son aquellos que se encuentran fuera de los LMP por las NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-001-SEMARNAT-1997.

Por la intermitencia del agua que entra a la Laguna y sus variantes durante temporada de lluvia y temporada de estiaje con apertura de compuerta de la Presa Lago de Guadalupe, se considera adecuado para mantener la operabilidad del sistema de tratamiento, una PTAR con la capacidad de 59 LPS, sin embargo, será necesario considerar una derivación del agua cuando el volumen sobrepase la capacidad de la PTAR propuesta, pues el caudal de agua que entra a la Laguna la Piedad con apertura de la Presa Lago de Guadalupe puede alcanzar hasta los 344 LPS, principalmente en temporada de estiaje con apertura de la compuerta de la Presa Lago de Guadalupe.

Para la construcción de una PTAR LA nueva, se requiere un predio de al menos 1,000 m<sup>2</sup>, estudios de mecánica de suelos, trámites de cambio de uso de suelos, permisos ambientales y estudios de calidad del agua. Además, la construcción significa un impacto en predios que actualmente se emplean para cultivo.

Tabla 24. Remoción del sistema de PTAR de la Estrategia 1.

PROPUESTA PTAR	Sistema de tratamiento	Parámetro	Concentración influyente	% de remoción (Promedio)	Concentración efluente	LP NOM-003-SEMARNAT-1997
Reconstrucción PTAR Lomas de Cuautitlán, caudal de tratamiento 13 LPS	Lodos Activados	SST (mg/L)	195	91.5	16.58	20
		DBO <sub>5</sub> (mg/L)	<b>1609</b>	89	<b>176.99</b>	20
		DQO (mg/L)	3475	87.5	434.38	NA
		N NO <sub>3</sub> (mg/L)	0.031	17.5	0.03	NA
		N Total (mg/L)	<b>63.521</b>	35	<b>41.29</b>	20
		P Total (mg/L)	9.603	17.5	7.92	12
Rehabilitación PTAR La Piedad II, caudal de tratamiento 17 LPS	Lodos Activados	SST (mg/L)	<b>145</b>	91.5	12.33	20
		DBO <sub>5</sub> (mg/L)	<b>1554</b>	89	<b>170.94</b>	20
		DQO (mg/L)	3965	87.5	459.63	NA
		N NO <sub>3</sub> (mg/L)	0.02	17.5	0.02	NA
		N Total (mg/L)	<b>87.071</b>	35	<b>56.60</b>	20
		P Total (mg/L)	8.135	17.5	6.71	12
Construcción PTAR, caudal de tratamiento 59 LPS	Lodos Activados	SST (mg/L)	<b>90.00</b>	91.5	7.65	20
		DBO <sub>5</sub> (mg/L)	89.00	89	9.79	20
		DQO (mg/L)	<b>159.00</b>	87.5	19.88	NA
		N NO <sub>3</sub> (mg/L)	0.02	17.5	0.02	NA
		N Total (mg/L)	<b>63.57</b>	35	<b>41.32</b>	20
		P Total (mg/L)	<b>6.11</b>	17.5	<b>5.04</b>	12
		Coliformes (NMP/100mL)	2.4x10 <sup>4</sup>	96.5	8.4x10 <sup>2</sup>	240

Enmarcados en rojo los parámetros que se encuentran fuera de los LMP.

Los costos de nómina de tecnologías convencionales de lodos activados cuya operación depende de energía eléctrica son elevados, para una PTAR de entre 0 a 100 LPS, se pueden considerar inversiones de 1.8 MDP en nómina anual en zona cara (IMTA, 2012). Por lo que anualmente por estas tres PTAR se podrían pagar hasta 5.5 MDP a precios de 2012 por este rubro, además de los consumos de energía eléctrica con los procesos de aireación relacionados a los procesos de Lodos Activados, para el uso de paletas rotativas considera un gasto de 2,000 kW/h, que resultaría en un costo de energía eléctrica superior a los \$40,000.00 pesos mensuales, por cada una de las PTAR LA que sean puestas en marcha.

Para una PTAR LA, el costo de inversión de 10 a 19 LPS puede ser de 1.6 MDP por litro y arriba de 20 LPS, se puede valorar en 1.3 MDP por litro, lo que incluye el diseño, la construcción y la puesta en operación de los sistemas, según datos recopilados de la Comisión Estatal del agua en su inversión en diseño, construcción y puesta en marcha de diversas PTAR en el estado de Jalisco dentro del programa Gestión Integral del Agua 2020.

Tabla 25. Costos de Inversión y Operación Anual del Escenario 1.

Acción	Precios 2012 (MDP)	Precios 2021 (MDP)
Reconstrucción de la PTAR Lomas de Cuautitlán .		20.8
Rehabilitación de la PTAR La Piedad II.		27.2
Construcción de nueva PTAR de 59 LPS.		76.7
Estimado de Factores necesarios para estar en condiciones de elaborar el diseño, la construcción y puesta en marcha de una PTAR		38.83
<b>Inversión Inicial</b>		<b>163.53</b>
Costos de nómina anual para las 3 PTAR LA	5.5	7.79
Costo Aproximado Anual de Energía Eléctrica (3 PTAR)	1.44	2.04
<b>Costos de Operación Anual</b>	<b>6.94</b>	<b>9.83</b>

Se podrían derivar diversos volúmenes para el reúso directo de las aguas residuales tratadas, como puede ser riego, piscicultura, acuaponía que se mencionan solo enunciativamente, aunque el agua no alcanza a cumplir con los LMP indicados en las NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997 en SST, DBO<sub>5</sub>, N<sub>T</sub> y Coliformes. El agua resultante podría emplearse para reúso indirecto pues recogería todas las aguas residuales que entran a la Laguna y las trataría antes de su entrada a la misma, aunque en Nitrógeno Total cumpliría con el LMP indicado en el promedio diario (60 mg/L), pero para el promedio mensual (20 mg/L), se encuentra fuera del rango indicado por la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997.

La ubicación propuesta para la PTAR de 59 LPS está dejando fuera de tratamiento posibles aportaciones clandestinas localizadas en diversos puntos en la margen sur de la laguna, aunque se considera que éstas pueden ser despreciables al momento de ser incorporadas al cuerpo de agua, por la densidad de población que se pudo observar durante los recorridos realizados y que se estima en el apartado 5.2 que vierten 0.66 LPS de agua sin tratar.

La rehabilitación y reconstrucción de las PTAR propuestas eleva el costo de la propuesta, pero mejoraría la calidad del agua que se conduce a través de los canales de riego antes de entrar al río Barranca de Zamorillas, dado que es en estas PTAR que se obtuvo la mayor concentración de contaminantes, aunque no inciden *per se* a mejorar la calidad del agua que finalmente entrará a la Laguna la Piedad.

Si la densidad de la población es de hasta 5,000 habitantes, es poco probable que se puedan obtener apoyos de los programas federales para construir una PTAR de 59 LPS, lo que sobrepasa lo estimado del requerimiento de ese número de habitantes que para una PTAR es de 5.96 LPS dado un suministro estimado de 184 L/hab/día de los que se considera que el 70% es vertido como agua residual, descrito en el apartado 5.2 de este trabajo. Esto debe considerarse para cualquier PTAR que se proponga, pues muchas de las PTAR del país se construyen en "*pari-passu*" con el Gobierno Federal, según la disponibilidad presupuestaria y la viabilidad de los proyectos o con programas de devolución de derechos. Por lo que es necesario implementar sistemas de colectores que permitan tener certeza sobre la población beneficiada, lo que mejoraría la oportunidad de recibir los citados recursos por parte de la entidad Federal correspondiente.



Tabla 26. Remoción del sistema de PTAR de la Estrategia 2.

PROPUESTA PTAR	Sistema de tratamiento	Parámetro	Concentración influente	% de remoción (Promedio)	Concentración efluente	LMP NOM-003-SEMARNAT-1997
Construcción PTAR, caudal de tratamiento 60 LPS	Lodos Activados	SST (mg/L)	90	91.5	7.65	20
		DBO <sub>5</sub> (mg/L)	89	89	9.79	20
		DQO (mg/L)	159	87.5	19.88	NA
		N NO <sub>3</sub> (mg/L)	0.02	17.5	0.03	NA
		N Total (mg/L)	63.521	35	41.29	20
		P Total (mg/L)	6.11	17.5	5.04	12
		Coliformes (NMP/100mL)	2.4X10 <sup>4</sup>	96.5	8.4X10 <sup>2</sup>	240

Enmarcados en rojo los parámetros que se encuentran fuera de los LMP.

Las PTAR convencionales en el Municipio se encuentran en su mayoría abandonadas, por falta de recursos para mantenimiento y reparaciones, entre otras causas, por lo que dejar de lado las infraestructuras ya construidas para hacer una única PTAR nueva, tiene un costo elevado de tener dos infraestructuras sin operar, así como el impacto al paisaje a la propia Laguna, aunque la puesta en marcha de esas dos infraestructuras existentes no contribuyen *per se* al mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna, aunque si al mejoramiento de la calidad del agua de los canales de riego y de los cultivos que se sirven de ellas. Esta propuesta solucionaría la situación actual de la Laguna, en cuanto a descarga de aguas residuales, aunque la afectación del paisaje podría generar el rechazo de la población que pugna por la recuperación del espacio como área de esparcimiento, además de que la mayoría de los predios que rodean la Laguna pertenecen a algún ejido, lo que puede complicar la adquisición del área requerida para la construcción de este tipo de infraestructura. Se pueden proponer otros reúsos para el agua que sale de la PTAR propuesta, como pueden ser riego agrícola y la recirculación de un volumen de la propia laguna, aunque en Nitrógeno Total incumple con la calidad establecida como LP para embalses naturales y artificiales en uso en suelos infiltración y otros riegos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 Y NOM-003-SEMARNAT-1997.

En la Tabla 27, se vierten los Costos de Inversión a precios de 2012 y actualizados a 2021.

Tabla 27. Costos de Inversión y Operación Anual del Escenario 2.

Acción	Precios 2012 (MDP)	Precios 2021 (MDP)
Construcción de nueva PTAR de 60 LPS.		78.0
Estimado de Factores necesarios para estar en condiciones de elaborar el diseño, la construcción y puesta en marcha de una PTAR		38.83
<b>Inversión Inicial</b>		<b>116.83</b>
Costos de nómina anual para 1 PTAR	2	2.83
Costo Aproximado Anual de Energía Eléctrica (1PTAR)	0.36	0.51
<b>Costos de Operación Anual</b>	<b>2.36</b>	<b>3.34</b>

Esta propuesta, no es susceptible de recibir apoyo de los programas federales, pues estos podrían aportar recursos en "*pari-passu*", siempre que se tratara de un volumen de acuerdo con la población servida que se estima en 5,000 habitantes, por lo que se podría proponer una PTAR con una capacidad de 5.96 LPS con posibilidad de ampliación, siempre y cuando se dejaran de verter las aguas residuales a los canales de riego y al propio río, como se hace actualmente y se condujeran

las aguas a través de un sistema de colectores que al momento no existe. Por lo que es necesario implementar sistemas de colectores que permitan tener certeza sobre la población beneficiada, lo que mejoraría la oportunidad de recibir los citados recursos por parte de la entidad Federal correspondiente.

### 6.2.3. Propuestas de mejoramiento y aprovechamiento del agua para la Laguna la Piedad: Escenario 3.

Construcción de una PTAR basada en tecnología de Humedales Artificiales con una capacidad de 2 LPS, en la margen noroeste de la Laguna la Piedad. Esta PTAR puede tratar de forma intermitente agua proveniente del río Barranca de Zamorillas y la Laguna la Piedad.

Sería susceptible de recibir apoyo en “*pari-passu*” de los programas federales, por ser de un volumen que trate parte del caudal de descarga correspondiente a una población de 5,000 habitantes con un gasto estimado de 184 L/hab/día de los que 70% sería descargado como agua residual por día que equivalen a una PTAR de 5.96 LPS, como se indicó en el apartado 5.2 de este trabajo.

Se eligió Escenario 3 esta tecnología dado que, al ser un Humedal Artificial, disminuyen los costos de operación, lo que la hace susceptible de mantenerse en operación, aun cuando *per se* no pueda a corto plazo limpiar el agua de la Laguna, siendo esta propuesta la que incide directamente sobre el cuerpo de agua. En la Figura 43 se vierte el esquema de tratamiento propuesto como Escenario 3.



Figura 43. Propuesta Escenario 3 para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020.

Dado el volumen del caudal de agua que entra a la Laguna la Piedad esta estrategia plantea que el humedal artificial trate agua directamente de la Laguna, la extracción se realizará con un sencillo

sistema de succión por bombas. Asimismo, se construiría un sistema de entrada a la PTAR que permita tomar agua del río Barranca de Zamorillas, que permita al sistema operar en caso de que el NAMO de la laguna bajara debajo del nivel en que se encuentre el sistema de succión, dado que en periodo de estiaje es empleada el agua de la Laguna para riego o cualquier otra situación imprevista que no permitiera la extracción de agua directamente de ese cuerpo y hacia el humedal artificial, de tal forma que siempre se cuente con agua para alimentar a la PTAR HA.

En la Tabla 28, se indican los porcentajes de remoción y la calidad del agua resultante una vez que el agua es tratada en la PTAR propuesta, se indican los porcentajes de remoción obtenidos de otras fuentes como la DQO cuyo porcentaje se obtuvo del promedio de Romero-Aguilar *et al.*, 2009.

Tabla 28. Remoción del sistema de PTAR de la Estrategia 3.

PROPUESTA PTAR	Sistema de tratamiento	Parámetro	Concentración influente	% de remoción (Promedio)	Concentración efluente	LP NOM-003-SEMARNAT-1997
Construcción PTAR, caudal de tratamiento 2 LPS	Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial	SST (mg/L)	90	90	9.00	20
		DBO <sub>5</sub> (mg/L)	89	85	13.35	20
		DQO (mg/L)	159	92.97	11.19	NA
		N NO <sub>3</sub> (mg/L)	0.02	0	0.02	NA
		N Total (mg/L)	63.521	42.50	36.56	20
		P Total (mg/L)	6.11	47.5	3.21	12
		Coliformes (NMP/100mL)	2.4X10 <sup>4</sup>	5 Log <sub>10</sub>	22	240

Enmarcados en rojo los parámetros que se encuentran fuera de los LMP.

Se observa que la capacidad de remoción de los humedales artificiales logra mejorar la calidad del agua hasta que esta cumpla con los LMP indicados en la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997.

Según el prontuario del IMTA de Aplicación de Costos Índice de PTAR (2012), para una PTAR de Humedal Artificial el costo de inversión se calcula como sigue:

$$Inversión = -1,722.7 + 3,453.2 \ln Q \text{ en miles de pesos.}$$

Es por lo anterior que se actualiza el precio obtenido para la construcción del HA según lo indicado mediante la aplicación de costos índice del IMTA de 2012 y actualizados a 2021, que es de: 0.67 MDP y que resulta en 0.95 MDP a precios de 2021 que así que se adiciona a los 38.83 MDP el valor de 0.95 MDP a precios de 2021, proponiendo un costo para el Estimado de factores necesarios para llevar a cabo el diseño, la construcción y puesta en operación de la PTAR o las PTAR propuestas en los diversos escenarios en 39.78 MDP a precios de 2021.

El Municipio ha considerado una inversión para la construcción de un humedal artificial de 38 MDP a precios de 2019, según los datos del convenio de colaboración administrativa y asesoría profesional para realizar el programa integral de agua y saneamiento del Lago ("La Piedad") No. OPDM/CJ/016/2019 de fecha 20 de noviembre del año 2019.

En la Tabla 29., se vierten los Costos de Inversión a precios de 2012, obtenidos mediante la aplicación de costos índice del IMTA de 2012 y actualizados a 2021.

Tabla 29. Costos de Inversión y Operación Anual del Escenario 3.

Acción	Precios 2012 (MDP)	Precios 2021 (MDP)
Inversión de una PTAR HA de 2 LPS	0.67	0.95
Estimado de Factores necesarios para llevar a cabo la construcción y puesta en marcha de la PTAR		38.83
<b>Inversión Inicial</b>	<b>0.67</b>	<b>39.78</b>
Costos de nómina anual para 1 PTAR	0.5	0.71
<b>Costos de Operación Anual</b>	<b>0.5</b>	<b>0.71</b>

Con un costo estimado de nómina anual de menos de 0.5 MDP a precios de 2012, por ser no mecanizada, además de los consumos de energía eléctrica que pueden abatirse al máximo si se considera un sistema de cribas manual y los niveles de diseño son adecuados para mover toda el agua por gravedad dentro del sistema. Aunque su costo ambiental sigue siendo alto, pues no es capaz, *per se* de mitigar el daño que actualmente se sigue haciendo a la Laguna.

Podría mejorar la situación actual de la Laguna en caso de verter el agua tratada, lo que impactaría positivamente a lo largo del tiempo pues no tiene la capacidad de tratar el total del agua que constantemente se vierte a la Laguna.

Un humedal artificial se puede aprovechar como pasaje turístico, además de que la obra no afecta el paisaje de la Laguna; se considera, por los cuestionarios aplicados, que podría tener buena aceptación por parte de los pobladores y podría impactar positivamente en el comercio local, produciendo otras fuentes de empleo.

Se puede reusar el agua en Riego o piscicultura o acuaponía, así como cultivar el propio humedal con flores de ornato, para buscar apoyar a la economía de los vecinos de la Laguna, pero estas acciones, por el volumen de agua tratada, coadyuvaría al mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad en el largo plazo y reduciría los costos de operación y mantenimiento del sistema, asociados al cultivo de la biomasa vegetal.

#### **6.2.4. Propuestas de Sanea mejoramiento y aprovechamiento del agua miento para la Laguna la Piedad: Escenario 4.**

Se propone la construcción del colector marginal que conduciría el agua por un ducto cerrado una distancia aproximada de 2.5 km con una capacidad que le permita transportar hasta 275 LPS hacia la PTAR Lago de Guadalupe, localizada en la margen izquierda del río Cuautitlán que según datos de la CONAGUA tiene una capacidad instalada de 500 LPS, que actualmente y desde la fecha de su construcción en el año 2017 se encuentra sin operar, por lo que será necesario considerar dentro de este escenario su puesta en marcha, para un caudal intermitente considerado como mínimo en tiempo de estiaje 60 LPS y hasta 275 LPS en esa misma temporada por apertura de la compuerta de la presa Lago de Guadalupe.

Además, se propone la construcción de una Obra de Retorno del Agua Tratada a la Laguna, que deberá regresar el agua desde la PTAR Lago de Guadalupe hacia la Laguna la Piedad, manteniendo

así el equilibrio hidrológico, aunque esta agua, por disposición geográfica, es factible de ser devuelta por la zona sur de la laguna y los efectos de este movimiento de agua podrán determinarse únicamente con el desarrollo de un estudio de batimetría de la Laguna. Esta obra de Retorno se propone en la misma capacidad de conducción que el Colector Marginal propuesto de 275 LPS.

Se mantiene la propuesta de construcción de un Humedal Artificial de 2 LPS en la zona noroeste de la Laguna, para pulimento del agua que será regresado a la misma laguna, este Humedal Artificial será alimentado por agua extraída directamente de la Laguna la Piedad y una vez tratada, será regresada a la Laguna, lo que a lo largo del tiempo mejorará la calidad del agua de dicha laguna, pues desviar el agua del río Barranca de Zamorillas lograría que se detuvieran las descargas de agua residual sin tratamiento a la Laguna, sin embargo, es necesario regresar esa agua que se deriva a una PTAR Nueva, instalada, pero que no ha sido operada desde el 2017 . En la Figura 44, se vierte el esquema de tratamiento propuesto como escenario 4.

Se eligió como Escenario 4 esta tecnología combinada dado que, se considera que construir el Humedal Artificial, para que trate el agua directamente del cuerpo de la Laguna, mientras se desvía el agua residual de tratamiento hacia una PTAR lograría mejorar en menor tiempo que el Escenario 3, la calidad del agua de la Laguna, contribuyendo así a su rescate, aunque esto eleva significativamente los costos de inversión y operación, pero aumenta el volumen tratado.

En la Tabla 30, se indican los porcentajes de remoción y la calidad del agua resultante una vez que el agua es tratada en la PTAR propuesta, los porcentajes de remoción obtenidos de otras fuentes como la DQO cuyo porcentaje se obtuvo del promedio de Romero-Aguilar *et al.* (2009).

Los valores de los parámetros marcados en rojo son aquellos que se encuentran fuera de los LMP según indican la NOM-001-SEMARNAT-1996 Y NOM-003-SEMARNAT-1997, los valores de remoción de Coliformes Fecales se obtienen de la Memoria de Cálculo del diseño del Humedal Artificial del Bosque de Aragón (Luna-Pabello *et al.*, 2019).

Tabla 30. Remoción del sistema de PTAR de la Estrategia 4.

PROPUESTA PTAR	Sistema de tratamiento	Parámetro	Concentración influente	% de remoción (Promedio)	Concentración efluente	LMP NOM-003-SEMARNAT-1997
Construcción PTAR, caudal de tratamiento 2 LPS	Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial	SST (mg/L)	90	90	9.00	20
		DBO <sub>5</sub> (mg/L)	89	85	13.35	20
		DQO (mg/L)	159	92.97	11.19	NA
		N NO <sub>3</sub> (mg/L)	0.02	0	0.02	NA
		N Total (mg/L)	63.521	42.50	36.56	20
		P Total (mg/L)	6.11	47.5	3.21	12
		Coliformes (NMP/100mL)	2.4X10 <sup>4</sup>	5 Log <sub>10</sub>	22	240
Puesta en marcha de la PTAR la Piedad o Lago de Guadalupe, caudal de tratamiento 300 LPS	Lodos Activados	SST (mg/L)	90.00	91.5	7.65	20
		DBO <sub>5</sub> (mg/L)	89.00	89	9.79	20
		DQO (mg/L)	159.00	87.5	19.88	NA
		N NO <sub>3</sub> (mg/L)	0.02	17.5	0.02	NA
		N Total (mg/L)	63.57	35	41.32	20
		P Total (mg/L)	6.11	17.5	5.04	12
		Coliformes (NMP/100mL)	2.4X10 <sup>4</sup>	96.5	8.4	240

Enmarcados en rojo los parámetros que se encuentran fuera de los LMP.



Figura 44. Propuesta Escenario 4 para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020.

Se observa que la capacidad de remoción de los Humedales Artificiales logra mejorar la calidad del agua hasta que esta cumpla con los LMP indicados en la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997.

En la Tabla 31, se vierten los Costos de Inversión obtenidos según el prontuario del IMTA de Aplicación de Costos Índice de PTAR (2012), para una PTAR HA y actualizados a 2021.

Tabla 31. Costos de Inversión y Operación Anual del Escenario 4.

Acción	Precios 2012 (MDP)	Precios 2021 (MDP)
Puesta en marcha de la PTAR Lago de Guadalupe		3.14
Inversión de una PTAR HA de 2 LPS	0.67	0.95
Estimado de Factores necesarios para llevar a cabo la construcción y puesta en marcha de la PTAR		38.83
Colector Marginal 275 LPS		4.19
Obra de Retorno del Agua Tratada 275 LPS		2.09
<b>Inversión Inicial</b>	<b>0.67</b>	<b>49.2</b>
Costos de nómina anual para 1 PTAR HA	0.5	0.71
Costo de nómina anual PTAR LA	2.3	3.26
Costo de Energía eléctrica Anual PTAR LA	0.5	0.71
<b>Costos de Operación Anual</b>	<b>3.3</b>	<b>4.68</b>

Con un costo de nómina anual de menos de 0.5 MDP, por ser no mecanizado para el HA y uno de 2.3 MDP para la PTAR Mecanizada, además de los consumos de energía eléctrica que se consideran únicamente para la PTAR Lago de Guadalupe con un estimado de hasta \$45,000 pesos mensuales. Según la aplicación de costos índice de plantas de tratamiento de aguas residuales del IMTA del año 2012.

El costo de la puesta en marcha de la PTAR Lago de Guadalupe es de 3.14 MDP es el propuesto por el municipio según los datos del convenio de colaboración administrativa y asesoría profesional para realizar el programa integral de agua y saneamiento del Lago (“La Piedad”) No. OPDM/CJ/016/2019 de fecha 20 de noviembre del año 2019 que es de 3 MDP y actualizado a 2021.

Esto mejoraría la situación actual de la Laguna pues se considera el tratamiento del total del agua que se vierte sin tratamiento. Además de aprovechar infraestructura existente y que nunca ha operado, sin embargo, es muy importante considerar y llevar a cabo a obra de retorno del agua a la laguna una vez que esta haya sido tratada. Lo anterior, supone la necesidad de un sistema de bombeo para vencer la carga hidráulica que se estima en 9 m, lo que aumenta considerablemente los costos de operación del sistema.

Como se mencionó previamente, el humedal artificial, al tener una apariencia natural, resulta afín al paisaje natural de la Laguna y en conjunto, puede traducirse en un atractivo turístico. Por lo tanto, esta infraestructura se puede considerar como un impacto leve al medio ambiente de la propia Laguna. Además de las consideraciones mencionadas, que suponen la buena aceptación por parte de los pobladores, el mejoramiento de la calidad de agua de la propia Laguna impacta positivamente al reducir las emisiones de dióxido de carbono y metano, así como en la reducción de su nivel de eutroficación, facilitando así su uso en potras actividades de interés para los habitantes de la zona. Por ejemplo, se puede reusar el agua en riego agrícola, piscicultura o acuaponía. También se puede cultivar el propio humedal artificial con flores de ornato y plantas forrajeras, entre otros. Estos cultivos permitirían apoyar igualmente la economía de los vecinos de la Laguna, sobre todo con el agua proveniente de la PTAR Lago de Guadalupe. En este sentido, debe considerarse un determinado volumen de agua para alimentar a la Laguna la Piedad, a efecto de evitar el abatimiento de su nivel, por lo que resulta indispensable que exista una obra hidráulica que permita el retorno de agua tratada a la Laguna.

#### **6.2.5. Propuestas de mejoramiento y aprovechamiento del agua para la Laguna la Piedad: Escenario 5.**

La propuesta del Escenario 5 adiciona a la propuesta anterior, denominada escenario 4, una Planta Potabilizadora que sería capaz de potabilizar hasta 2 LPS de Agua de conformidad con los LMP de la modificación a la NOM-127-SSA1-1994. *Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.*



Figura 45. Propuesta Escenario 5 para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020.

La propuesta, al igual que el Escenario 4, considera la puesta en marcha la PTAR Lago de Guadalupe, para lo que se requiere la construcción de un colector marginal que lleve agua residual del río Barranca de Zamorillas, aguas debajo del sitio denominado acueducto considerando una tubería que pueda conducir desde 60 LPS y hasta 275 LPS, considerando que una vez que el agua se haya tratado en la PTAR Lago de Guadalupe, esta será devuelta a la Laguna por medio de un sistema denominado: Retorno a la Laguna, venciendo una carga de 9m de altura por una tubería que podría llevar esa agua de vuelta hasta la parte sur de la Laguna la Piedad. En la zona noroeste de la Laguna la Piedad, se considera la construcción de un humedal artificial que puede alimentarse directamente del agua de la Laguna la Piedad, con una capacidad de 2 LPS, esta agua tratada, por su calidad, puede ser tratada adicionalmente, por un sistema de Potabilización de hasta 2 LPS, construido inmediatamente después de la PTAR HA, contribuyendo así al abatimiento del estrés hídrico que se sufre en la zona de la Laguna, como se puede ver en la Figura 45.

En la Tabla 32., se vierten los Costos de Inversión calculados a precios de 2012 y actualizados a 2021.

Tabla 32. Costos de Inversión y Operación Anual del Escenario 5.

Acción	Precios 2012 (MDP)	Precios 2019 (MDP)	Precios 2021 (MDP)
Puesta en marcha de la PTAR Lago de Guadalupe		3	3.14
Humedal Artificial de 2LPS		38	39.78
Colector Marginal 275 LPS		4	4.19
Obra de Retorno del Agua Tratada 275 LPS		2	2.09
Construcción de una PP 2 LPS		4	4.19
<b>Inversión Inicial</b>	<b>0.67</b>	<b>51</b>	<b>53.39</b>
Costos de nómina anual para 1 PTAR HA	0.50		0.71
Costo de nómina anual PTAR LA	2.30		3.26
Costo de Energía eléctrica Anual PTAR LA	0.50		0.71
Costo de operación de una PP			4.00
<b>Costos de Operación Anual</b>	<b>3.30</b>		<b>6.68</b>

Se estima un costo de nómina anual de menos de 0.5 MDP, por ser no mecanizado para el HA y uno de 2.3 MDP para la PTAR Mecanizada, además de los consumos de energía eléctrica que se consideran únicamente para la PTAR Lago de Guadalupe con un estimado de hasta 45,000 pesos mensuales. Según la aplicación de costos índice de plantas de tratamiento de aguas residuales del IMTA del año 2012.

El costo de construir una PP de 2 LPS puede ascender hasta a 4 MDP, más los costos de operación que también pueden aumentar por el uso de químicos como floculantes, según la tecnología que se seleccione. Se considera viable, pero aumenta los costos de inversión, operación y mantenimiento. Aunque según la CONAGUA, el consumo diario por persona está estimado en 184 L/hab/día, como se explicó en el apartado 5.2 de este trabajo, por lo que para abastecer a una población de aproximadamente 5,000 habitantes serían necesarios al menos 920,000 Litros de agua potable por día, lo que equivale a 10.64 LPS, así que considerando esa necesidad de agua por persona se considera que una Planta Potabilizadora de 2 LPS, contribuiría al abastecimiento de agua potable.

Se considera que esta planta potabilizadora, podría tener algún rechazo de las personas, sería necesario una campaña de educación y cultura para que la población aceptara un proyecto de esta naturaleza.

### 6.3. Desarrollo de una propuesta técnica, económica y ambiental de una alternativa integral a nivel conceptual para el mejoramiento y aprovechamiento de agua de la Laguna la Piedad.

Una propuesta técnica, económica y ambiental de una alternativa integral a nivel conceptual para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad, es necesario conjuntar todos los escenarios, que resultarían en una propuesta integral que, de realizarse, podría llevarse a cabo en diversas etapas. Sin embargo, no se garantiza que la propuesta integral pudiera operarse y mantenerse, por lo que la propuesta integral corre el riesgo de convertirse en otra serie de acciones que finalmente terminan abandonadas y resultan en inversiones que finalmente no se recuperan, pues los cuerpos de agua continuarían siendo contaminados.

Durante el proceso de recolección de la información disponible, la generación y proceso de los datos obtenidos, se observó que la Laguna de la Piedad es un cuerpo de agua léntico, que cuenta con un bordo que la convierte en un sistema de almacenamiento de agua residual, principalmente de tipo municipal que se utiliza para riego de parcelas, principalmente de alfalfa y avena. Es importante denotar que debido a la condición dinámica del agua que constantemente entra y sale de la Laguna, es necesario hacer una propuesta que permita atender en su totalidad las variaciones que dichos dinamismos dan a la Laguna.

Me refiero principalmente a la intermitencia del agua que entra a la laguna, pues los volúmenes encontrados durante los periodos de lluvia y estiaje son en extremo variables, lo que no es común para otros cuerpos de agua de este tipo. Aunado a la falta de sistemas de alcantarillado (que fuerzan las aguas residuales a través del río y los canales de riego). La lucha constante de los vecinos por mantener el canal de agua pluvial despejado y recibiendo únicamente este tipo de aportaciones correspondientes a la temporada de lluvia. La realidad del OO del municipio respecto de su capacidad para obtener los apoyos federales para la construcción de nueva infraestructura, y sobre todo, la capacidad efectiva del OO de mantener en operación la infraestructura existente. Las múltiples propuestas de mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna provenientes de los vecinos, con apoyo de los actores sociales interesados, el municipio y el convenio realizado con entes externos y del Estado de México, generan propuestas que es necesario tomar en consideración y que implican inversiones que los responsables de las descargas de aguas residuales a los cuerpos de agua nacionales (Apartado III. Inciso a) del Art. 115 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos), tienen que efectuar y que no cuentan con los recursos para hacerlo.

Se encontró que el volumen efectivo de agua residual que, sin tratamiento, entra a la laguna, es de aproximadamente 60 LPS, por lo que se puede asumir de forma simple, que una PTAR con esa capacidad sería capaz de sanear el total del agua residual que entra a la laguna. Sin embargo, hay que considerar que el OO ya tiene 3 PTAR convencionales en la zona, que se encuentran sin operar por falta de infraestructura de colectores que conduzcan el agua a la PTAR, falta de mantenimiento, refaccionamiento y abandono, por lo que es necesario proponer un sistema de tratamiento que garantice su operación, principalmente asociados a los costos de operación y mantenimiento.

Haciendo todas estas consideraciones es que se efectúa esta propuesta integral, misma que cuenta con todos los elementos propuestos que de realizarse correctamente, permitirían el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad y la atención de la intermitencia extrema que sucede durante los periodos de lluvia y estiaje que se ve sumamente afectada por la apertura de la compuerta de la presa Lago de Guadalupe, que son:

- Un HA con capacidad de 2 LPS que trate el agua directamente de la Laguna, esta agua puede ser enviada a una Planta Potabilizadora, para mitigar el estrés hídrico de los habitantes del área circundante,
- una PTAR LA con capacidad de 60 LPS que capture el agua antes de que llegue a la Laguna la Piedad y pueda devolverla tratada al cauce,
- la reconstrucción de la PTAR Lomas de Cuautitlán,
- la rehabilitación de la PTAR La Piedad II,

- construcción de un colector marginal que conduzca el agua residual sin tratar del río barranca de Zamorillas hasta la PTAR Lago de Guadalupe, incluido el volumen que llega durante las lluvias y la temporada de apertura de compuerta de la Presa Lago de Guadalupe,
- estabilización y operación de 1 tren de tratamiento de la PTAR Lago de Guadalupe,
- construcción de sistema de bombeo que venza la carga hidráulica de 9 metros, para conducir el agua tratada en la PTAR Lago de Guadalupe de regreso a la Laguna la Piedad,
- construcción de la obra de retorno de agua tratada a la Laguna, siendo esta obra imprescindible para que el agua sea conducida de regreso a la laguna, para evitar su abatimiento por trasvase.

En la Tabla 33, se puede ver la inversión total de la propuesta integral de mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad.

*Tabla 33. Costos de inversión total de la propuesta integral de mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad.*

Acción	Precios 2021 (MDP)
Reconstrucción de la PTAR Lomas de Cuautitlán.	20.80
Rehabilitación de la PTAR La Piedad II	27.20
Construcción de nueva PTAR LA de 60 LPS	78
Inversión de una PTAR HA de 2 LPS	0.95
Puesta en marcha de la PTAR la Lago de Guadalupe	3.14
Estimado de factores necesarios para llevar a cabo la construcción y puesta en marcha de las PTAR HA y PTAR LA	77.66
Colector Marginal 275 LPS	4.19
Obra de Retorno de Agua Tratada 275 LPS	2.09
Construcción de una PPA de 2 LPS	4.19
<b>Inversión Total</b>	<b>218.22</b>
Costos de nómina anual para las PTAR y PP	12.80
Costo Aproximado Anual de Energía Eléctrica (3PTAR y 1 PPA)	2.540
<b>Costos de Operación Anual</b>	<b>15.34</b>

La propuesta integral de mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad se ilustra en la Figura 46 y consta de los siguientes elementos:

1. Rehabilitación de la PTAR La Piedad II, 27.2 MDP.
2. Reconstrucción de la PTAR Lomas de Cuautitlán, 20.8 MDP.
3. Construcción de nueva PTAR LA de 60 LPS, 78 MDP.
4. Inversión de una PTAR HA de 2 LPS, 0.95 MDP.
5. Puesta en marcha de la PTAR la Lago de Guadalupe, 3.14 MDP.
6. Estimado de factores necesarios para llevar a cabo la construcción y puesta en marcha de las PTAR, 77.66 MDP.
7. Construcción del colector Marginal 275 LPS, 4.19 MDP.
8. Construcción de la Obra hidráulica de Retorno de Agua Tratada 275 LPS, 2.09 MDP.
9. Construcción de una PPA de 2 LPS, 4.19 MDP.



Figura 46. propuesta integral de mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020.

Es importante para los sistemas de mejoramiento y aprovechamiento del agua considerar la construcción de colectores y separar el agua de los cauces y/o canales de las aguas residuales. Idealmente, se esperaría que se contará con este tipo de infraestructura, lo que otorgaría el volumen del caudal a tratar que corresponde exclusivamente a las aguas residuales, lo que coadyuvaría a mantener los cauces en mejores condiciones.

Cuando un OO pide apoyo de los Programas Federales, este apoyo se otorga en “*pari-passu*” con la contraparte del OO y el gobierno Federal, sin embargo, de conformidad con las propias Reglas de Operación, no es posible otorgar recursos para diseño y construcción de PTAR que sirvan para tratar un caudal mayor a la población servida, lo que podría cambiar si se diseña el sistema de colectores que pudiera recolectar esa agua hacia la PTAR LA de 60 LPS, pero al momento, no es susceptible para otorgar esos recursos, además de que no se cuenta con la red de colectores, por lo que esa también podría ser una de las acciones por las cuales el OO podría solicitar recursos.

El costo total de la inversión del Escenario cero, se considera el más elevado y para calcularlo, se han considerado los siguientes aspectos, para lo que se calculó el volumen de agua residual sin tratamiento estimado que se ha vertido por un periodo de 20 años:

1. Considerando que constantemente se están vertiendo 59.125 LPS, que resultan en:  $1.84 \times 10^9$  Litros de agua por año o  $1.84 \times 10^6$  m<sup>3</sup> por año.
2. Se puede considerar que anualmente se han vertido aproximadamente  $3.68 \times 10^{10}$  Litros de agua residual sin tratar por 20 años.
3. Aun cuando no se localizaron, se asumirá que el municipio cuenta con el registro de los permisos de descarga de aguas residuales a un cuerpo receptor, como indica el Art. 192 fracción II de la Ley Federal de Derechos. En cuyo caso, es posible determinar el monto de los pagos trimestrales por concepto de descarga que por 20 años pagarían por el volumen descargado al cuerpo de la Laguna la Piedad.
4. Si el pago trimestral por m<sup>3</sup> descargado para el municipio aun cuerpo receptor tipo B es de \$2.13 según se indica en el art. 277-B de la LFD, entonces por año por el volumen descargado, el municipio debería haber pagado: \$15,676,800 pesos que, por 20 años, se pueden estimar en: 313.536 MDP.

Considerando que la CONAGUA, cuenta con el Programa de Saneamiento de Aguas Residuales (PROSANEAR), el cual permite que los montos pagados por derechos sean devueltos para obra de saneamiento, es posible asumir que el municipio podría tener la infraestructura para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la laguna actualmente en operación, por lo que el costo de no tener la infraestructura, se puede evaluar en 313.536 MDP hasta el año 2021 y anualmente se pueden ir adicionando aproximadamente 15.676 MDP, en tanto se siga sin sanear el agua que actualmente entra a la laguna sin tratamiento.

Aunado a este costo, se tienen los intangibles que no pueden cuantificarse, a los que podría adicionarse el costo de la pesca que no se realiza, por la muerte documentada de los peces en el lugar, así como el desaprovechamiento de una zona que podría ser de esparcimiento y recreación, generando recursos a los habitantes de las localidades cercanas, además de que podrían obtenerse cultivos de mejor calidad con mayor plusvalía que los forrajes y el producto de riego de temporal que actualmente se obtiene en la zona, más el costo de año tras año tener un cuerpo de agua eutrofizado que no produce beneficios y no puede ser aprovechado, aunado a la afectación al entorno, sumado a las personas que no pueden beneficiarse de este cuerpo de agua, pero que si están en riesgo de padecer enfermedades o infecciones por causa de las condiciones de insalubridad que prevalecen en la Laguna y finalmente las aportaciones de Gases de Efecto Invernadero que no son aprovechados y siguen siendo emitidos a la atmosfera, impactando así en el cambio climático.

Todas las consideraciones anteriores son de importancia para el desarrollo del escenario a elegir, por lo que se llevó a cabo una comparativa de los datos generados de escenarios sugeridos para lo que se empleó la Tabla 34.

Tabla 34. Comparativa de datos obtenidos en los escenarios. Elaboración propia.

	Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
Litros tratados LPS a riego indirecto a la Laguna	0	30	0	0	0	0
Litros tratados LPS a riego directo a la Laguna	0	59	60	2	277	277
Potabilización de 2LPS de agua tratada	0	0	0	0	0	2
Obras complementarias	NO	NO	NO	NO	SI	SI
Inversión total MDP	313.536	163.53	116.83	39.78	49.2	53.39
Emisiones de Gases de Efecto invernadero	Muy Alto	Alto	Alto	Muy Alto	Bajo	Bajo
Costo Anual de Operación MDP	15.67	9.83	3.34	0.71	4.68	6.68
Cumple con la NOM-001-SEMARNAT-1996	NO	Incumple en DBOs, N <sub>Total</sub> y Coliformes	Incumple en N <sub>Total</sub> y Coliformes	Cumple con la NOM	Incumple en N <sub>Total</sub> y Coliformes	Incumple en N <sub>Total</sub> y Coliformes
Economía (Turismo, agricultura, pesca)	NO	Agricultura y pesca	Agricultura y pesca	Turismo, agricultura, acuaponía y pesca	Turismo, agricultura, acuaponía y pesca	Turismo, agricultura, acuaponía y pesca

Una vez planteadas los 5 Escenarios y establecido el Escenario 0, se puede llevar a cabo el análisis de estas en conjunto, considerando: los costos ambientales, costos índices de inversión, aceptación de la comunidad, así como costos de infraestructura sin operar, entre otros; otorgando a cada rubro una ponderación del 0 al 4, según los siguientes valores:

- Nulo 0
- Bajo 1
- Regular 2
- Alto 3
- Muy Alto 4

Esta asignación de valores permite generar una nueva matriz de análisis de los escenarios, lo que hace posible determinar por puntaje la mejor Estrategia para sanear a la Laguna la Piedad, siendo 0 la opción menos viable y la más viable podría acercarse a un valor de hasta 44 puntos.

Para otorgar la ponderación se están tomando en consideración:

- La información disponible al respecto del sitio,
- los cuestionarios realizados a los vecinos y
- la experiencia propia en sistemas de tratamiento y su implementación en comunidades similares,
- el abandono de las PTAR por OO y Municipios y las razones por las cuales estas han dejado de operar.

En la Tabla 35, se vierten los diferentes Escenarios analizados para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna, incluyendo infraestructura existente e infraestructura nueva, como resultado se puede sugerir la mejor opción en cuanto a costo-beneficio y viabilidad

como el **Escenario 3** que obtuvo 34 puntos, pues si bien, no mitiga de forma inmediata el daño a la Laguna, es viable de realizarse en el corto plazo y mantenerse en operación a lo largo del tiempo.

Según la Matriz de Viabilidad de Escenarios (Tabla 35) la viabilidad para la construcción y puesta en operación de los escenarios es como sigue:

1. **Escenario 3** con 34 puntos,
2. **Escenario 2** con 27 puntos,
3. **Escenario 5** con 26 puntos,
4. **Escenario 4** con 24 puntos
5. **Escenario 1** con 23 puntos.

Tabla 35. Matriz de viabilidad de Escenarios. Elaboración Propia.

	Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
1.- Beneficio ambiental a corto plazo	0	3	3	1	4	4
2.- Aprovechamiento de infraestructura existente que favorezca al cuerpo receptor	0	2	0	0	3	3
3.- Facilidad de disponer del monto de inversión inicial	0	2	3	4	1	1
4.- Facilidad de disponer del recurso para gastos de operación	0	2	3	4	2	2
5.- Facilidad de operación del sistema	0	1	3	4	1	1
6.- Impacto positivo sobre el área	0	2	2	4	2	3
7.- Aceptación de la comunidad	0	1	2	4	2	3
8.- Mitigación del daño ambiental a lo largo del tiempo	0	3	3	1	3	3
9.- Capacidad de remoción de contaminantes	0	3	3	4	3	3
10.- Capacidad de contribuir a la mitigación del cambio climático	0	2	2	4	1	1
11.- Capacidad del OO de opera	0	2	3	4	1	1
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>23</b>	<b>27</b>	<b>34</b>	<b>24</b>	<b>26</b>

El escenario más viable se enmarca en rojo.

A continuación, se describen las consideraciones empleadas para determinar las ponderaciones otorgadas a cada rubro:

1. **Beneficio ambiental a corto plazo:** Según la capacidad del volumen a tratar y la capacidad de remoción de nutrientes, se considera el tiempo en que podrá apreciarse un beneficio a la Laguna. A mayor volumen y capacidad de remoción de nutrientes, menor será el tiempo en el que podrá verse este beneficio.
2. **Aprovechamiento de infraestructura existente que favorezca al cuerpo receptor:** Se considera que el aprovechamiento de la infraestructura existente es importante, pues tener infraestructura ociosa ocasiona daños en la propia infraestructura y equipamiento por falta de uso, puntos de reunión de vándalos y mayor inseguridad en la zona, para evitar esto los organismos operadores deben pagar para mantener las infraestructuras y servicios, aun cuando no se esté obteniendo un beneficio de ellas. De las PTAR localizadas en la zona, solo una de ellas es totalmente funcional y podría tratar el total del caudal del agua que entra a la laguna, aunque esto requiere de otras inversiones y transporte de agua desde el río

Barranca de Zamorillas y después de la PTAR al cuerpo de la Laguna, lo que aumenta los costos de operación y mantenimiento, las otras 2 PTAR no coadyuvan directamente en la mitigación del daño a la propia Laguna, aunque mejoran la calidad del agua del influente y pueden ser aprovechadas por las zonas de riego aguas arriba de la propia Laguna.

3. **Facilidad de disponer del monto de inversión:** es más difícil contar con recursos para comunidades con menos habitantes que para comunidades mayores, donde el costo político de no llevar a cabo las obras puede ser mayor que en lugares pequeños como este, sin embargo, se considera que tiene más oportunidad un Humedal Artificial, si se destacan adecuadamente sus ventajas.
4. **Facilidad de disponer del recurso para gastos de operación:** De acuerdo con la propia experiencia, se considera que las comunidades con menos habitantes cuentan con menos recursos para llevar a cabo las obras necesarias, pues el costo político de no hacerlas es menor que en lugares con mayor número de habitantes. Mientras que se hacen inversiones millonarias para sanear lugares como la Ciudad de México que cuenta con la PTAR de Atotonilco y la Zona metropolitana de Guadalajara que tiene las macro plantas denominadas PTAR el Ahogado y PTAR Agua Prieta, está el otro lado de la moneda, donde para una comunidad como esta, es difícil obtener apoyo del gobierno federal, pues se complica a los Organismos Operadores o a los responsables, el contar con la contraparte y más aún, si se instalan muchas de estas infraestructuras estas son abandonadas, por los altos costos de operación de tecnologías como son los Lodos Activados para caudales arriba de 30 LPS o las PTAR Paquete para volúmenes pequeños. Sin embargo, es necesario hacer estas grandes inversiones y es igual de importante invertir en otras más pequeñas, muchas de las PTAR que han dejado de operar se deben, por ejemplo, a la falta de recursos para el pago de energía eléctrica y reequipamientos.
5. **Facilidad de operación del sistema:** Un sistema de PTAR, se considera fácil de operar cuando requiere menos personal especializado, por lo que este rubro es importante a la hora de querer comparar las tecnologías como un Humedal Artificial contra una tecnología de Lodos Activados, pues la facilidad de operar de un sistema a otro se traduce en gastos de operación dados los requerimientos del sistema, además de la citada especialización del personal.
6. **Impacto positivo sobre el área:** Para este caso la ponderación se asigna según el impacto positivo del área a afectar, considerándose que la infraestructura nueva requiere impactar superficie adicional a la ya impactada, mientras que la infraestructura existente no afectaría mayor área, además, para la construcción del sistema de un HA, se cuenta con el área norte, además de que un HA se basa en sistemas naturales de depuración por lo que el área nueva afectada se considera mucho menor para este caso. Es importante que, en este caso, tener una PTAR de tecnología de lodos activados, afectaría el paisaje con la obra civil principalmente y requeriría de nueva y costosa infraestructura como acometidas eléctricas, un sitio de disposición de lodos, lo que en general afecta negativamente al área, mientras que el humedal artificial, no requiere de un sistema de disposición de lodos y pueden elegirse plantas de ornato, que permitirían mejorar el paisaje y su construcción impacta mucho menos sobre el área y su infraestructura es más ligera.
7. **Aceptación de la comunidad:** La comunidad ha manifestado su deseo de rescatar esa área como de esparcimiento, por lo que un sistema de tratamiento que permita esto, sería

adecuado para facilitar su aceptación. Las personas de la comunidad además tienen la experiencia de las PTAR de la zona que están sin operar y que han sido abandonadas, por lo que se considera que un humedal artificial tendría mejor aceptación, pues aunado a esto, se ha venido planteando la idea de este a la comunidad, por parte de los actores sociales locales y de OPERAGUA OO del municipio de Cuautitlán Izcalli.

8. **Mitigación del daño ambiental:** Se considera que el volumen a tratar y los sistemas de tratamiento propuestos, por sí mismos, contribuyen a la mitigación del daño ambiental, aunque con la consideración de que, a mayor volumen tratado, mayor mitigación del daño. Una PTAR LA mitiga el daño ambiental de forma más a corto plazo que una PTAR HA, dada la capacidad de volumen a tratar, sin embargo, un humedal artificial, tendrá una mejor capacidad de remoción de nutrientes.
9. **Capacidad de remoción de contaminantes:** La capacidad de los sistemas propuestos para eliminar contaminantes y remover nutrientes. Los sistemas comparados, independientemente del volumen a tratar, tienen diferentes capacidades, siendo la mejor remoción la que se puede obtener a través de los Humedales Artificiales, que la de una PTAR LA, por lo que emplear las Tecnologías de humedales artificiales, en este rubro es una ventaja sobre otras tecnologías.
10. **Capacidad de contribuir a mitigar el calentamiento global:** La capacidad de los sistemas propuestos de capturar carbono atmosférico para mitigar el cambio climático. Una PTAR de Humedal artificial, independientemente del volumen tratado, contribuye más para mitigar el calentamiento global, pues disminuye mucho en su operación la generación de gases de efecto invernadero, contra una PTAR LA que, por su simple consumo eléctrico, contribuiría al calentamiento global por la generación de dichos gases.
11. **Capacidad del OO de operar la propuesta:** Se considera que, según el tamaño de la población, es que el OO tendrá la capacidad de operar, pues este puede implementar mecanismos de cobro del agua tratada, para mitigar el daño. Para el caso de la PTAR Lago de Guadalupe, no se considera que el OO tenga capacidad para operar esta PTAR pues es de la CAEM, que es el ente estatal y que puede tener mayor capacidad de operación que el OO. Sin embargo, como la responsabilidad es del OO, por ser el municipio quien debería tratar esas aguas residuales, se considera que una PTAR HA, sería más factible de operar por sus bajos costos de operación y mantenimiento, respecto de una PTAR LA.

El total de los escenarios planteados, en conjunto, serán capaces de sanear el agua de la laguna, por lo que se propone que el **Escenario 3** sea realizado como una **Primera Etapa** y según las ponderaciones otorgadas en la Matriz de Viabilidad de Escenarios se proponen las siguientes etapas, que incluyen los diversos escenarios como sigue:

- **Primera Etapa** considera el diseño, la construcción y puesta en operación del **Escenario 3** que considera la una PTAR HA con una capacidad de 2 LPS y un caudal máximo extraordinario de 4 LPS, que tomaría el agua directamente de la Laguna la Piedad a través de un sistema de bombeo, que puede contar un sistema de rejillas de limpieza manual por el que pase el agua requerida para alimentar a la PTAR HA. En caso de que esta bajara tanto su nivel que cambiara demasiado la calidad del agua pudiera operarse el HA alimentándose

del agua del río Barranca de Zamorillas, antes de que el volumen de agua que puede tratar la PTAR HA entre a la Laguna la Piedad.

Al momento de analizar el **Escenario 3** que considera la PTAR con menor capacidad de tratamiento, correspondiente a la planta de humedal artificial, es necesario reafirmar que, como una **Primera Etapa**, la realización de este sistema es más viable de construirse y de operar.

- **Segunda Etapa** considera el diseño, construcción y puesta en operación del **Escenario 2**, que considera la construcción de una PTAR LA de 60 LPS que trataría el agua que entra a la Laguna la Piedad por el río Barranca de Zamorillas y que podría construirse antes del Humedal artificial, así una vez que la Laguna dejara de requerir el humedal artificial, que extrae el agua directamente de ella, este pueda servir para pulimento de 2 LPS el agua de la PTAR LA, mejorando su calidad y dándole la oportunidad de otros reúsos. Así con el **Escenario 2** y **Escenario 3** en operación se trataría también el agua que se calcula es el volumen de agua residual que actualmente entra a la Laguna de 60LPS.
- **Tercera Etapa** se podría realizar parte del **Escenario 5**, que considera el Humedal artificial de 2 LPS y un gasto máximo extraordinario de 4 LPS construido en la **Primera Etapa**, por lo que se llevaría a cabo en esta etapa el diseño, construcción y puesta en operación del Colector Marginal haciendo una breve variación que tomaría el excedente de agua que no puede ser tratado en la PTAR LA de 60 LPS y lo conduciría a la PTAR Lago de Guadalupe, el Sistema de Obra Hidráulica de Retorno del Agua Tratada de la PTAR Lago de Guadalupe a la parte sur de la Laguna la Piedad venciendo por medio de un sistema de bombas una carga hidráulica de 9 m. Incorporando después del humedal artificial una planta potabilizadora, capaz de potabilizar los 2LPS que se obtienen de esa PTAR, pudiendo poner esa cantidad de agua a disposición de la comunidad.  
En esta etapa se incrementarían los costos de operación, dado el sistema de bombas para regresar el agua de la PTAR Lago de Guadalupe a la Laguna La Piedad y vencer una carga hidráulica, además de que la PTAR Lago de Guadalupe está diseñada para 500 LPS y a través del colector marginal se podrían enviar hasta 275 LPS, pero hay momentos del año en que ese caudal en el río Barranca de Zamorillas no alcanza los 275 LPS, por lo que la estabilización y operación de la denominada "*macro planta*" requeriría de mucha atención y personal especializado, dada la intermitencia de los caudales.
- Una vez concluida la **Tercera Etapa**, se habrá ejecutado el **Escenario 4**.
- **Cuarta Etapa** completar el **Escenario 1** con la reconstrucción de la PTAR Lomas de Cuautitlán y la rehabilitación de la PTAR La Piedad II, pues la PTAR LA de 60 LPS obvia la necesidad de otra PTAR LA de 59 LPS.

Estas etapas pueden llevarse a cabo a lo largo del tiempo, considerando bajo un programa de inversiones que sea realista para la capacidad financiera del OO, según las participaciones que reciba del gobierno del estado. La realización de todas las etapas, permitirá el mejoramiento y aprovechamiento del agua del agua de la Laguna la Piedad.

De conformidad con la Matriz de Viabilidad de Escenarios, la mayor ponderación la obtiene el **Escenario 3**, por lo que se eligió este como la **primera etapa**. Este es el escenario a partir del cual se

desarrollará la estrategia de una propuesta conceptual de mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna. Esto dado las ponderaciones vertidas en la matriz que, en los rubros anteriores, alcanza una tecnología de humedal artificial respecto de una tecnología de lodos activados, independientemente del volumen de agua tratado. Las consideraciones con mejor valoración para humedales artificiales son:

1. Facilidad de disponer del monto de inversión inicial para una comunidad.
2. Facilidad de disponer del recurso para gastos de operación.
3. Facilidad de operación del sistema.
4. Impacto positivo sobre el área.
5. Aceptación de la comunidad.
6. Capacidad de remoción de contaminantes.
7. Capacidad de contribuir al calentamiento global y
8. Capacidad del OO de operar la propuesta.

### 6.3.1. Desarrollo de la propuesta técnica a nivel conceptual del Escenario 3 seleccionado.

Al tratarse de aguas residuales, es necesario considerar la calidad del agua del sitio en el que se interceptará el flujo del río Barranca de Zamorillas que según la Tabla 18, corresponde al Sitio 1 (Figura 35.). El agua que alimentará la PTAR HA provendrá directamente del Cuerpo de la Laguna la Piedad, y será tomado mediante una manguera de neopreno de 4" de diámetro, y se conducirá desde un punto 30 metros aguas adentro del NAME. A la entrada de la PTAR se contará con una pequeña caseta que pueda albergar hasta dos bombas de succión de 2 HP para 4 in, que puedan trabajar en *by pass*, de tal forma que sean capaces de alimentar de forma constante la PTAR HA.

Tomar el agua directamente del cuerpo de agua, permite obviar las rejillas pues al momento de la succión, la rejilla puede colocarse en el inicio de la succión de la manguera, que no permitiría el paso de material superior a la apertura de la rejilla. Requeriría de un mantenimiento periódico, para asegurarse que las rejillas rodeando la succión no se saturen y permitan el libre flujo de agua. El agua extraída de la laguna puede conducirse hacia el canal Parshall para medir el Caudal y de ahí hacia un tanque de cambio de régimen que permita la alimentación de la PTAR HA a una velocidad de entrada controlada. El sistema de bombas de succión sería el requerimiento más elevado del consumo eléctrico del sistema de tratamiento, pues todo lo demás fluiría por gravedad dentro del HA diseñado para fluir de forma subsuperficial.

#### 6.3.1.1. Humedal artificial de flujo subsuperficial

El sistema de tratamiento tipo HAFSS comienza con la determinación del volumen de diseño conceptual del sistema y la elección del sitio para la colocación del sistema de tratamiento, que es además el espacio disponible, así como la calidad del agua del influente y las cargas de

contaminantes (Ver Tabla 15, Sitio 1). Con base a lo anterior, se fijó una capacidad depuradora del HAFSS en 172.8 m<sup>3</sup>/d. La concentración de contaminantes en el influente, consideradas para su diseño se indican en la Tabla 36.

*Tabla 36. Concentración de contaminantes en el influente del sistema.*

PARÁMETROS	Valores
Flujo (m <sup>3</sup> /d)	172.8
Flujo (LPS)	2.00
pH	6.63
Temperatura (°C)	19.48
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	90.00
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	89.00
Nitrógeno total (mg/L)	63.574
Fósforo total (mg/L)	6.108
Coliformes fecales (NMP/100mL)	≥24,000

El predio previsto para la construcción del humedal artificial se encuentra localizado en la parte noroeste de la Laguna la Piedad, en el sitio de la entrada del agua proveniente del río Barranca de Zamorillas a la Laguna, en las coordenadas de 19°39'47.15"N y 99°14'10.33"O, se propone el uso de un área de 4,057 m<sup>2</sup>. En la Figura 47, se ilustra la localización del predio elegido para la construcción del HAFSS. Para la determinación del área requerida para la construcción del HAFSS, se requiere considerar además del área propia para el HAFSS; las vialidades; el área perimetral del sitio que puede resguardarse con malla ciclónica; una caseta de vigilancia; un baño completo; una caseta para guardar equipo necesario para el mantenimiento del sistema; una caseta para montar las bombas de succión; un cuarto de control de bombas y motores, desde donde se pueden controlar las luminarias, un área para almacenar los residuos de mantenimiento; así como un área que permita la entrada de un vehículo que pueda llevarse los residuos generados, entre otros.

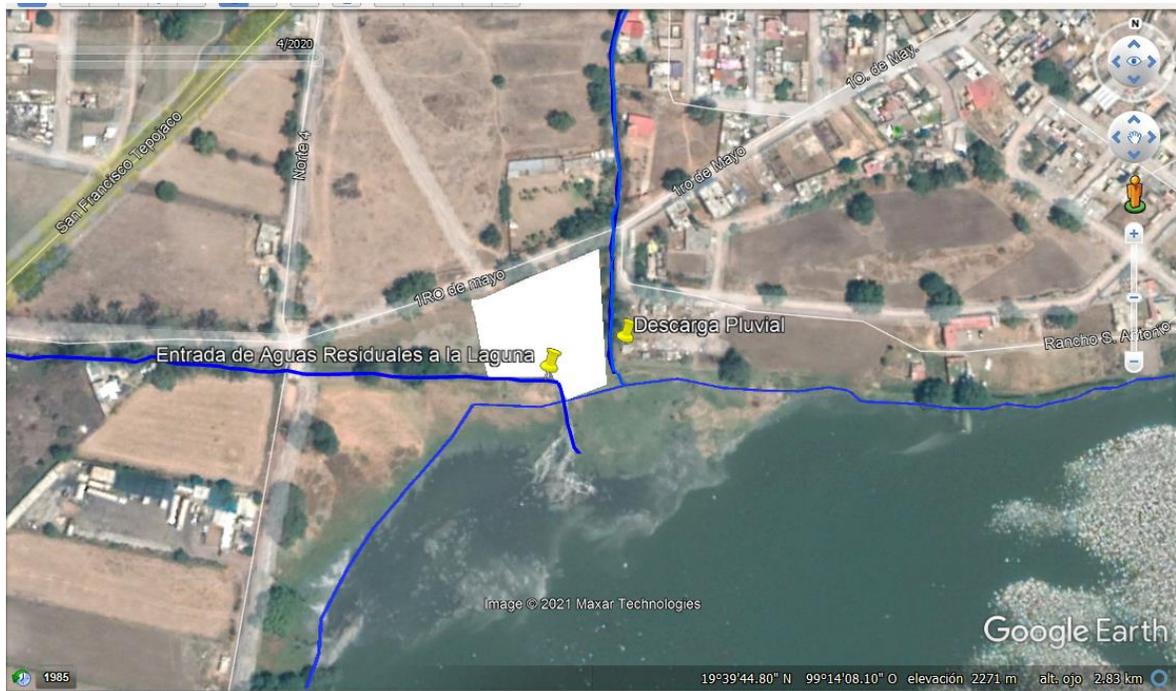


Figura 47. Localización del predio elegido para la construcción del HAFSS. Fuente: Google LLC, Google Earth Pro, 2020.

Se propone el diseño de un humedal artificial de flujo subsuperficial para obtener una calidad de agua que cumpla con los LMP por la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-003-SEMARNAT-1997, para un caudal medio ( $Q_{med}$ ) de 2 LPS y un caudal máximo extraordinario ( $Q_{ME}$ ) de dos veces este caudal (4 LPS). Y que se alimenta directamente del agua de la Laguna, con una manguera de neopreno de 4" de diámetro que se encuentra conduciendo agua directamente de la laguna al influente de la PTAR-HAFSS mediante un par de bombas que trabajan alternadamente y que se encuentran colocadas en una caseta cerca del inicio del tratamiento y dentro del cerco perimetral de la PTAR. Este sencillo sistema de bombas conduce el agua a una velocidad de 3 m/s y desde el extremo de la manguera que se encuentra sumergida 30 m aguas adentro del NAMO de la laguna y que tiene una trampa de sólidos que evita el taponamiento de esta y garantiza su operación continua.

El sistema a nivel conceptual propuesto se compone de un pretratamiento (cribado manual, desarenador, Parshall y un tanque de igualación) y un HAFSS

### 6.3.1.2. Diseño conceptual del sistema de cribado manual.

Los cálculos para las rejas de sólidos medios se realizaron de acuerdo con el Libro 26 del Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS) de la CONAGUA, del año 2015. Se pueden consultar todos los cálculos realizados en el Anexo 9.4. Memoria de Cálculo. Se propone una reja de barras rectangulares de 2.00 cm de espesor ( $d_b$ ), instalada con una inclinación de  $45^\circ$  con la horizontal y un espaciamiento libre entre barras ( $C$ ) de 2.5 cm y que recibe un caudal máximo extraordinario de 4 LPS. La limpieza de la reja es de forma manual, el canal desarenador tiene un tirante hidráulico ( $h$ ) de 0.25m, 0.3 m de ancho de canal ( $W$ ) y un bordo libre ( $h_b$ ) de 0.20m. En la Tabla 37. se vierten los resultados de diseño obtenidos.

Se propone la construcción de 2 canales con las dimensiones propuestas principalmente para poder dar el adecuado mantenimiento al sistema, pues estos pueden operar de forma intermitente, lo que permitiría una limpieza adecuada del sistema.

No se considera necesario la colocación de un sistema de rejillas para sólido medio de mayor dimensión, dado que el agua de alimentación es proveniente del cuerpo de la laguna y por las dimensiones de la manguera de la que se seleccionó el diámetro interno de 2", por lo que a la PTAR no se espera que lleguen partículas que superen este tamaño equivalente a 5 cm.

A continuación, se ilustra el corte del sistema de rejillas en la Figura 48.

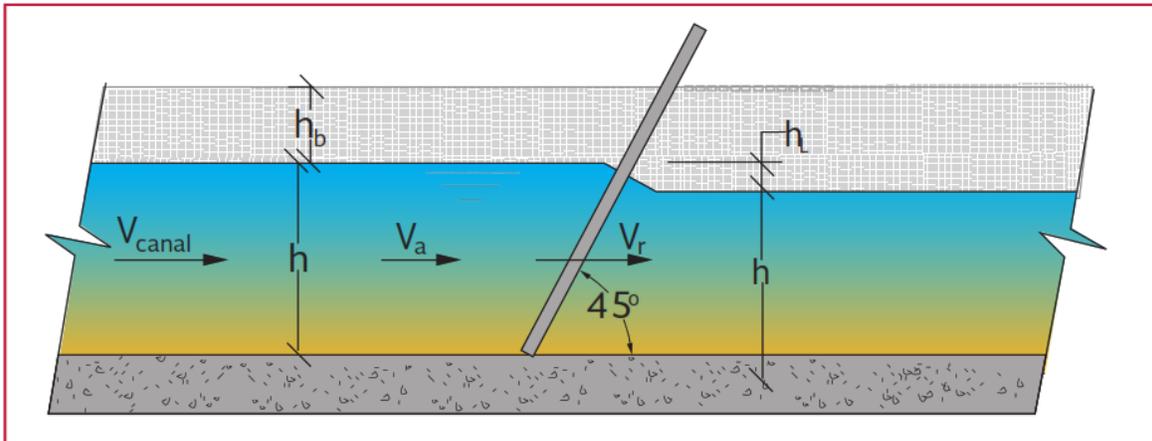


Figura 48. Corte de la reja.

Tabla 37. Resumen de los valores de las rejillas para sólidos medios.

Parámetro	Ecuación	Valores	Unidad
Ancho de canal (W)	Propuesto	0.3	M
Espesor de Barra (d <sub>b</sub> )	Propuesto	2	cm
Tirante hidráulico (h)	Propuesto	0.25	M
Bordo libre (h <sub>b</sub> )	Propuesto	0.2	M
Área del canal (A)	$A = W h$	0.1	m <sup>2</sup>
Velocidad antes de la reja (V)	$V = \frac{Q}{A}$	0.04	m <sup>3</sup>
Longitud antes de la reja (L)	$L = \frac{h + hb}{\text{Sen } \theta}$	0.6363	M
Espacios entre las barras	$n = \frac{W - C}{C + db}$	8	Espacios
Número de barras (n)	n-1 =	7	Barras
Velocidad de acercamiento aguas arriba (Va)	$Va = \frac{Q}{(W - db)h}$	0.042	m/s
Velocidad a través de la reja (Vr)	$Vr = \frac{Q}{A - Ar}$	0.067	m/s
Área de las rejillas (Ar)	$Ar = n d_b h$	0.04	m <sup>2</sup>
Perdida hidráulica (hL)	$hL = \frac{1}{0.7} \left( \frac{Vr^2 - Va^2}{2g} \right)$	6.22	mm

### 6.3.1.3. Diseño conceptual del sistema de desarenado.

El desarenado es una parte importante del tratamiento de las aguas residuales, pues evita la abrasión innecesaria y el desgaste de los equipos mecánicos, la deposición de arena en las tuberías y canales (CONAGUA, MAPAS 26, 2015) por lo tanto, la colmatación del sistema del HAFSS.

Para este diseño conceptual, se emplearon las ecuaciones propuestas por César-Valdez *et al.* (2003). Se consideraron las ecuaciones para un diseño con flujo horizontal, de configuración rectangular, no se propone ningún sistema mecánico que pudiera requerir consumo de energía para su operación, para mantener los costos de operación del HAFSS bajos.

Se considera una condición crítica de operación para un Q<sub>ME</sub> de 4 LPS y un Q<sub>med</sub> de 2 LPS y la construcción de 2 canales de desarenado.

Los valores de ancho (w= 0.4 m), altura (h= 0.32 m) y longitud (L= 1.23 m) de cada uno de los canales, las dimensiones finales de cada uno de los canales desarenadores se indican en la Tabla 38. Los cálculos pueden consultarse en los Anexos. Memoria de Cálculo del sistema.

Tabla 38. Dimensiones finales del desarenador.

DIMENSIONES DEL DESARENADOR			
Ancho	W	0.40	m
Alto	h	0.32	m
Longitud	L	1.23	m

Para mantener la velocidad de derrame en 3.0 m/s, para evitar que la arena se resuspenda o que se retengan materiales orgánicos en el canal, como consecuencia de la variación de la velocidad en porcentajes de hasta 25% arriba o debajo de este valor, se colocarán para controlar la velocidad horizontal, un vertedor en la salida de los desarenadores, que proporcionan la altura del agua en los desarenadores, el gasto de la misma, para mantener una velocidad de derrame constante (César-Valdez *et al.*, 2003).

#### 6.3.1.4. Diseño conceptual de un canal Parshall.

Los flujos de entrada a las Plantas de tratamiento de agua son muy variables. La velocidad del flujo debe permanecer constante o casi en el desarenador con un valor recomendado generalmente de 0.3 m/s; para lograr obtener una velocidad constante, a flujos variables, es necesario colocar un dispositivo de control hidráulico en cada canal, que en este caso será a través de un canal Parshall colocado al final del canal desarenador (CONAGUA, MAPAS 26, 2015).

El canal Parshall se selecciona con los criterios indicados en el libro 26 del MAPAS, 2015 para manejar los gastos mínimo, medio y máximo. El procedimiento elegido permitió dimensionar el ancho de los canales desarenadores y calcular los tirantes que manejará el canal Parshall, según el gasto de 2 LPS.

La configuración de diseño conceptual señalando los valores en mm, con la vista superior Figuras 49 y transversal Figura 50. El sentido del escurrimiento es de izquierda a derecha inicia con una sección convergente donde el piso es horizontal, continua con una sección de paredes paralelas de corta longitud denominada garganta donde el piso tiene pendiente descendiente, y termina con una sección divergente cuyo piso es de pendiente positiva (Valdez *et al.*, 2003).

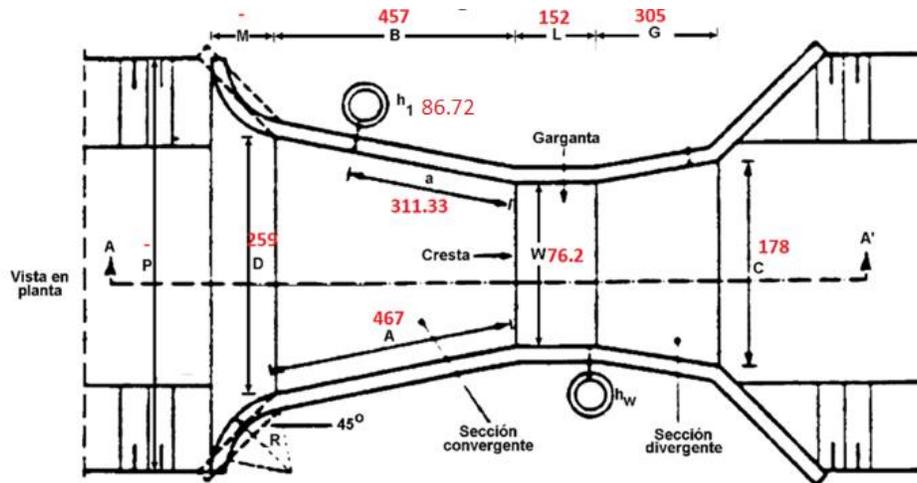


Figura 49. Configuración del canal Parshall, vista superior<sup>31</sup>.

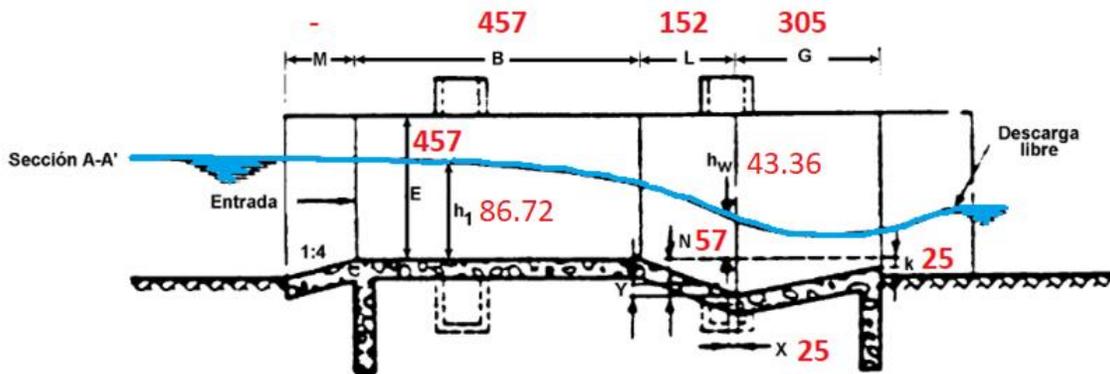


Figura 50. Configuración del canal Parshall, perfil hidráulico<sup>32</sup>.

### 6.3.1.5. Diseño conceptual del tanque de igualación.

Dado que el tanque de igualación se emplea para las variaciones horarias del gasto de agua que pueden tener un efecto adverso en el funcionamiento de los procesos de la planta; el cambio constante de la cantidad y concentración del agua residual a ser tratada propicia que la operación eficiente de los procesos sea difícil (Valdez *et al.*, 2003); y como el agua será obtenida directamente de la laguna a través del par de bombas que alimentan directamente el agua de la Laguna, con una manguera de neopreno de 4" de diámetro al afluente de la PTAR-HAFSS, no se considera que pudiera haber variaciones de flujo, por lo que en el diseño conceptual se omite para esta PTAR.

<sup>31</sup> Fuente: Valdez, E. C; Alba B; Vázquez González. Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. México 2003. Figura 9.1. Geometría de un canal Parshall.

<sup>32</sup> *Ibidem*.

### 6.3.1.6. Diseño conceptual del humedal artificial de flujo subsuperficial.

Mediante el modelo de Kadlec se calculó de forma conceptual el área requerida para el humedal de flujo superficial, considerando un caudal de 2 LPS, equivalente a  $172.8 \text{ m}^3/\text{d}$ . Se ilustra el diagrama de tratamiento propuesto Figura 51

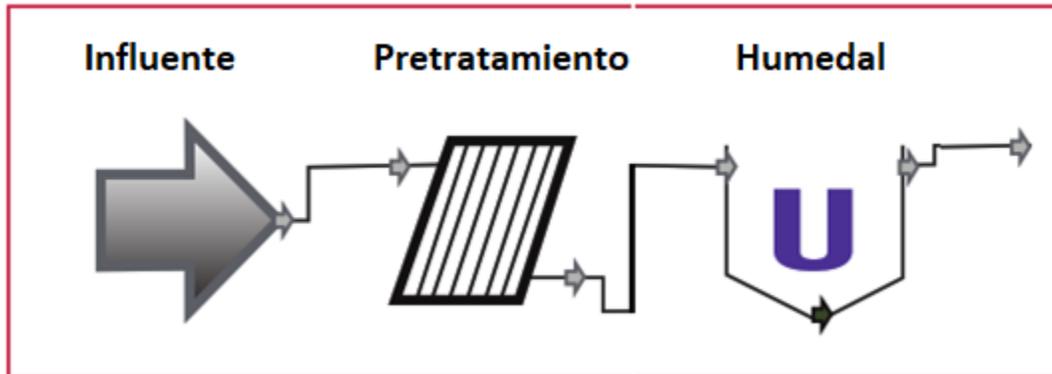


Figura 51. Diagrama de tren de tratamiento propuesto<sup>33</sup>.

Se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones (CONAGUA, MAPAS 30, 2015):

- Planta seleccionada: *Phragmites australis* (Carrizo).
- Profundidad de la raíz: 0.6 m.
- Separación entre planta,  $d = 1.0 \text{ m}$ .
- Propuesta de profundidad del agua en zona inicial de tratamiento,  $D_{w0} = 0.6 \text{ m}$ .
- Propuesta de profundidad del agua en zona final de tratamiento,  $D_{wf} = 0.6 \text{ m}$ .
- Propuesta de profundidad del lecho,  $D_M = 0.6 \text{ m}$ .
- Perdida de carga máxima en zona inicial,  $dh_i = 0.06 \text{ m}$ .
- Perdida del fondo del humedal,  $S_f = 0.005$ .
- Distancia propuesta entre la superficie y la del agua,  $D_{WM} = 0.1 \text{ m}$ .

Se considera una zona de entrada y una de salida para la distribución y captación del caudal respectivamente, tal y como se indica en la Figura 52.

<sup>33</sup> Fuente: CONAGUA. (2015), Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales, Tomo 30. Ciudad de México: SEMARNAT-CONAGUA. Basado en la Ilustración 2.38.

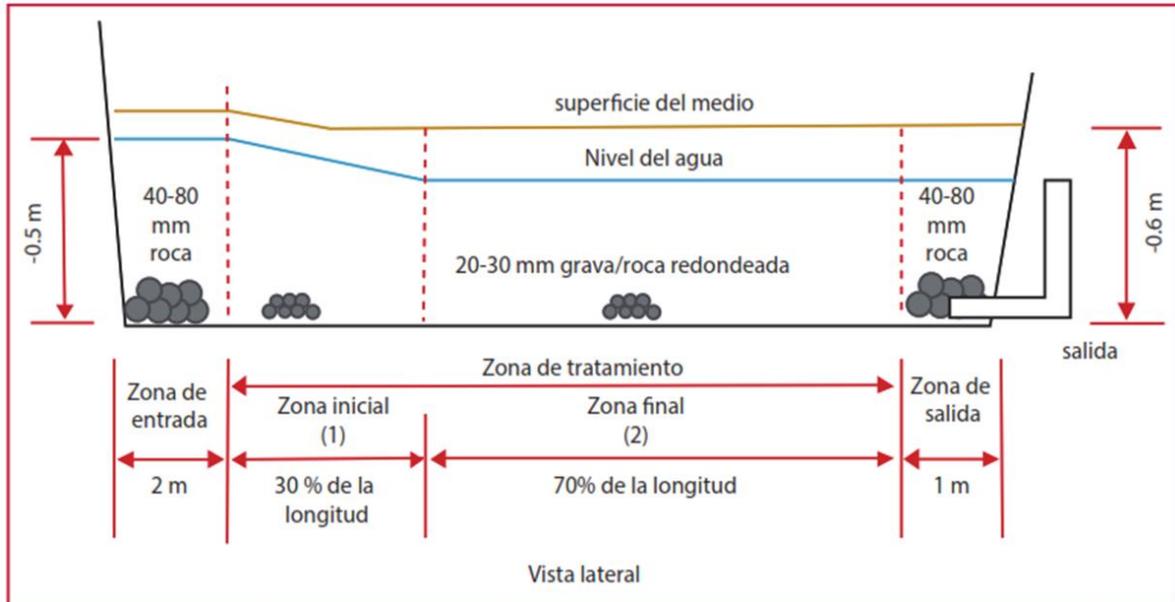


Figura 52. Componentes del balance hidráulico del humedal de flujo subsuperficial de tipo horizontal<sup>34</sup>.

- La zona inicial ocupa el 30% del área de tratamiento total. Se considera una conductividad hidráulica equivalente al 1% de la conductividad en condiciones limpias.
- La zona final ocupa el 70% del área de tratamiento total. Se considera una conductividad hidráulica equivalente al 10% de la conductividad en condiciones de saturación.

El área superficial requerida para el humedal artificial es de 2,153.53 m<sup>2</sup>.



Figura 53. Desarrollo de especies vegetales en humedales artificiales<sup>35</sup>.

<sup>34</sup> Fuente: CONAGUA. (2015), Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales, Tomo 30. Ciudad de México: SEMARNAT-CONAGUA. Ilustración 2.37 Componentes del balance hidráulico del humedal de flujo subsuperficial de tipo horizontal.

<sup>35</sup> Fuente: CONAGUA. (2015), Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales, Tomo 30. Ciudad de México: SEMARNAT-CONAGUA, Ilustración 1.4.

Los humedales artificiales también encuentran aplicación para la producción de flores de ornato (CONAGUA, MAPAS 30, 2015). Se pueden emplear diferentes tipos de plantas, las cuales pueden ser recolectadas, una vez que hayan madurado. Algunas de ellas pueden forrajeras, como alfalfa y otras de ornato, las cuales pueden comercializarse. Entre las plantas de ornato se encuentran: *Persicaria affinis mexicana*, *Canna hybris*: Platanillo, *Strelitzia reginae*: Ave del paraíso y *Zantedeschia aethiopica*: Alcatraz o cala.

Además, pueden incorporarse plantas que, por su alto valor nutritivo, sirvan de alimento para peces y aves e inclusive con fines medicinales (CONAGUA, MAPAS 30, 2015, y Ramírez Carrillo *et al.*, 2009). El aprovechar los productos del humedal, puede contribuir a disminuir los costos de operación, lo que supone una gran ventaja cuando se trata de sistemas de PTAR que pueden dejar de operar por falta de recursos de los responsables de su operación.

## 7. CONCLUSIONES.

Se realizó la propuesta técnica, económica y ambiental de una alternativa conceptual integral para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad, en Cuautitlán Izcalli, Estado de México, mediante la integración de la información pública y generada exprofeso, determinando que la alternativa conceptual más viable es la denominada **Primera Etapa**.

Empleando la información pública y la generada exprofeso, se determinó la calidad del agua de la Laguna la Piedad y la que entra a la laguna se encuentra contaminada.

se estimó el balance hídrico y la calidad del influente y efluente de la Laguna la Piedad, durante el periodo de estiaje y lluvias, usando la información técnica correspondiente. El volumen de entrada es intermitente y oscila entre 59 LPS y hasta 344 LPS y es usado con fines de riego agrícola. Esto último origina cambios significativos en el volumen de la laguna, principalmente en temporada de estiaje debido a la apertura y cierre de compuerta de la presa lago de Guadalupe.

A partir de recopilar información, conocer el área y generar datos propios (encuesta y campaña de muestreo de agua), se estableció el escenario *cerro* que representa el estado actual de la Laguna la Piedad, para determinar las posibles alternativas técnicas conceptuales de solución para tratar el agua que llega a la laguna, involucrando infraestructura disponible y nueva, se plantearon diversas propuestas que se consideran viables de ser diseñadas, construidas, puestas en operación y operadas. Mediante la "*Matriz de viabilidad de escenarios*", se seleccionó la propuesta más viable de ser desarrollada en campo, que cumpla con consideraciones técnicas, económicas, sociales y ambientales.

Se desarrolló la alternativa integral para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad, incorporando los aspectos económicos y ambientales a la propuesta conceptual técnica seleccionada y se considera viable desarrollarla como **Primera Etapa**. Se considera que, para poder proponer una estrategia para la selección del escenario conceptual más viable para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad, es necesario llevar a cabo las obras consideradas en los diversos escenarios propuestos, lo que puede ser llevado a cabo en 4 etapas. La propuesta integral para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad, consta de los siguientes elementos:

1. Rehabilitación de la PTAR La Piedad II, 27.2 MDP.
2. Reconstrucción de la PTAR Lomas de Cuautitlán, 20.8 MDP.
3. Construcción de nueva PTAR LA de 60 LPS, 78 MDP.
4. Inversión de una PTAR HA de 2 LPS, 0.95 MDP.
5. Puesta en marcha de la PTAR Lago de Guadalupe, 3.14 MDP.
6. Estimado de factores necesarios para llevar a cabo la construcción y puesta en marcha de las PTAR, 77.66 MDP.
7. Construcción del colector Marginal 275 LPS, 4.19 MDP.
8. Construcción de la Obra hidráulica de Retorno de Agua Tratada 275 LPS, 2.09 MDP.
9. Construcción de una PP de 2 LPS, 4.19 MDP.

Las cuatro etapas requeridas son:

**Primera Etapa, Escenario 3.** En este se considera una PTAR basada en un Humedal Artificial, que es capaz de tratar, directamente de la Laguna, hasta 2 LPS, contribuyendo en el mejoramiento y aprovechamiento del agua del cuerpo de agua y que se consideró la más viable de ser ejecutada, puesta en marcha y operada por el OO.

**Segunda Etapa,** se considera la construcción del **Escenario 2**, que según la puntuación obtenida en la Tabla 35. Matriz de viabilidad de escenarios es el escenario más viable de ejecutarse y constaría de la construcción de una PTAR LA de tecnología convencional de 60 LPS, que trataría el total del agua que está entrando en la Laguna de la Piedad, en esta **Segunda Etapa**, ya se tendría operando el HA que se encuentra tratando 2LPS de agua directamente de la Laguna.

**Tercera Etapa,** se podría considerar la construcción del colector marginal, la puesta en operación de la PTAR LA Lago de Guadalupe, para uno de sus trenes, esta opción requiere de la construcción de la obra hidráulica de retroalimentación a la Laguna la Piedad, esto dado que en el periodo de apertura de la compuerta de la presa Lago de Guadalupe, el agua residual aumentaría su volumen de 60 LPS a 344 LPS, que de no ser tratados, resultarían en la derivación del 573% de la capacidad de la PTAR LA de 60 LPS instalada en la **Segunda Etapa**.

**Cuarta Etapa,** se considera la rehabilitación de la PTAR La Piedad II y la reconstrucción de la PTAR Lomas de Cuautitlán, dado que estas obras, una vez construida la **Segunda Etapa** y la **Tercera Etapa**, contribuirían al mejoramiento del agua antes de su incorporación al río Barranca de Zamorillas, y a la operación de la PTAR LA de 60 LPS que se contempla en la **Segunda Etapa**.

Es necesario que el municipio reporte a la entidad con la autoridad correspondiente, los pagos de derechos de descargas de aguas residuales a la Laguna la Piedad. Se recomienda que inicie con las gestiones para participar en el Programa de Saneamiento de Aguas Residuales (PROSANEAR) de la Comisión Nacional del Agua, presentando las etapas de mejoramiento y aprovechamiento del agua, como programa de acciones para que sea realizado a través de dicho programa.

## 8. REFERENCIAS.

Aburto-Castañeda, S. (2011), *Análisis y modelación del proceso de nitrificación en sistemas experimentales que simulan humedales artificiales*, Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias.

Angrosino, M. (2012). *Etnografía y observación participante en Investigación Cualitativa*. Ediciones Morata. Madrid. Recuperado el 10 de febrero de 2020, <http://abacoenred.com/wp-content/uploads/2016/01/Etnografia-y-Observacion-Participante.pdf>

Arias I., Carlos A., Brix, Hans (2003), *Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, (13), 17-24|ISSN: 0124-8170. Recuperado el 22 de Mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91101302>

Avila P., Pablos J.L., Pelayo C.M. (2018), *Estudio sobre protección de ríos, lagos y acuíferos desde la perspectiva de los derechos humanos, 2018*, Universidad Nacional Autónoma de México, Coordinación de Humanidades y Comisión Nacional de Derechos Humanos.

César-Valdez, E. y Vázquez-González, A. B. (2003), *Ingeniería de los Sistemas de Tratamiento y Disposición de Aguas Residuales*, Fundación ICA, A.C., México, D.F.

Climate Data.org (2020), Cuautitlán Izcalli clima, recuperado 16 de mayo de 2020, <https://es.climate-data.org/america-del-norte/mexico/mexico/cuautitlan-izcalli-46551/>

Comisión Estatal del Agua de Jalisco (2013). *Agua Prieta*. Guadalajara, Jalisco: CEA.

Comisión Estatal del Agua de Jalisco (2020), Presentación 20 PTAR Saneamiento de la de fecha 31 de marzo de 2020, extraído 26 junio 2020 [https://deudapublica.jalisco.gob.mx/sites/default/files/paginas/archivos/Presentaci%C3%B3n%20PTARs%20Saneamiento\\_31mar20.pdf](https://deudapublica.jalisco.gob.mx/sites/default/files/paginas/archivos/Presentaci%C3%B3n%20PTARs%20Saneamiento_31mar20.pdf)

Comisión Estatal del Agua de Jalisco (2021), *Lago de Chapala*, recuperado el 3 de marzo del 2021, <https://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/chapala/>

CONAGUA. (2015), *Estadísticas del Agua en México*. Ciudad de México: SEMARNAT-CONAGUA.

CONAGUA. (2015). *Inventario de Plantas Municipales de Potabilización y Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*. SEMARNAT-CONAGUA.

CONAGUA. (2015), *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Integración de un Organismo Operador, Tomo 1*. Ciudad de México: SEMARNAT-CONAGUA.

CONAGUA. (2015), *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado, Tomo 4*. Ciudad de México: SEMARNAT-CONAGUA.

CONAGUA. (2015), *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Alcantarillado Sanitario, Tomo 20*. Ciudad de México: SEMARNAT-CONAGUA.

CONAGUA. (2015), *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales, Tomo 25*. Ciudad de México: SEMARNAT-CONAGUA.

CONAGUA. (2015), *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Pretratamiento y Tratamiento Primario, Tomo 26*. Ciudad de México: SEMARNAT-CONAGUA.

CONAGUA. (2015), *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Lagunas de Estabilización, Tomo 27*. Ciudad de México: SEMARNAT-CONAGUA.

CONAGUA. (2015), *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales, Tomo 30*. Ciudad de México: SEMARNAT-CONAGUA.

CONAGUA. (2015), *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Tratamiento y Disposición de Lodos, Tomo 32*. Ciudad de México: SEMARNAT-CONAGUA.

CONAGUA. (2015), *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Tratamientos no Convencionales, Tomo 36*. Ciudad de México: SEMARNAT-CONAGUA.

CONAGUA. (2015), *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Alternativas tecnológicas de tratamiento de aguas residuales para la recarga artificial de acuíferos, Tomo 38*. Ciudad de México: SEMARNAT-CONAGUA.

CONAGUA (2016), *Diagnóstico del Programa Presupuestal S218 Tratamiento de Aguas Residuales*, Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento.

CONAGUA. (2017). *Atlas del Agua en México*. Ciudad de México: SEMARNAT-CONAGUA.

CONAGUA. (2017), *Estadísticas del Agua en México*. Ciudad de México: SEMARNAT-CONAGUA.

CONAGUA. (2018). *Estadísticas del Agua en México*. 26 de noviembre de 2019, de SEMARNAT-CONAGUA Sitio web: [http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM\\_2018.pdf](http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf).

CONAGUA (2020), *Reglas de Operación para el Programa de Agua Potable, Drenaje y Tratamiento a cargo de la Comisión Nacional del Agua, aplicables a partir de 2020, DOF 31 de diciembre de 2019*.

CONAGUA. (2019). *Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, Sistema de Información de Servicios Básicos del Agua (SISBA)*. Ciudad de México: SEMARNAT-CONAGUA.

CONAGUA-CIESAS. (1980), *Archivo Histórico del Agua, Fondo Documental de Aguas Nacionales, Caja 3205, Expediente 47821*. Ciudad de México: SEMARNAT-CONAGUA.

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, última reforma publicada el 8 de mayo del 2020 en el DOF.

Comunidades Internacionales Seguras (International Safe Community). (2011). *Programa de designación de comunidades seguras en México*, 31 de mayo de 2019 Sitio web: <https://isccc.global/community/cuautitl%C3%A1n-izcalli/216>

Degremont. (1979). *Manual técnico del agua cuarta edición*. España: Degremont.

De la Peña, M.E., Ducci J. y Zamora V., Banco Interamericano de Desarrollo (2013), *Tratamiento de Aguas Residuales en México*. BID.

Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L.F., Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*, Centro Andino para la Gestión y Uso del agua (Centro Agua). Cochamba-Bolivia.

Dugaro, M. Subero, L., Corneil, Y., Brito, F. y Cemborain, L. (2013), *La evaporación y transpiración y sus métodos de cálculo*, Puerto Díaz.

DOF. (1922). *Secretaría de Agricultura y Fomento, Declaración de que las aguas y cauces de los canales, barrancos, arroyos, ríos, lagos y lagunas comprendidos dentro del Valle de México y ligados con las obras de Desagüe, son de propiedad Nacional*. Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos.

Eckenfelder Jr. W. W., Ford D.L y Englande A.J. (2008), *Industrial Water Quality*, ed. 4, Editorial McGrawHill.

Economic Commission for Latin America and the Caribbean (CEPAL, por sus siglas en español), (2020), *Observatorio del Principio 10 en América Latina y el Caribe*. Recuperado el 23 de junio de 2020. Sitio Web: <https://observatoriop10.cepal.org/es/instrumentos/ley-federal-responsabilidad-ambiental>

Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C. (2009). *Agonizan las lagunas de Izcalli*, recuperado 31 de mayo de 2019. Sitio web: <https://agua.org.mx/agonizan-las-lagunas-de-izcalli/>

Gestión Cuautitlán Izcalli. (2019). *Más de 2 mil voluntarios limpian la laguna de la Piedad*, recuperado 26 de noviembre de 2019. Sitio Web: <http://cuautitlanizcalli.gob.mx/limpieza-laguna-de-la-piedad/>

Gil F., Infante D., Mujica D., Rodríguez R. y Totesaut (2015), *Medición de la evaporación desde superficie de agua como ríos, arroyos, canales, lagunas, lagos y embalses*, Instituto Universitario Politécnico “Santiago Mariño”, recuperado el 15 de mayo de 2020, [https://issuu.com/equipo1hidro/docs/medici\\_n\\_de\\_la\\_evaporaci\\_n\\_desde](https://issuu.com/equipo1hidro/docs/medici_n_de_la_evaporaci_n_desde)

Gobierno de México, Comisión Nacional del Agua (2020), *Consulta del Programa Nacional Hídrico 2019-2024*, Recuperado 30 de marzo del 2020, <https://www.gob.mx/conagua/articulos/consulta-para-el-del-programa-nacional-hidrico-2019-2024-190499>

Gobierno de México (2019), *Ley Federal de Derechos*, Recuperada 30 de marzo del 2020, [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/107\\_281219.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/107_281219.pdf)

Gobierno del Municipio de Cuautitlán Izcalli 2019-2021. (2019). *Plan de desarrollo Municipal 2019-2021 Cuautitlán Izcalli, Estado de México*, páginas 17, 94-95.

Gobierno del Municipio de Cuautitlán Izcalli 2022-2024. (2022). *Plan de desarrollo Municipal 2022-2024 Cuautitlán Izcalli, Estado de México*, páginas 318, 345, 349.

Gobierno del Municipio de Cuautitlán Izcalli (2013). *Plan de desarrollo Urbano Municipal*, Estado de México, recuperado 22 de enero del 2020. Sitio web: [http://seduv.edomexico.gob.mx/planes\\_municipales/cuautitlan\\_izcalli/pdumCI.pdf](http://seduv.edomexico.gob.mx/planes_municipales/cuautitlan_izcalli/pdumCI.pdf)

H. Ayuntamiento de Cuautitlán Izcalli (2019), *Perfil Histórico de Cuautitlán Izcalli*, recuperado el 24 de mayo de 2020, <http://cuautitlanizcalli.gob.mx/wp-content/uploads/2019/08/Perfil-Hist%C3%B3rico-CI-ok.pdf>

Henze, M., Van Loosdrecht, M.M., Ekama, G.A., y Brdjanovic, D. (2008), *Biological Wastewater Treatment: Principles, models and Design*, IWA Publishing, London, U.K.

Higuera-Rivera, A.I. (2015), *Evaluación del proceso depuración de agua del canal de Cuemanco en un humedal artificial acoplado a un módulo de desinfección*, Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Química.

Hoffman, P. (2011), *Revisión Técnica de Humedales Artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas*. Agencia de Cooperación Internacional de Alemania, GIZ Programa de Saneamiento Sostenible ECONSAN.

IMTA (2002), *Aplicación de Costos Índice de Plantas de Tratamiento de aguas residuales*.

INAFED (2021), Información de las características generales de los municipios de Cuautitlán Izcalli en el Estado de México del Instituto nacional para el federalismo y el desarrollo municipal, recuperado el 20 de julio de 2021, <http://www.inafed.gob.mx/enciclopedia/municipios>

INEGI (2021), Catálogo de localidades INEGI, recuperado el 07 de enero de 2021 <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/contenido.aspx?refnac=151210116>

INEGI (2021), Censo de Población y vivienda 2020, recuperado el 20 de julio de 2021 <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>

INEGI (2015), Diccionario de datos de cuerpos de agua, ISBN 978-607-739-818-0, recuperado el 17 de marzo de 2021 <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825224042>

*Ley de Aguas Nacionales, última reforma publicada el 24 de marzo del 2016 en el DOF.*

Ley Federal de Derechos, última reforma el 09 de diciembre de 2019 en el DOF.

Ley Federal de Responsabilidad Ambiental, publicada el 7 de junio de 2013 en el DOF.

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, última reforma el 05 de junio del 2018 en el DOF.

López-Lázaro, O.A. (2020). *Evaluación de Factibilidad Técnica Económica y Ambiental de Incorporar un Humedal Artificial para el Saneamiento de Laguna la Piedad Estado de México*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química.

López-Moreno (2008), *Estimación de pérdidas de agua por evaporación en embalses del pirineo*, Cuaderno de Investigación Geográfica, No. 34, pp. 61-81, ISSN 0211-6820.

López-Saut, E.G. (2002), *Estudio Avifaunístico de la Presa la Piedad, Nicolás Romero, Estado de México*, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores de Izcala.

Luna-Pabello, V.M. (2006). *Atlas de Ciliados y otros Microorganismos frecuentes en Sistemas de Tratamiento Aerobio de Aguas Residuales*, Departamento de Biología, Laboratorio de Microbiología Experimental, de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de México.

Luna Pabello V. M y Morales Ferrero I. M. 2018. "Depuración con humedales artificiales en ciudades". Rev. H2O Gestión de Agua. No. 19 pp: 34-40.

Luna-Pabello, V.M. y Ramírez-Carrillo, H.F. (2009). Humedales Artificiales una Ecotecnología sustentable para la Depuración de Aguas Residuales. *ALDEQ 2008-2009*. Nro. XXIV. 194-202.

Luna-Pabello, V.M. y Aburto-Castañeda, S. (2014). Sistema de Humedales Artificiales para el control de la Eutroficación del Lago del Bosque de San Juan de Aragón. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 17(1):32-55.

LXII Legislatura del Congreso del Estado de Jalisco (2020), *Proponen soluciones para la cuenta del río Lerma*, recuperado el 4 de marzo de 2021, <https://www.congresoal.gob.mx/boletines/proponen-soluciones-para-la-cuenca-del-r-o-lerma>

Mata-Amaro, L.A. (2012), *Empleo de Biodiscos en el Tratamiento de Aguas Residuales generadas en un edificio de Ciudad Universitaria*. Tesis de Maestría. México: Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Ingeniería Ambiental- Agua, UNAM.

Martínez Acevedo, J. (2017), *Factores económicos y ambientales relacionados con el tratamiento de agua residual a través de la implementación de humedales artificiales acoplados a un sistema de lodos activados*, Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, campo de conocimiento: restauración ambiental.

Marín Ocampo, A. y Osés Pérez, M. (2013). *Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales con el Proceso de Lodos Activados, Tomo I. Manual de Procedimientos*. Guadalajara, Jalisco: Dirección de Operación de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (DOP). Comisión Estatal del Agua de Jalisco.

Mendez, L., Mitashiro, V., Rojas, R., Cotrado, M. y Carrasco, N. (2004), *Tratamiento de Aguas Residuales Mediante Lodos Activados a Escala de Laboratorio*, Revista del Instituto de Investigación FIGMMG, Vol. 7, No. 14, 74-83, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Merino, M.L. (2017), *Mecanismos de remoción de materia orgánica y nutrientes en un sistema de tratamiento pasivo de aguas residuales municipales*, Tesis de doctorado, Centro de investigación y asistencia en tecnología y diseño del estado de Jalisco, A.C., Guadalajara, Jal.

Metcalf y Eddy. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*, Mc Graw Hill.

Ministerio de Agricultura y Riego (2015). *Manual No. 5 Medición de Agua*, Lima, Perú. Ministerio de Agricultura y Riego. Dirección General de Infraestructura Agraria y Riego. Lima, Perú.

Miranda-Alcibar, L.A. (2018), *Evaluación técnica, económica y ambiental de la opción de acoplar un humedal artificial a una PTAR de Lodos Activados para obtener agua apta para cuerpo receptor tipo B*, Tesis de Licenciatura. México: Facultad de Química, UNAM.

Monje, C. (2011). *Metodología de la investigación cuantitativa y cualitativa*. Guía didáctica. Universidad Sur colombiana. 10 de Febrero de 2020, sitio web: <https://www.uv.mx/rmipe/files/2017/02/Guia-didactica-metodologia-de-la-investigacion.pdf>

Morlán-López, F.L. (2012), *Saneario del río Cuautitlán en el tramo Cortina Presa Guadalupe – Residencial la Luz*, Tesis de Maestría. México: Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura U.Z. Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Maestría en Ingeniería Civil, Instituto Politécnico Nacional.

Muñoz-González, L.E. (2015), *Proyecto ejecutivo “planta de tratamiento de aguas residuales para Santo Domingo Chihuitán, Istmo de Tehuantepec Oaxaca”*, Tesis de Licenciatura, México, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, Instituto Politécnico Nacional.

Navarro, A., López, M. y Caire, G., (2004), *Estudio, análisis y propuestas para el fortalecimiento de los programas municipales de saneamiento ambiental existentes en la Cuenca Lerma Chapala*, Estudio elaborado a petición del: Dirección de Manejo Integral de Cuencas Hídricas, Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas, del Instituto Nacional de Ecología.

Noyola A., Morgan-Sagastume y J.M., Güereca L.P. (2013), *Selección de Tecnologías para el tratamiento de Aguas Residuales Municipales, guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*, México: Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Núñez, L. (2006), *¿Cómo analizar datos cualitativos?*, Butlletí LaRecerca. Barcelona. Universitat de Barcelona. Pp.1-13. 10 de febrero de 2020, sitio web:  
<https://www.ub.edu/idp/web/sites/default/files/fitxes/ficha7-cast.pdf>

ONU. (2010), *64/292 El derecho humano al agua y al saneamiento*. ONU.  
M. G. Paredes, L. P. Güereca, L.T. Molina y A. Noyola (2016), *Methane emissions from stabilization ponds for municipal wastewater treatment in Mexico*. Journal of Integrative Environmental Sciences, 12:sup1, 139-153, DOI: [10.1080/1943815X-2015.1110185](https://doi.org/10.1080/1943815X-2015.1110185)

Observatorio del Estado de México, Secretaría de Finanzas (2020), Recuperado 03 de febrero de 2020, [https://observatorio.edomex.gob.mx/division\\_publica](https://observatorio.edomex.gob.mx/division_publica)  
SEDESOL, (2020), Catálogo de localidades, Sistema de Apoyo para la Planeación del PDZD, 04 de febrero de 2020, Sitio web:  
<http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?tipo=clave&campo=loc&ent=15&mun=121>

Pérez, M.E. (2009), *Selección de plantas acuáticas para establecer humedales en el estado de Durango*, Tesis de doctorado, Centro de investigación de materiales avanzados, S.C., Chihuahua, Chi.

Ramírez-Carrillo, H. F., Luna Pabello, V. M. y Arredondo Figueroa, J. L. (2009). Evaluación de un humedal artificial de flujo vertical intermitente, para obtener agua de buena calidad para la acuicultura. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 8(1):93-99.

Rojas, R. (2002), *Gestión Integral de tratamiento de agua residuales del 25 al 27 de septiembre de 2002*, Conferencia Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, División de Salud y Ambiente, Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud.

Rodríguez-Miranda, J. P., y García Ubaque, C. A. y Pardo Pinzón, J. (2015). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. *Tecnura*, 19(46),149-164. [fecha de Consulta 10 de marzo de 2021]. ISSN: 0123-921X. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=2570/257042318013>

Romero-Aguilar, M., Colín-Cruz, A., Sánchez-Salinas, E., y Ortiz-Hernández, M. L. (2009). Wastewater treatment by an artificial wetlands pilot system: evaluation of the organic charge removal. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 25(3), 157-167. Recuperado en 10 de marzo de 2021, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992009000300004&lng=es&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992009000300004&lng=es&tlng=en).

Salas-Rodríguez, J.J.; Pidre-Bocardo, J.R. y Cuenca-Fernández, I. (2007), *Manual de Tecnologías no convencionales para depuración de aguas residuales*, Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua, Impresión y encuadernación: Coria Gráfica, ISBN 13: 978-84-611-6888-6.

Segura-Estrada, I. S. (2017), *Cinética de decaimiento de coliformes fecales en un humedal artificial de flujo subsuperficial vertical*, Tesis que, para obtener el grado de Maestro en Ciencias y Tecnología del Agua, Subcoordinación de Posgrado, Coordinación de Desarrollo Profesional e Institucional del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Segura-Miranda, J.B. (2014), *Desarrollo de un humedal artificial experimental conformado por estratos verticales*, Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Química.

Silva, J., Torres, P. y Madera C. (2008), *Reúso de aguas residuales domésticas en agricultura, una revisión*. *Agron. Colomb.* [online]. 2008, vol.26, n.2 [cited 2020-06-16], pp.347-359. Available from: <https://www.redalyc.org/pdf/1803/180314732020.pdf>

Strauss y Corbin citados en Tójar, J. C. (1996). *Investigación cualitativa comprender y actuar*. Ed. La Muralla. Madrid. 10 de febrero de 2020, sitio web: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiprdTjm8DnAhUBQawKHQAcDbQQFjAAegQIARAB&url=https%3A%2F%2Fdialnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F6515553.pdf&usg=AOvVaw0p1hTTG8RWR\\_mGV79ddNvu](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiprdTjm8DnAhUBQawKHQAcDbQQFjAAegQIARAB&url=https%3A%2F%2Fdialnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F6515553.pdf&usg=AOvVaw0p1hTTG8RWR_mGV79ddNvu)

Tchobanoglous, G., L. Burton, F. y Stentel, H.D. (2003). *Wastewater engineering, treatment and reuse, fourth edition*. Newyork, N.Y.: Mc Graw Hill.

USGS (2016), *Water science glossary of terms*, 4 de Julio de 2019. USGS. Sitio Web: [https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/dictionary-water-terms?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/dictionary-water-terms?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects)

Vaxasoftware (2020), *Propiedades del agua en función de la temperatura*, 10 de julio de 2020, sitio web: [http://www.vaxasoftware.com/doc\\_edu/qui/viscoh2o.pdf](http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/viscoh2o.pdf)

Vymazal, J. (2016). *Natural and Constructed Wetlands, Nutrients. Heavy metals and energy cycling, and flow*, Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Chechena de Ciencias de la Vida, Praha, Republica Checa.

Weblog El Agua de Madrid (2006), organizado por la Red Madrileña de Tratamientos Avanzados para Aguas Residuales con Contaminantes no Biodegradables (REMTAVARES), publicado el 1º de diciembre de 2006. Sitio Web:

[https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2006/12/01/53336#:~:text=Los%20reactores%20biol%C3%B3gicos%20secuenciales%20\(SBR,reduce%20sustancialmente%20la%20inversi%C3%B3n%20necesaria.](https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2006/12/01/53336#:~:text=Los%20reactores%20biol%C3%B3gicos%20secuenciales%20(SBR,reduce%20sustancialmente%20la%20inversi%C3%B3n%20necesaria.)

Fuente: Wikipedia, La enciclopedia Libre (2021), recuperada 2 de febrero de 2021, [https://es.wikipedia.org/wiki/Zantedeschia\\_aethiopica](https://es.wikipedia.org/wiki/Zantedeschia_aethiopica)

Zona Cero Izcalli (2018). publicada el 31 de julio de 2018, vecinos buscan recuperar la Laguna de la Piedad #Izcalli. Sitio web: <https://www.facebook.com/zonaceroizcalli/videos/1863184323768722/>.

## 9. ANEXOS.

### 9.1. Documentos históricos relevantes de la Laguna la Piedad.

204

FORMA 110-1

  
ESTADOS UNIDOS MEXICANOS

SECRETARIA DE AGRICULTURA  
Y RECURSOS HIDRAULICOS

VALLE DE MEXICO  
RESIDENCIA DE APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS  
OFICINA DE JUNTAS DE AGUA Y POZOS AGROPECUARIOS

OFICIO R-16.11.3/ 2419  
REG. 2370

ASUNTO: Remitiendo información relativa a la Presa La Piedad, localizada en el Municipio de Cuautitlán Izcalli, Estado de México.

31774 (395)

San Juan de Aragón, D. F., Sep. 15 de 1978.

C. ING. FELIPE PEREZ Y PEREZ  
DIRECTOR GENERAL DE APROVECHAMIENTOS  
HIDRAULICOS  
SECRETARIA DE AGRICULTURA Y RECURSOS  
HIDRAULICOS  
C I U D A D .

SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS  
DIREC. GRAL. DE APROV. HIDR.  
OCT 5 1978  
DIREC. DE RECURSOS HIDRAULICOS

Me refiero a su atento Oficio Núm. 204,2.1.7.-10070, fechado el 3 de Julio último, relativo a la solicitud de que se efectúe la inspección correspondiente para obtener los datos que permitan Declarar de Propiedad Nacional las aguas de la Presa denominada La Piedad, que se localiza en el Municipio de Cuautitlán - Izcalli, Estado de México.

Al respecto comunico a Usted que nuestro personal técnico efectuó la inspección solicitada, comprobando que las aguas de la citada Presa son permanentes, las cuales son aprovechadas para el riego de terrenos de los Ejidos de La Piedad, San José - Huilango y del Rancho San Antonio, que en conjunto suman una superficie de 333-17 Has.

El volúmen de la Presa se estimó en 500 000 M3, aproximadamente, de los cuales el 50 %, se conserva almacenado para el criadero de carpas, que son aprovechadas por los habitantes de los Ejidos arriba anotados en forma pacífica y continúa.

Las aguas en cuestión por encontrarse dentro de la Cuénca del Valle de México, quedan incluídas en la Declaratoria de Propiedad Nacional Núm. 6062, fechada el 19 de Mayo de 1922.

RECEBIDO  
OCT. 13 1978  
DEPTO. DE MANEJO INTERIOR  
OFICINA DE ARCHIVO

DESPACHADO 2 OCT. 1978

2a...  
J. de C.  
T.O.N.

Figura 54. Oficio No. R-16.11.3/2419 de fecha 8 de septiembre del año 1978 (hoja 1) del Expediente 201/44933 del Archivo Histórico del Agua, donde se indica la Declaratoria de Propiedad Nacional de la Laguna la Piedad.



SECRETARIA DE AGRICULTURA  
Y RECURSOS HIDRAULICOS

VALLE DE MEXICO  
RESIDENCIA DE APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS  
OFICINA DE JUNTAS DE AGUA Y POZOS AGROPECUARIOS

FORMA 110-1

OFICIO R-16.11.3/ 2419  
REG. 2370

2

Como información adicional, los Representantes de los Ejidos antes mencionados, manifiestan que en ningún momento han comisionado a los CC. José Zazueta Núñez y Pablo Balderas Campos, Presidente y Secretario General, respectivamente, del Frente Nacional Agrarista, General "Lázaro Cárdenas", para que éstos intervengan en la distribución de los productos de la Presa, toda vez que sus Ejidos Representados se encuentran afiliados a la Confederación Nacional Campesina.

ATENTAMENTE  
SUFRAGIO EFECTIVO. NO REELECCION  
JEFE DEL PROGRAMA HIDRAULICO

ING. MANUEL B. CASILLAS DEL LIANO

- C.c.p. C. Ing. Jesús A. Arcaráz Barragán. Residente de Aprovechamientos Hidráulicos. Edificio
- C.c.p. C. Ing. Pedro Neyra Medel. Jefe de la Oficina de Juntas de Agua y Pozos Agropecuarios. Edificio
- C.c.p. Minutario Valle de México. Edificio
- C.c.p. Minutario Oficina de Juntas de Agua y Pozos Agropecuarios. Edificio

MBCLL/JAAB/PNM/crs.

DESPACHADO 2 OCT. 1978

T.G.N.

Figura 55. Oficio No. R-16.11.3/2419 de fecha 8 de septiembre del año 1978 (hoja 2) del Expediente 201/44933 del Archivo Histórico del Agua, donde se indica la Declaratoria de Propiedad Nacional de la Laguna la Piedad.



SECRETARIA DE AGRICULTURA  
Y RECURSOS HIDRAULICOS

13  
FORMA 110-1 A  
SUBSECRETARIA DE PLANEACION  
DIRECCION GRAL. DE APROV. HIDRAULICOS  
DEPENDENCIA : SUBDIRECC. ZONAS FEDERALES  
DEPTO. DE CONCESIONES  
NO. DE OFICIO : 204.3.1.- 681  
EXPEDIENTE : 201.51 (12) 6235  
ANTECEDENTE : 285

AGUAS- SUPERFICIALES

201/48255

ASUNTO.- Se solicita información adicional sobre la Laguna La Piedad para atender queja del Ejido - San José Huilango, Mpio. de - Cuautitlán Izcalli, Méx.

México, D. F., a 20 de enero de 1982.

C. ING. EDUARDO AZUADA SALAS  
REPRESENTANTE GENERAL DE LA S.A.R.H.  
EN EL ESTADO Y VALLE DE MEXICO  
CAMPAMENTO INO. JOSE L. FAVELA  
FRANCISCO I. MADRO Y AVENIDA 412  
SAN JUAN DE ARAGON - 07950  
MEXICO, D. F.

Contesto su atento oficio No. R15.JPH.RAH.1/0031 del 17 de noviembre de 1981 en el que nos informa sobre la queja del Ejido de San José Huilango por la oposición presentada por el C. RAMON SANCHEZ ZAVALA a que se cultiven los terrenos federales de la Laguna La Piedad, Mpio. de Cuautitlán Izcalli, Méx.

De la documentación que anexa a su oficio citado y de la contenida en el expediente No. 201.51 (12) 6235 a nombre del Ejido quejoso, se llega al conocimiento de lo siguiente:

- 1.- Que los terrenos de esta Laguna son federales según Declaratoria de fecha 8 de abril de 1922 publicada en el Diario Oficial de la Federación del 19 de mayo del mismo año.
- 2.- Que esta Dirección General con base en las facultades que le fija la Ley Federal de Aguas vigente otorgó al Ejido de San José Huilango el permiso precario No. 1124 del 16 de marzo de 1981 por una superficie de 6-45-36 Ha de terrenos federales de esta Laguna.

2

T. G. N.-

Figura 56. Oficio No. 204.3.1.-681 de fecha 20 de enero del año 1982 (hoja 1) del Expediente 201/48255 del Archivo Histórico del Agua, donde se informa sobre la propiedad de los terrenos de la Laguna.



SECRETARIA DE AGRICULTURA  
Y RECURSOS HIDRAULICOS

14

SUBSECRETARIA DE PLANEACION  
DIRECCION GERAL. DE APROV. HIDRAULICOS  
DEPENDENCIA : SUBDIRECC. ZONAS FEDERALES  
                  DEPTO. DE CONCESIONES  
NO. DE OFICIO : 204.3.1.-  
EXPEDIENTE : 201.51 (12) 6235  
ANTECEDENTE : 285

- 2 -

3.- Que al preparar el Ejido de San José Huilango la tierra para cultivarla, el C. RAMON SANCHEZ ZAVALA se lo prohibió argumentando que esos terrenos son de su propiedad, acompañando a su escrito de 19 de octubre de 1981 fotocopia del certificado de inafectabilidad agrícola No. 00872 y del título de propiedad No. 20457.

4.- Con oficio No. 204.2.1.4-17860 del 24 de agosto de 1981 dirigido a esa Representación, esta Dependencia aprobó el plano de demarcación de la Laguna La Piedad, identificado con el No. VM-AH-826 y de él se le envió copia.

A fin de contar con datos suficientes para la atención de este problema, agradeceré a usted disponer que se nos proporcione la siguiente documentación:

- 1.- Copia certificada del certificado de inafectabilidad agrícola No. - 00872 a nombre del C. RAMON SANCHEZ ZAVALA.
- 2.- Copia certificada del título de propiedad del predio que reclama como suyo el C. RAMON SANCHEZ ZAVALA.
- 3.- En copia del plano VM-AH-826 de julio de 1980 ubicar el polígono del terreno otorgado en el permiso procarrio No. 1124 al Ejido de San José Huilango.

T.G.N.-

Figura 57. Oficio No. 204.3.1.-681 de fecha 20 de enero del año 1982 (hoja 2) del Expediente 201/48255 del Archivo Histórico del Agua, donde se entrega el plano VM-AH-826 de julio de 1980 que ubica el polígono del terreno otorgado.



SECRETARIA DE AGRICULTURA  
Y RECURSOS HIDRAULICOS

15  
FORMA 110-1 A

SUBSECRETARIA DE PLANEACION  
DIRECCION GRAL. DE APROV. HIDRAULICOS  
DEPENDENCIA : SUBDIRECC. ZONAS FEDERALES  
                  DEPTO. DE CONCESIONES

NO. DE OFICIO : 204.3.1.-  
EXPEDIENTE : 201.51 (12) 6235  
ANTECEDENTE : 285

- 3 -

Finalmente solicito de usted que se nos envíe una copia del estudio técnico mediante el cual se concluya que la llamada Laguna La Piedad es un vaso natural y "no una Presa": obra artificial hecha por el hombre.

Despues a usted ordenar que esta documentación junta con el informe y su opinión sobre el caso se nos envíe para resolver lo que proceda.

Atentamente.

SUFRAGIO EFECTIVO NO REELECCION  
AL DIRECTOR GENERAL

*Felipe Sacre Gavino*

ING. FELIPE SACRE GAVINO.

C O P I A

RCB/MPE/VPT/jec.  
c.c.p.- Expediente No. 201/48255  
c.c.p.- Subdirección de Zonas Federales.- Presente.  
c.c.p.- Archivo.- Atenas No. 30.- Ciudad.



T. G. N.-

Figura 58. Oficio No. 204.3.1.-681 de fecha 20 de enero del año 1982 (hoja 1) del Expediente 201/48255 del Archivo Histórico del Agua, donde se indica que la Laguna la Piedad es un vaso natural y no una presa.



9.2. Escritos de solicitud de cancelación de descarga en canal pluvial.

Medio Ambiente  
F-1085

Cuautilán Izcalli, Estado de México a 17 de 09 de 2019

Lic. Ricardo Núñez Ayala, Presidente  
Municipal de Cuautilán Izcalli, Estado  
de México

CUAUTILÁN  
IZCALLI  
17 SEP 2019  
RECIBIÓ  
OFICIALIA DE PARTES

F 12712  
14 35  
5/c 9 5/9

El ciudadano César Raúl Sánchez Muñoz con domicilio  
en Ctra. Agrícola #22A, Wixas del Lago, y número  
teléfono 56 73 54 73 44, comparece con fundamento en el artículo 8vo.  
constitucional para exponer una denuncia contra Operagua por comisión de un  
delito ambiental.  
Lo anterior debido a que este abrevado usa nueva tubería  
en el punto de trabajo Wixas del Lago sin haber iniciado a (RZ) lo cual  
se constata a una tubería antigua que va a la laguna  
que desemboca en A. Agrícola de La Piedad.

Firma

Figura 60. Escrito de fecha 17 de septiembre de 2019, recibido por OPERAGUA, con solicitud de cancelación de descarga de aguas negras a la laguna la Piedad.



"2019. Año del Centésimo Aniversario Luctuoso de Emiliano Zapata Salazar. El Caudillo del Sur."



DIRECCIÓN GENERAL  
OFICIO NO. OIOPDM/DG/1878/2019  
ASUNTO: EL QUE SE INDICA  
SEPTIEMBRE 27, 2019

C. GUSTAVO RAUL SCHINCA MUÑOZ  
COORDINADOR DE LA RESTAURACION  
DE LA LAGUNA DE LA PIEDAD  
RIO AGUA NAVAL #10-A,  
COL. COLINAS DEL LAGO  
8513547344  
PRESENTE.

El que suscribe C. **Martin Guerrero Baeza**, en mi carácter de Director General del Organismo Público Descentralizado para la Prestación de los Servicios de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento del Municipio de Cuautlilan Izcalli, denominado "OPERAGUA IZCALLI, O.P.D.M."; mediante NOMBRAMIENTO de fecha diez de abril del año dos mil diecinueve y con fundamento en lo dispuesto en los artículos 8 y 115 fracción III inciso "A" de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 122 de la Constitución Política del Estado Libre y Soberano de México; 1.7, 1.8 y 1.9 del Código Administrativo del Estado de México; 135 del Código de Procedimientos Administrativos vigente en la Entidad; 89, 125 fracción I y 126 de la Ley Orgánica Municipal del Estado de México; 34 fracción I, 37 y 38 de la Ley del Agua para el Estado de México y Municipios; 36 y 40 fracción II del Bando Municipal Vigente para el Municipio de Cuautlilan Izcalli, Estado de México; 21 y 22 fracciones XI, XIX y XXIII del Reglamento interno del Organismo Público Descentralizado para la Prestación de los Servicios de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento del Municipio de Cuautlilan Izcalli. Denominado "OPERAGUA IZCALLI, O.P.D.M."

En atención a su escrito, recibido con fecha 27 de Febrero del presente año, donde solicita la cancelación de una descarga de drenaje que desemboca en la laguna de la Piedad.

Por este conducto le comunico, que personal del Departamento de Mantenimiento y Drenaje realizó los trabajos de cancelación de la descarga en comento, toda vez que personas ajenas al Organismo realizaron dicha descarga, por otro lado se estará al pendiente de cualquier modificación que se realice a la infraestructura sanitaria y pluvial de la laguna de la Piedad.

Sin más por el momento, quedo de usted

ATENTAMENTE  
C. MARTIN GUERRERO BAEZA  
DIRECTOR GENERAL  
DE OPERAGUA IZCALLI, O.P.D.M.

CCP: Ricardo Alvarez Montoya - Director de Construcción y Operación - Hidráulica  
CCP: José Gerardo Aguilar Castro - Departamento de Mantenimiento y Drenaje

Folio: 022

Av. La Súper Lote 3, 7A-7B, Manzana C44A, Col. Centro Urbano, Cuautlilan Izcalli, Estado de México, C.P. 54700

Figura 61. Oficio OIOPDM/DG/1878/2019 de fecha 27 de septiembre de 2019, signado por OPERAGUA, en atención a la solicitud de cierre de descarga de aguas negras en la laguna la Piedad.

Asunto: Solicitud de cancelación de nueva descarga en la laguna de La Piedad proveniente de la avenida 16 de septiembre

C. Salvador Reyes Flores  
Encargado del despacho de la Dirección General de Operagua O.P.D.M.  
Presente.

Estimado Salvador,

En primer lugar le envío un cordial saludo y le agradezco el apoyo brindado por Operagua durante el año pasado (2019) para cancelar una descarga de aguas negras en la laguna de La Piedad proveniente de la avenida 16 de septiembre en la colonia La Piedad, como consta en el oficio OIOPDM/DG/1878/2019 emitido por el Director General de Operagua el 27 de septiembre de 2019, cuya copia adjunto a la presente petición.

Dicho oficio fue emitido como respuesta a una petición que realicé el 27 febrero de 2019, a la cual le fue asignado el folio 652 y cuya copia también adjunto a la presente petición.

A través de la presente le pido que **por favor sea cancelada nuevamente** dicha descarga ya que desde el mes de agosto del presente año 2020, **ha sido abierta nuevamente**.

Sin más por el momento, **esperando su amable respuesta a mi petición** y agradeciendo como siempre su atención, me despido enviándole nuevamente un cordial saludo.

Atentamente

  
M. en C. Gustavo Raúl Schinca Muñoz  
Coordinador de la restauración de la laguna de La Piedad  
Río Aguanaval #10A,  
Col. Colinas de lago, Cuautitlán Izcalli, Estado de México.  
WhatsApp 55 13 54 73 44  
[schinca@ciencias.unam.mx](mailto:schinca@ciencias.unam.mx)

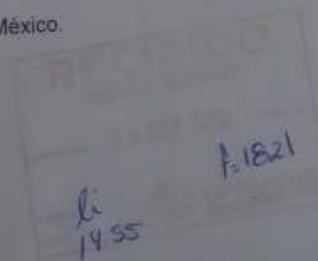


Figura 62 Escrito sin fecha, recibido por OPERAGUA el 11 de Septiembre de 2020, con solicitud de cancelación de descarga de aguas negras a la laguna la Piedad.

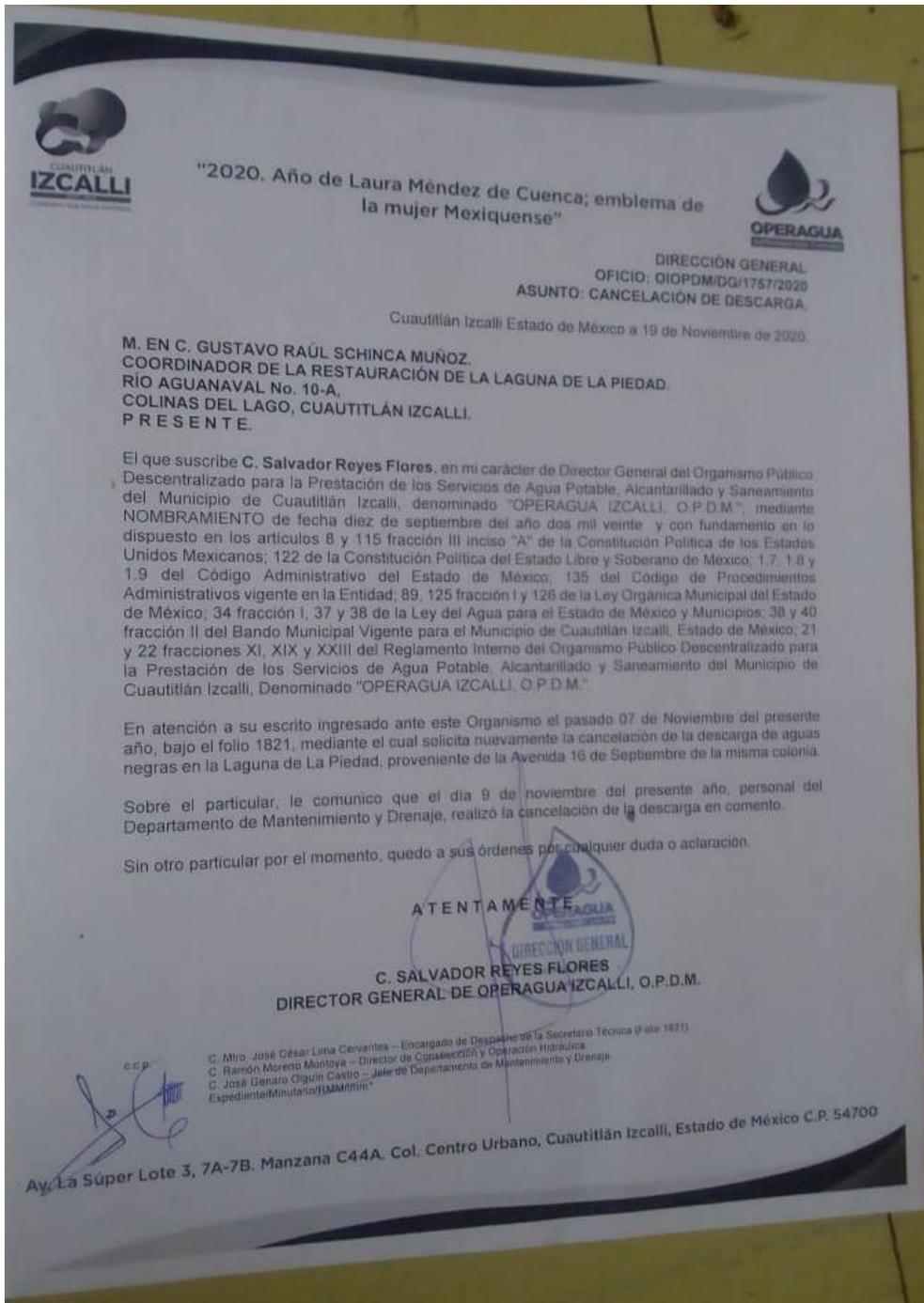


Figura 63. Oficio OIOPDM/DG1757/2020 de fecha 19 de noviembre de 2020, firmado por OPERAGUA, en atención a la solicitud de cierre de descarga de aguas negras en la laguna la Piedad.

### 9.3. Transcripción de entrevistas.

A continuación, se transcriben las respuestas obtenidas de la aplicación del cuestionario para habitantes de los alrededores de la Laguna La Piedad, que con objeto de formar parte de una justificación social para la elaboración de “Estrategia para la selección del escenario conceptual más viable para el mejoramiento y aprovechamiento del agua de la Laguna la Piedad, en Cuautitlán Izcalli, Estado de México”.

#### DATOS DE LA ENTREVISTA

Fecha: 30 de Septiembre de 2020                      Número de entrevista: 01  
Lugar: Vía Telefónica

#### DATOS DEL INFORMANTE

Nombre: Jorge Arzave Orihuela  
Edad: 50                      Género: F ( ) M ( x )  
Colonia en la que vive: Conjunto Urbano Lomas de San Francisco Tepojaco, Cuautitlán Izcalli, Estado de México.

#### CUESTIONARIO:

1. ¿Vive o trabaja cerca de la Laguna la Piedad? Sí ( x ) Habitante ( x ) Trabajador de la zona ( )

*Relativamente cerca, si estamos un poquito lejos, caminando serían unos 20 minutos caminando a la laguna.*

2. ¿Desde cuándo habita o trabaja cerca de la Laguna La Piedad?

*Cerca de 16 años.*

3. ¿Sabe usted si el agua de la Laguna la Piedad es aprovechada de alguna forma, la gente usa el agua de la Laguna para algo?

*Desconozco, cuenta la historia que si había algunos peces*

¿Para qué?

*Que la gente iba a pescar ahí hace ya varios años, no lo vi, eso fueron algunas pláticas con gente del pueblo de Tepojaco.*

4. ¿Sabe si hay personas que hayan enfermado por el aprovechamiento (uso o contacto) del agua de la Laguna la Piedad (enfermedad, edades)?  
¿De qué enfermaron? ¿De qué edades?

*Directamente de la Laguna, desconozco, el área es altamente contaminada, porque tenemos a parte del agua contaminada 2 tiraderos de basura cercanos y aquí la problemática de salud con los basureros si es bastante fuerte, pero ahí por cuestiones de la laguna, me imagino que, si ha de haber algunas enfermedades, porque se detectó un tiradero de químicos o de sustancias químicas. ¿sabe a qué químicos se refiere? No, era como basurero de desperdicios industriales, a un costado de la laguna, ya hace un tiempcito, entiendo sé que se saneo esa parte, como era clandestino, se hizo la denuncia y se ordenó que se limpiara, la ubicación, no la tengo muy bien, pero si era prácticamente a un costado de la laguna, o sea los líquidos lixiviados si alcanzaban a llegar al agua. Pero son imágenes que me platicaron, no tengo la ubicación exacta, pero si supe ahí del basurero a un costado.*

5. ¿Recuerda algún tiempo en el que la Laguna La Piedad fue un lugar de pesca y/o esparcimiento? ¿qué actividades recuerda?

*La gente habla acerca del 2000, yo no la conocí cuando llegué, la conocí tiempo después, platican que no era así muy clara el agua, pero si había ciertos animales viviendo ahí y actualmente, pues creo que no hay, con todas las aguas negras y todo lo que llega ahí, no es factible la vida.*

6. ¿Recuerda si antes había más especies de animales dentro y alrededor de la Laguna La Piedad y de qué tipo?

*Pues bueno, aquí en el área yo he visto mucha de la víbora chicotera que le llaman, había ranitas, unas ranas verdes, llegue a ver liebres, no eran conejos eran más grandes con las patas más largas y algunas coralillo, digo este cascabel, eran víboras pequeñas 20-25 cm con su cascabelito, 2-3 cascabelitos ahí, lo que yo llegué a ver en estos rumbos.*

7. ¿Recuerda si alguna vez, los peces flotaron muertos en la laguna la Piedad? ¿En qué fecha aproximadamente? ¿Sabe la causa? ¿Se tomó alguna medida? ¿Quién llevó a cabo esa medida?

No, esa parte no.

8. ¿Sabe si llegaban a la Laguna la Piedad, aguas que vienen desde de las plantas de Tratamiento?

*Bueno del lado de mi conjunto urbano, se supone que hay dos Plantas de Tratamiento, pero no sirven, las entregaron ahí por el 2003 al organismo de agua, 2003- 2005, pero nunca las pusieron a funcionar, entonces las aguas negras aquí del conjunto urbano y, de una parte del conjunto urbano y de una parte del pueblo de Tepojaco, llegaban a un canal de aguas negras y ese canal de aguas negras, corría a la par de un canal de riego; según la autorización del conjunto urbano, toda el agua negra, debería ser canalizada hacía el río Cuautitlán. Como le comentaba, en teoría hasta donde yo llegué a recorrer, lo más que me acerque por esta parte caminando, de oeste a este; pues corrían las aguas negras por un lado y a la par corría el canal de riego, nunca lo seguí caminando por la rivera hasta la laguna, me imagino que más bien corrían al lado, por ahí por el 2004-2005, posteriormente, supe que se desviaron los cauces para construir, rellenaron los canales, y entiendo, no me consta, entiendo que desviaron el cauce de las aguas negras y negras y dejó de funcionar el canal de riego.*

PARA HABITANTES CIRCUNDANTES A LA LAGUNA LA PIEDAD.

9. ¿Cuenta con servicio de agua potable proveniente de la red de agua municipal en su casa (o trabajo)?

Sí ( x ) ¿Sabe de dónde viene el agua que llega a su casa?

*A nosotros nos llega de Cutzamala, pero no nos llega muy limpia que digamos, muchas veces llega con lodo café, con tono verdoso, en alguna ocasión regulación sanitaria hizo muestreos, lo hizo desde mi llave, de la llave que llega aquí a la casa, pues era prácticamente en la línea de lo potable, lo que si me advirtieron que llevaba mucho cloro.*

No ( ) ¿Cómo obtiene agua para su vivienda?

¿Cuenta con el servicio las 24hrs del día o cuanto tiempo tiene usted el agua disponible?

*Comúnmente nos llega martes y viernes el agua, en un promedio de 5 a 6 horas por día. No soy ambientalista, pero si me he dedicado a la lucha con los tiraderos de basura y yo llevé el caso de la basura a un tribunal internacional que llegó a México, donde conviví con gente de Michoacán, la gente de Michoacán, me dijeron ¿De dónde te llega el agua?, ellos presentaron sus respectivos casos, y dijeron bueno es que les venden esa agua como potable, pero realmente lleva muchas aguas de jale, que son las aguas resultantes del lavado con cianuro del oro, por ejemplo.*

*Usamos cisternas o tinacos lo más grande que se pueda para almacenamiento.*

10. ¿Cuenta con servicio público de drenaje en su domicilio (o el lugar donde trabaja)?

Sí ( x )

¿Sabe si el agua que sale de su casa a ese drenaje recibe algún tratamiento posterior a que sale de su domicilio?

*Esta fracturado, pero si, si contamos con el drenaje. ¿fracturado a que se refiere? Desagraciadamente en el fraccionamiento donde vivo yo, tenemos problemas con las viviendas, es un lomerío que no se confía a muros de contención, son arcillas que a la hora que se mojan se hacen chiclosas y al no haber muro de contención, las casas textualmente la loma, se está desplazando, ese desplazamiento de suelo provoca la fractura de drenajes, entonces ya tenemos ahí presencia incluso de algunos socavones, por la filtración del agua de drenaje o agua potable, incluso los tanques de agua potable, también tiene su fractura y tienen perdida de agua.*

No ( ) ¿Sabe si existen en la comunidad, descargas que vayan a la laguna?

11. ¿Cómo se beneficiaría usted si la Laguna La Piedad estuviera limpia?

*Sería un foco de infección menos, como le comentaba aquí en el área, la Laguna de la Piedad, pues sé que llegan aguas negras aquí de Lomas, de aquí en Lomas se vierten desde aceites de carro, pinturas, varias sustancias de ese tipo de pequeños talleres de las casas, se acumulan allá a cierta distancia, tenemos dos tiraderos de basura, uno clausurado, que derrama sus lixiviados directamente al arroyo San Agustín, que corre a 3 ríos y al río Cuautitlán. Luego en la siguiente loma, tenemos el Tiradero Bicentenario que es un tiradero particular que está funcionando de manera regional, donde nos llega la basura de la Ciudad de México, y también esta exactamente donde nace el arroyo San Pablo, que también es parte de los 3 ríos, es Tepotzotlán, arroyo san Agustín y el arroyo San Pablo, los tres corren hacia el río Cuautitlán, se unen poquito antes del río Cuautitlán y desembocan al río Cuautitlán, los dos arroyos llevan lixiviados de los respectivos los tiraderos de basura, al sanear la Laguna la Piedad, pues nos quitan el tercer foco de infección, nos quedaría todavía la Laguna de Guadalupe que la tenemos al otro lado y que también tiene su grado de contaminación.*

12. ¿Cómo se beneficiaría su comunidad si la Laguna La Piedad estuviera limpia?

*Hablando de la comunidad que padecemos de muchas enfermedades, sería un punto de contaminación menos y al estar limpia el agua y de más, imagino que regresaría la vida al lugar, al estar limpia el agua sería un punto de reunión familiar, un centro recreativo, donde nos podríamos distraer, un área verde de esparcimiento.*

## DATOS DE LA ENTREVISTA

Fecha: 1 de Octubre de 2020

Número de entrevista: 02

Lugar: Vía Telefónica

## DATOS DEL INFORMANTE

Nombre: Eleno Lauro Mendoza Olmos

Edad: 70 Género: F ( ) M ( x )

Colonia en la que vive: Pueblo de San José Huilango, Cuautitlán Izcalli, Estado de México.

## CUESTIONARIO:

1. ¿Vive o trabaja cerca de la Laguna la Piedad?  
Sí ( x ) Habitante ( x ) Trabajador de la zona ( )

*La Laguna de la Piedad está situada a pie del pueblo como a unos 2 km y medio de distancia en el paraje de los Mineros de Santa Rosa y Laderas de San Antonio. Entonces usted si está cerca de la laguna, ahí vive. Vivo como 2.5km y medio, no trabajo, soy secretario del comisariado ejidal del ejido de San José Huilango.*

2. ¿Desde cuándo habita o trabaja cerca de la Laguna La Piedad?

*Desde que tengo uso de razón, aproximadamente por los años 60's, ya nos llevaba mi señor padre a trabajar ahí cerquita como a unos 50m de distancia de la laguna, había una parcelita y ya trabajábamos ahí cerquita en esa parcela, con escasos 8 ó 10 años, ya empezamos a ir ahí.*

3. ¿Sabe usted si el agua de la Laguna la Piedad es aprovechada de alguna forma, la gente usa el agua de la Laguna para algo?  
¿Para qué?

*Hasta los años 2000 aproximadamente la laguna se aprovechaba para los regadíos generales de las parcelas de los ejidos de Huilango, la Piedad y Tepojaco, pero a partir de*

*ese entonces un señor presidente municipal, creo que fue don Julián Angulo, dio permiso a los fraccionadores del fraccionamiento Lomas de Cuautitlán que descargaran sus aguas en esa laguna, según consta por aquí en algunas actas de entrega-recepción de unas plantas tratadoras que iban a poner esas fraccionadoras, que nunca funcionaron, el agua empezó a caer directamente ahí, sin ningún tratamiento a la laguna, entonces se acabó la pesca que hacíamos todos. Con esta pesca en los días de semana santa y días siguientes se repartía algunas regalías a los compañeros ejidatarios de la venta de dichos peces. Se empezó a morir toda la fauna, las aguas se empezaron a encochar, incluso pues ya no se pudieron hacer regadíos en nuestras parcelas por esa sencilla razón de que se envenenó el agua, murió toda la fauna que había ahí, peces, dejaron de llegar los pelícanos, dejaron de llegar los patos silvestres y en fin, muchas aves migratorias que llegaban dejaron de llegar. Entonces de ahí para acá, pues no se ha podido aprovechar esa agua, más que hicieron ahorita el gobierno de Cuautitlán Izcalli abrieron tantito la compuerta para que tuviera el desfogue directamente al río Cuautitlán y está entrando y saliendo el agua, pero en sí el agua está muy contaminada, no hay peces en esa laguna, ya no la aprovechamos nosotros.*

4. ¿Sabe si hay personas que hayan enfermado por el aprovechamiento (uso o contacto) del agua de la Laguna la Piedad (enfermedad, edades)?  
¿De qué enfermaron?  
¿De qué edades?

*En si al parecer los años pasados, hubo por ahí una epidemia que se quejaban de ronchas, de males estomacales, todos los que vivían por ahí cerca y algunas otras situaciones que ha habido, pero como nunca se da a conocer públicamente todo eso, pues ahí queda en el olvido.*

5. ¿Recuerda algún tiempo en el que la Laguna La Piedad fue un lugar de pesca y/o esparcimiento?  
¿qué actividades recuerda?

*Ya le decía yo, hasta antes del año 2000 a nosotros nos servía para la pesca y de ahí, vuelvo a repetir, pescábamos en semana santa para repartirle a los compañeros, se nos repartía a todos una regalía de lo que se podía vender ahí del pescado, incluso nos daban a nosotros para consumo humano, aquí en el pueblo a los miembros del ejido y en semana santa se llenaba totalmente de turismo ahí, turismo local de nuestros pueblos y algunas partes de la ciudad de México, venía gente a pasar ahí, los que no teníamos para salir a las playas, incluso la gente se podía bañar ahí, nos bañábamos más bien.*

6. ¿Recuerda si antes había más especies de animales dentro y alrededor de la Laguna La Piedad y de qué tipo?

*Recuerdo que antes de eso allá por los años de los 50s, incluso Llego a darse el ajolote, el tepocate, la rana, la rana toro y algunos otros peces. Acociles, traíamos y de ahí comíamos, todo eso se acabó. Pelicanos llegaban, el pato silvestre, llegaban como de 3 especies, un*

*pato que le dicen la gallinita de agua, otros 2 tipos de patos que llegaban al lago ahora llegan unos patillos ahí muy chicos, que quien sabe de qué se alimentaran.*

7. ¿Recuerda si alguna vez, los peces flotaron muertos en la laguna la Piedad? si  
¿En qué fecha aproximadamente?

*Si, repito después del año 2000, hubo mortandad de peces, o sea se veía como andaban ahí muertos todos.*

¿Sabe la causa?

*Falta de respiración y envenenamiento más que nada, ya cuando se empezó a contaminar esta agua.*

¿Se tomó alguna medida?

*Ni por parte de salubridad, ni por parte del gobierno del estado, ni por parte del Gobierno Federal, ni por parte de los ayuntamientos municipales, ni por parte de la junta de agua que siempre cobraban las agua, nunca hicieron nada por sanear esa laguna, a pesar de todo tengo por aquí un expediente.*

*Escrito al presidente de la Republica. Min 12 de fecha 4 de mayo de 2019.*

¿Quién llevó a cabo esa medida?

8. ¿Sabe si llegaban a la Laguna la Piedad, aguas que vienen desde las plantas de Tratamiento?

*Conozco las plantas de pasadita, o sea no funcionan las plantas, pasan por ahí (las aguas), pero nunca han funcionado, incluso están destruidas, se robaron todo, bueno Usted ya conoce.*

#### PARA HABITANTES CIRCUNDANTES A LA LAGUNA LA PIEDAD

9. ¿Cuenta con servicio de agua potable proveniente de la red de agua municipal en su casa (o trabajo)?

Sí ( x ) ¿Sabe de dónde viene el agua que llega a su casa?

*El agua de nosotros es de un pozo que se le repuso al Pueblo de San José Huilango, porque el que teníamos en el centro se secó, y aquí nuestro ejido, dimos autorización para que el gobierno del estado y el municipio hicieran un pozo en nuestro ejido y de ahí nos diera agua a nosotros, a una parte del pueblo, y a la otra parte del pueblo le llega agua de los pozos del ramal Atlamica -Teoloyuca, algo así.*

¿Cuánto tiempo tiene usted el agua disponible?

2 horas cada día, a veces.

¿medidor de agua en su casa? si

No ( ) ¿Cómo obtiene agua para su vivienda?

10. ¿Cuenta con servicio público de drenaje en su domicilio (o el lugar donde trabaja)?

Sí ( x )

¿Sabe si el agua que sale de su casa a ese drenaje recibe algún tratamiento posterior a que sale de su domicilio?

*Mi drenaje y el de toda la población cae directamente a un canal, este ya es otro punto, a un canal que llevó años, yo en persona lo puedo decir así, he tratado con muchos gobiernos, muchos candidatos, que se entube ese canal, que antes servía para regar, todas las parcelas de por aquí cerca, todos los cultivos, pero nos alegan que no se puede intubar ese canal, ha de ser por que duran muy poco y se gastan el dinero, ¿verdad? Posiblemente. Y cae directamente a este canal (las aguas del drenaje), que antes era de aguas de regadío, ahora ya es drenaje, y ahí mismo el ayuntamiento, en ese entonces cuando se metió el drenaje al pueblo, se conectó directamente a este canal y ya se agarró como de drenaje, pero nadie ha tenido la dignidad de venirlo a entubar. Supongo que no recibe tratamiento después. Nada, se va directamente, yo siento que una parte va a la laguna de Axotlán, que era antes de San Miguel, de la Exhacienda de San Miguel esa laguna, entonces se va directamente ahí y si no pasa directo hasta la laguna de Zumpango, y yo siento que como están secando la de Zumpango, tengo entendido, por ahí me llegó la información de que ya la están secando, yo creo que va a pasar directamente para que llene el famoso lago de Texcoco, ahí van a ir parar todas las aguas de todos estos pueblos.*

No ( ) ¿Sabe si existen en la comunidad, descargas que vayan a la laguna?

11. ¿Cómo se beneficiaría Usted si la Laguna La Piedad estuviera limpia?

*En lo personal, me sentiría a mi edad, me sentiría, no sé por decirlo de alguna forma realizado, si dejamos esos mantos, bueno esos vasos, reservorios de agua a beneficio de nuestro planeta tierra señorita, que se limpiaran a mí me beneficiaría en eso, si, en eso que Cuautitlán Izcalli que actualmente no cuenta, lo puedo decir así, no cuenta con ningún centro turístico, así de en donde llegue la gente, porque aquí lago de Guadalupe, ya se lo están acabando con las descargas de drenajes también, no cuenta con otro tipo de (centro turístico), más que el lago de los lirios y también ya está súper contaminado, el espejito que está en el parque de las culturas, en realidad Cuautitlán Izcalli no cuenta con centros*

*turísticos, y ahí sería fabuloso para que tuviera Cuautitlán Izcalli un respiro, me sentiría beneficiado con eso.*

12. ¿Cómo se beneficiaría su comunidad si la Laguna La Piedad estuviera limpia?

*Nosotros, mis socios y yo, mis compañeros ejidatarios, para que algo nos llegaría de recurso a los campesinos que perdimos todo, poniendo un corredor turístico, que se saneará la laguna bien, que volviera a ser funcional para el turismo, y que nuestros agremiados o mis familiares pusieran por ahí algunos puestos de comida, no sé, de algo de que mantenernos.*

#### **DATOS DE LA ENTREVISTA**

Fecha: 3 de Octubre de 2020

Número de entrevista: 03

Lugar: Vía Telefónica

Consentimiento para grabar entrevista si:

Consentimiento para publicar audio de la entrevista si:

Consentimiento para publicar la transcripción de la entrevista:

#### **DATOS DEL INFORMANTE**

Nombre: Gustavo Raúl Esquinca Muñoz

Edad: 44 Género: F ( ) M ( x )

Colonia en la que vive: Colinas del Lago, Cuautitlán Izcalli, EDOMEX.

#### **CUESTIONARIO:**

1. ¿Vive o trabaja cerca de la Laguna la Piedad?  
Sí ( x ) Habitante ( x ) Trabajador de la zona ( )

*En mi caso yo vivo en Colinas del Lago, es una colonia que está en Cuautitlán Izcalli y si está cerca de la Laguna la Piedad, aproximadamente a 2km.*

2. ¿Desde cuándo habita o trabaja cerca de la Laguna La Piedad?

*Desde hace 42 años*

3. ¿Sabe usted si el agua de la Laguna la Piedad es aprovechada de alguna forma, la gente usa el agua de la Laguna para algo?

*Si*

*¿Para qué?*

*Para riego, o sea junto a la laguna de la piedad hay parcelas de alfalfa y de avena, este es un bordo, una vez que pasa el agua por la presa de la piedad, abren una compuerta que está en la esquina sureste, en la esquina sureste hay una compuerta que nada más la abren para regar parcelas de avena y de alfalfa. Y el agua de la Planta Tratadora, ese es un uso que le dan después de la presa, de la Laguna, yo le llamo presa porque es un bordo artificial de tierra, es la presa de la Piedad y así está reconocida en varios planos y antes de llegar a la presa, el agua que sale de la Planta Tratadora la Piedad II, esa agua la usan los ejidatarios de Tepojaco, también para regar parcelas y creo que también siembran maíz ellos, entonces los ejidatarios de Tepojaco usan el agua de la Planta Tratadora la Piedad II para regar sus parcelas y cuando no la usan los ejidatarios de Tepojaco, esa agua de la Planta tratadora es la que llega a la laguna, una de las entradas de aguas residuales, no sé si le llaman efluentes o afluentes, la Planta tratadora la Piedad II es un afluente de la Piedad, de la Laguna de la Piedad, y esa agua la usan los ejidatarios de Tepojaco durante los meses de estiaje y el resto del año, pues esa agua llega a la Laguna de la Piedad y los Ejidatarios de Huilango son los que la usan después, el agua de la Laguna de la Piedad la usan los ejidatarios de Huilango para regar sus parcelas de avena y de alfalfa, que son los que te comentaba al principio, que son las que están aguas abajo de la laguna o en la salida de la laguna o el bordo, en la parte baja del bordo, están junto al bordo, son algo así como 6 ó 7 hectáreas que todavía riegan.*

4. ¿Sabe si hay personas que hayan enfermado por el aprovechamiento (uso o contacto) del agua de la Laguna la Piedad (enfermedad, edades)?

*No, no tengo noticia de nadie que se haya enfermado por el agua de la laguna.*

*¿De qué enfermaron?*

*¿De qué edades?*

5. ¿Recuerda algún tiempo en el que la Laguna La Piedad fue un lugar de pesca y/o esparcimiento?

*No, a mí ya me toco conocer la Laguna de la Piedad cuando ya no tenía peces, aunque yo tengo 44 años, 42 años viviendo en Cuautitlán Izcalli, yo iba al espejo de los Lirios que me*

*queda más cerca, entonces la Laguna de la Piedad, yo no la visitaba, porque me quedaba más lejos, entonces yo la laguna de la piedad la empecé a visitar cuando ya no tenía peces.*

¿qué actividades recuerda?

*Sé por comentarios de los ejidatarios incluso con documentos de 1978, en el expediente del archivo histórico cuando fue declarada como propiedad nacional la Laguna de la Piedad ahí hay un documento en ese expediente, donde mencionan que los ejidatarios pescaban y surgió un conflicto por que apareció una persona que decía que los ejidatarios de Huilango no tenían permiso para pescar en la Laguna de la piedad, porque según esta persona era propiedad privada la laguna. Entonces a raíz de ese conflicto de que los ejidatarios de Huilango querían pescar en la Laguna de la Piedad y una persona se los prohibió, iniciaron una denuncia en la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, la cual terminó en una declaratoria de propiedad nacional de la Laguna de la Piedad, entonces en el 78, seguro que pescaban los ejidatarios y hay un documento ahí en ese expediente. Y por testimonios también por ejidatarios de Huilango y Tepojaco me dicen que por ahí del año 2000, 2002, todavía llegaban a pescar y vecinos de Tepojaco con los que he platicado, del pueblo de Tepojaco, mencionan que llegaban muchos pelicanos a esa laguna, obviamente pues a alimentarse de los peces que había, hasta que hubo un año, supongo que fue por ahí del 2002 - 2004 en el que aparecieron todos los peces muertos y los pelicanos bajaban y nada más los picoteaban, pero no se los comían, esa es la referencia, que yo tengo indirectamente.*

6. ¿Recuerda si antes había más especies de animales dentro y alrededor de la Laguna La Piedad y de qué tipo?

*Bueno actualmente hay muchos todavía, hay candeleros americanos, que les llaman monjitas, hay Fulica Americana que son las gallaretas de pico blanco, hay gallareta de pico rojo ahora no recuerdo el nombre científico, hay pato mexicano el Anas Diasi ese está en la categoría de amenazada y endémica en la norma 059 de la SEMARNAT de 2010, hay pato cucharon norteño llegan como 5000-6000 patos cucharones norteños, son migratorios Anas Clypeata se llaman, hay pato tepalcate, creo que se llama Oxyura Jamaicensis, hay otras avecitas playeras también, hay ibis, hay ibis obscuro, llegan ibis oscuros, entonces tiene muchísima vida esa laguna muchas especies, que a pesar de que no hay peces, siguen alimentándose de la misma. Y referencia directa yo no tengo, pero hay una tesis del año 2002, de un biólogo de la FES Iztacala también de la UNAM igual que tu y hay una tesis que te la puedo enviar y ahí hizo un catálogo de las especies de aves que había en el 2002 en la Laguna de la Piedad. Ahí se ve como estaba antes de que se murieran los peces.*

7. ¿Recuerda si alguna vez, los peces flotaron muertos en la laguna la Piedad?

*Si, vecinos de Tepojaco, 2 o 3 vecinos diferentes, independientes me comentaron ese evento de que amaneció llena de peces muertos.*

¿En qué fecha aproximadamente?

*No supieron decirme*

¿Sabe la causa?

*No, no la verdad es que, incluso 2 de ellos, independientemente sin conocerse entre ellos sospechaban o manejaban la hipótesis de que los pelícanos mataron a los peces, de que los mataban, los picoteaban, los mataban, pero no se los comían esa es la percepción que se les quedó a algunos vecinos de Tepojaco.*

¿Se tomó alguna medida?

*Nada, prácticamente nada, por ahí hubo, por ahí del año 2004, un presidente municipal, después te paso el dato exacto en que año fue y que presidente municipal fue, era del Partido del PAN de Acción Nacional, hicieron un proyecto de una ciclovía en la periferia de la Laguna la Piedad, te voy a pasar ese documento, pero ya se quedó ahí el proyecto nada más, nunca lo concretaron.*

*Y es el único esfuerzo que he sabido, por ahí tengo otra noticia, un reportaje, en este momento no recuerdo el año, quizá fue por ahí del 2010 ó 2012, de algunos ejidatarios que hicieron un recorrido por la laguna con algunas autoridades municipales, para exponerles el problema de la contaminación, pero de ahí no pasaron, nada más se quedaron en hacer el recorrido, en la queja verbal, pero nunca hubo una queja oficial por escrito, entonces esos son los 2 únicos esfuerzos que yo recuerdo previamente para la laguna de la piedad desde el 2014 que yo la conozco.*

*Yo en el 2014, hace 6 años empecé ya a realizar una labor de coordinación de los vecinos y de las autoridades municipales para el rescate de la laguna, entonces yo desde el 2014, soy creo que soy la persona que mejor conoce la laguna de la piedad o una persona que mejor conoce la laguna de la piedad y antes de 2014, conozco esos dos intentos que se hicieron, el de la ciclovía y el del recorrido de los ejidatarios con autoridades municipales, esos son los únicos 2 esfuerzos previos que yo conozco, previos al 2014.*

¿Quién llevó a cabo esa medida?

8. ¿Sabe si llegaban a la Laguna la Piedad, aguas que vienen desde las plantas de Tratamiento? *Si, claro, la que te comentaba hace rato que es la de la Planta la Piedad II, que son alrededor de 18 LPS, estimamos que entran 150 LPS de aguas residuales a la Laguna la Piedad y este caudal fue medido en temporada de estiaje, que no trae nada (de lluvia) de mayo, de hecho, lo medimos en mayo, en mayo de 2014, esas son aguas puramente residuales, no traen agua pluvial, no traen agua de lluvia, son netamente aguas residuales algo así como 150 LPS medidos en mayo de 2014. De esos 150 LPS pues sabemos que 18 LPS más o menos son de la Planta Tratadora la Piedad II y los restantes provienen de Lomas de Cuautitlán, en donde hay una Planta Tratadora que no funciona al igual que la Planta Tratadora la Piedad II.*

*La Planta Tratadora de Lomas de Cuautitlán, sus tanques, tienen una capacidad creo que de 26 LPS, entonces ahí ya tenemos 26 LPS de la Planta Tratadora Lomas de Cuautitlán y tenemos 18 LPS de la Planta Tratadora de la Piedad II, ahí llevamos 44 LPS, entonces 44 LPS pues digamos que provienen de las dos Plantas Tratadoras que no funcionan y los otros 106 LPS pues vienen de Lomas de Cuautitlán del fraccionamiento.*

#### PARA HABITANTES CIRCUNDANTES A LA LAGUNA LA PIEDAD

9. ¿Cuenta con servicio de agua potable proveniente de la red de agua municipal en su casa (o trabajo)?

Sí ( x ) ¿Sabe de dónde viene el agua que llega a su casa?

*Creo que viene del sistema Cutzamala*

¿Cuánto tiempo tiene usted el agua disponible?

*Todos los días a la media noche se llenan los tinacos.*

¿medidor de agua en su casa?

*Sí.*

No ( ) ¿Cómo obtiene agua para su vivienda?

10. ¿Cuenta con servicio público de drenaje en su domicilio (o el lugar donde trabaja)?

Sí ( x ) ¿Sabe si el agua que sale de su casa a ese drenaje recibe algún tratamiento posterior a que sale de su domicilio?

*No, sí sé que no recibe ningún tratamiento, Colinas del Lago descarga a algún colector municipal y del colector municipal se va al Emisor Poniente, el Emisor Poniente descarga en la Laguna de Zumpango sin ningún tratamiento. En Cuautitlán Izcalli no hay ninguna Planta Tratadora que funcione, o sea hay como 8 plantas Tratadoras en Cuautitlán Izcalli municipales y ninguna de esas funciona. Creo que hay una que medio funciona que es la de Bosques del Alba, pero esa es otra zona del municipio que está muy distante de Colinas del Lago, todas las demás Plantas Municipales no funcionan. Entonces Colinas del Lago descarga al colector sin ningún tratamiento se va al Emisor Poniente y después a la laguna de Zumpango.*

*Y esta la megaplanta tratadora en Cuautitlán Izcalli, que es del Gobierno del Estado de México, esa es la única que parece que funciona, es la de la CAEM, la de la Comisión del Agua del Estado de México, esa tiene capacidad para 750 LPS, está junto al río Cuautitlán, es la que baja de Lago de Guadalupe, muy cerca de la Laguna de la Piedad.*

*Entonces además de las plantas de tratamiento (de aguas) municipales que no funciona ninguna prácticamente, hay una que medio funciona, está la Planta del gobierno del estado de México de la Comisión de Agua del Estado de México, con capacidad de 750 LPS, la cual creo que ya funciona, porque incluso fue rehabilitada, después de no funcionar durante varios años, al no recibir aguas residuales, digamos que se oxido la planta tratadora, la megaplanta tratadora que se llama presa de Guadalupe, entonces la tuvieron que rehabilitar y darle mantenimiento hace como uno o dos años, por ahí tengo el documento, una nota periodística, le invirtieron como 200 MDP para rehabilitarla y darle mantenimiento, después de estar varios años sin funcionar. La intención es que el agua que está entrando a la Laguna de la Piedad, sea desviada por un colector para que llegue a esta mega planta tratadora y de ahí sea descargada al río Cuautitlán, pero ya cumpliendo con la Norma 001 SEMARNAT 1996. Esa mega planta tenemos la intención, el plan de utilizarla, de aprovecharla ya que está muy cerca de la Laguna de la Piedad, esta como a 500 ó 600 metros de la Laguna de la Piedad.*

*El actual presidente municipal de Cuautitlán Izcalli, Ricardo Núñez Ayala, el mencionó que ya tiene permiso del Gobierno del Estado de México, para que el colector marginal de la Laguna de la Piedad sea conectado a la mega Planta de la CAEM, el presidente municipal verbalmente me manifestó que ya tiene permiso para conectar el colector. Esa mega planta está diseñada para la Presa de Guadalupe, la presa de Guadalupe mide 400 Ha más o menos. La idea es hacer un colector marginal en la presa de Guadalupe un colector marginal por la norte, por la orilla norte y un colector marginal por la orilla sur, de la presa de Guadalupe, entonces interceptarían todas las descargas de aguas residuales tanto por la orilla norte y la orilla sur y esos dos colectores los van a conectar a la mega Planta de la CAEM.*

*El agua de la presa de Guadalupe son aguas residuales del municipio de Nicolás Romero y esas aguas de la presa de Guadalupe las envían a la Laguna de la Piedad, durante un mes al año aproximadamente durante el estiaje, el agua de la presa de Guadalupe la envían a la Laguna de la Piedad, entonces si está sucia la presa de Guadalupe, pues le están echando más contaminación a la Laguna de la Piedad, si se limpiara la laguna de la piedad, si se descontaminara, si se saneara, de todos modos seguiría la fuente de contaminación de la Presa de Guadalupe, durante un mes (de apertura de compuerta).*

No ( ) ¿Sabe si existen en la comunidad, descargas que vayan a la laguna?

11. ¿Cómo se beneficiaría Usted si la Laguna La Piedad estuviera limpia?

*Mi beneficio, el beneficio que yo recibiría individualmente, pues sería un área de esparcimiento, un área natural de esparcimiento, además de que me permitiría incluso realizar más actividades.*

*Yo por ejemplo ahorita no puedo entrar a la laguna a nadar, ni siquiera puedo meter los pies al agua para refrescarme en un día caluroso, porque son aguas residuales que yo creo que me carcomerían la piel o podría hasta tener una infección dermatológica, entonces ahorita*

*yo no puedo ni meter los pies al agua y para mí sería un área de esparcimiento como el espejo de los lirios.*

*El espejo de los lirios es un lugar maravilloso donde todavía tiene peces y está a un kilómetro de la Laguna de la Piedad, tiene peces, llegan pelicanos, hay una ciclista alrededor, hay paseos a caballo, hay palapas, hay asadores, o sea podría ser un área de esparcimiento muy bonita la Laguna de la Piedad, así como está el espejo de los lirios, así podría estar la Laguna de la Piedad. Y pues es un lugar de relajación, ósea ahorita, pues a veces la vida acelerada, moderna que llevamos, pues requiere de lugares como estos, áreas naturales que nos permitan sanar o aliviar esa angustia de la vida tan ajetreada que llevamos en las ciudades, yo creo que ese sería un beneficio, tener un beneficio personal sería que tendría un espacio adicional al Espejo de los Lirios muy cerca de mi casa, una reserva natural de esparcimiento, ese sería mi beneficio personal.*

12. ¿Cómo se beneficiaría su comunidad si la Laguna La Piedad estuviera limpia?

*Sería más o menos el mismo beneficio que yo recibo de manera personal, pero sería un beneficio multiplicado por 600mil, imagínate si ese es el beneficio que yo recibiría como persona pues en Cuautitlán Izcalli habemos alrededor de 600 mil habitantes, entonces ese beneficio se multiplicaría a 150 mil familias, por decir algo, pensando en que hay 4 personas en promedio por familia, pues sería un beneficio para 150mil familias. En medio de una ciudad que es la más grande de todo el continente, la Ciudad de México es la más poblada de todo el continente americano con alrededor de 22 millones de habitantes y es la décima ciudad más poblada de todo el mundo. Entonces sería fenomenal que, en una ciudad tan grande, la décima ciudad más poblada de todo el planeta, tuviera espacios, áreas verdes que además funcionarían para captar el agua pluvial, están sobre explotados los mantos acuíferos del valle de México. Entonces si se mantiene el área verde alrededor de la Laguna de la Piedad, pues sería una zona de recarga de mantos acuíferos de agua potable para las siguientes generaciones, o sea es un beneficio enorme, alrededor de la Laguna de la Piedad hay algo así como 100 Ha o 200 Ha agrícolas, entonces si logramos rescatar la Laguna de la Piedad y que se convierta en un parque ecoturístico de 100-200 Ha, además de las 35 Hectáreas de la Laguna, sería una zona bastante grande de recarga de mantos acuíferos y de captación de dióxido de carbono y serviría para inhibir el calentamiento global, o sea es un beneficio a nivel mundial y más en una ciudad donde el calentamiento global va a ser la Ciudad de México y los municipios conurbanos, aquí va a haber un calentamiento global mucho más fuerte, mucho mayor el calentamiento global, el aumento de temperatura va a ser mucho mayor en el Valle de México que el promedio a nivel mundial, por ser una ciudad con concreto, con tanto concreto.*

*Entonces una reserva ecológica, un parque natural de 200 Ha en la Laguna de la Piedad, pues sería un aliviane al calentamiento, ayudaría a disminuir la temperatura de la Ciudad, en particular la temperatura en Cuautitlán Izcalli podría disminuir con ese tipo de reservas ecológicas.*

*Entonces tenemos captación de dióxido de carbono, tenemos recarga de mantos acuíferos, tenemos un área de esparcimiento para la familia y además una escala en la ruta migratoria de las aves, ósea todas las aves que viajan desde el norte del continente americano o hasta*

*el sur del continente americano o hasta centro américa, necesitan escalas para alimentarse, si les quitamos esta escala de la Laguna de la Piedad, bueno al regresarles esta escala, porque ya era una escala en la ruta migratoria de aves, les estaríamos regresando una nueva escala que sería una fuente de alimentación y descanso de todas estas aves, entonces tienen mayor probabilidad de sobrevivir, entre mayores lugares tengan para descansar y para alimentarse, pues tienen mayores posibilidades de sobrevivir todas estas aves migratorias, y llegan hasta acá hasta Canadá, Estados Unidos, algunas hasta Chile, Argentina, entonces también el beneficio ecológico es enorme.*

*En particular nuestra especie el pato mexicano, acuérdate, te recuerdo, es una especie amenazada y endémica, la Laguna de la Piedad sería un hábitad adicional, actualmente hubo una epidemia, un evento de botulismo, en enero de este año (2020) murieron muchos patos cucharones norteros, miles como 4000-5000 patos cucharones norteros de la presa de Guadalupe, por botulismo y el botulismo se debe a que hay descargas de aguas negras, está provocado por una bacteria y todo ese botulismo de milagro no llegó a la laguna de la Piedad, pero ese botulismo que afectó a los patos cucharones, también puede afectar a los patos mexicanos, estamos hablando de que una especie amenazada y endémica, catalogada en la Norma (de la SEMARNAT) 059 está en peligro de contagiarse de botulismo y de darle el último empujón para que se extinga el pato mexicano, entonces tenemos que evitar eso, es una especie amenazada y endémica, es decir que nada más vive aquí en nuestro país y está a punto de pasar al estatus en peligro de extinción, es su siguiente estatus en la norma oficial. Entonces para evitar eso pues también nos ayudaría limpiar la laguna de la Piedad, para proteger al pato mexicano Anas Diasi.*

*Me faltó comentarte que el colector marginal de la Laguna de la Piedad, tengo entendido que OPERAGUA, que es el OO municipal del agua potable y alcantarillado de Cuautitlán Izcalli, ya hizo el proyecto ejecutivo de ese colector marginal. Tengo entendido por información que me ha dado un ingeniero que trabaja en OPERAGUA, ese colector marginal según el proyecto ejecutivo mediría algo así como 2 kilómetros y medio de longitud y un diámetro de 61cm y costaría aproximadamente 4 millones y medio de pesos, o sea que es muy barato, muy barato hacer ese colector. Y los colectores marginales de la presa de Guadalupe, ya está terminado uno de los dos, ya sea el sur o el norte no sé cuál de los dos y el otro colector de la presa de Guadalupe, tiene un 90% de avance, o sea que está a punto de ser terminado y este año tengo un reportaje periodístico una nota, un boletín informativo del Gobierno del Estado de México, donde mencionan que este año ya fue retomada la construcción del 10% del colector que falta, de la presa de Guadalupe. Con eso se pueden hacer una idea ustedes de la inversión que se requeriría para los colectores, tanto de la Presa de Guadalupe, como el de la laguna de la Piedad que es muy barato, es muy esperanzador, que ese colector marginal de la Laguna de la Piedad tenga un costo aproximado estimado de 4 millones y medio de pesos, el que sea ese costo tan barato, es muy esperanzador para la Laguna, el presidente municipal se comprometió hace un mes (septiembre 2020) más o menos en una reunión que tuvimos en que ese colector marginal lo van a construir este año, el de la laguna de la Piedad.*

*Ojalá, además es un proyecto no muy grande, por lo que mencionas de la distancia que hay, si es factible de hacerlo.*

*Y el costo, es muy poquito 4 millones y medio de pesos para el ayuntamiento, hay casas en colinas del lago que cuestan un millón y medio de pesos y en bosques del lago hay casas que cuestan 4-5 MDP, estamos hablando que el colector marginal cuesta lo mismo que una casa, por ejemplo, para darnos una idea de que tan barato es este colector y estamos esperando por supuesto que Ustedes nos ayuden, la UNAM, que el Dr. Victor Manuel Luna Pabello nos estén ayudando, tú nos estés ayudando Ruth, para hacer el proyecto del humedal artificial pues es una maravillosa idea, porque el colector lo único que conseguiríamos es detener el daño, detener que siga avanzando el daño a la Laguna, pero la otra parte la que si nos están ayudando muchísimo ustedes en la UNAM pues es en reparar el daño, después de 20 años aproximadamente 18 años de descargas de aguas residuales crudas, pues ahora lo que sigue es reparar el daño, con el colector se va a detener el daño pero se necesita reparar el daño, pues ojala que se pueda hacer con humedales artificiales, ahí si necesitamos la ayuda de ustedes, de ti Ruth para que nos ayuden a diseñar este humedal artificial y pues reparar el daño acumulado en la laguna.*

*Lo que queremos es volver a tener peces es lo ideal, si llegamos a tener peces en la Laguna de la Piedad, pues es un bioindicador de que el agua es de buena calidad, relativamente, es de buena calidad para la fauna silvestre. Si llegamos a tener peces, significa que el agua es apta para la fauna silvestre, que es lo que estamos buscando como objetivo tener peces y pues a raíz de eso se pueden generar actividades ecoturísticas que se me olvido comentarte. Por ejemplo, el beneficio para toda la comunidad, pues además de un área de esparcimiento, además de recargar los mantos acuíferos, además de captar dióxido de carbono, pues están las actividades económicas para los ejidatarios, ósea ellos pueden, al reactivarse como un área ecoturística la Laguna de la Piedad si logramos reactivarla, va a detonar varias actividades económicas en torno al ecoturismo, entonces eso sería otro beneficio, serían fuentes de empleo, fuentes de ingresos para los ejidatarios de Huilango y de Tepojaco, pueden ahí vender comida, pueden vender comida los fines de semana, pueden hacer paseos a caballo, o sea son muchas actividades económicas que beneficiarían a los ejidatarios tanto de Huilango como de Tepojaco.*

#### **DATOS DE LA ENTREVISTA**

Fecha: 03 de octubre de 2020

Número de entrevista: 04

Lugar: Vía Telefónica

#### **DATOS DEL INFORMANTE**

Nombre: Aureliano de la Rosa de Jesús

Edad: 69 años Género: F ( ) M ( x )

Colonia en la que vive: San José Huilango, Cuautitlán Izcalli, Edomex.

**CUESTIONARIO:**

1. ¿Vive o trabaja cerca de la Laguna la Piedad?  
Sí ( x ) Habitante ( x ) Trabajador de la zona ( )

*Vivo cerca de la Laguna de la Piedad, pues ahorita ya trabajo en lo nuestro, en lo propio en el negocio particular de nosotros mismos (Entonces también trabaja en la zona podría decir) somos agricultores y ahorita estoy como comisariado ejidal.*

2. ¿Desde cuándo habita o trabaja cerca de la Laguna La Piedad?

*Pues casi los 69 años que tengo de vida, porque soy nativo de aquí.*

3. ¿Sabe usted si el agua de la Laguna la Piedad es aprovechada de alguna forma, la gente usa el agua de la Laguna para algo?

*Claro que sí, bueno desde esa laguna desde que yo tengo uso de razón ya estaba esa laguna.*

¿Para qué?

*Entonces todo lo que es alrededor de la Laguna hay tierras de cultivo, entonces las personas utilizaban esa agua que se almacenaba ahí para regar sus parcelas, ese es el uso que le daban al agua de la laguna y aun así todavía le siguen dando algunos, porque ya se está acabando la agricultura, precisamente por la contaminación que tienen las aguas, ya están muy contaminadas, entonces ya las siembras no se dan tan fácilmente.*

4. ¿Sabe si hay personas que hayan enfermado por el aprovechamiento (uso o contacto) del agua de la Laguna la Piedad (enfermedad, edades)?

*Pues más bien, yo pienso que de que hubo, si hubo personas, hubo personas que contaminaron el agua de la Laguna. Yo no estoy muy seguro pero según luego ya ve los comentarios que dicen: que hubo personas que fueron a lavar sus pipas de amoniaco ahí a la Laguna y fue lo que causó que toda la fauna que hubo ahí se muriera, desapareció todo lo que la laguna tenía, entonces nosotros pues sí lo lamentamos bastante porque era algo que pues beneficiaba a todos los ejidatarios y no nada más a los ejidatarios, sino a personas que se acercaban por ahí para ver si les vendíamos o les regalábamos unos pescaditos en tiempo de Semana Santa, pues se acercaban desde luego no se los cobrábamos -"no, pues llévenselos"-, había muchísimos pescados, había veces que todavía a los que iban ahí a pescar se les repartía, -"sabes que, pues llévate unos 2-3 botes de esos grandes de pescado*

*y repártelo entre tus familiares que no vinieron.”- Entonces, era muy bonito, ahora lamentablemente, ya no tenemos todo de eso, debido a esa contaminación, esos químicos que le echaron a la Laguna.*

*Pienso que sí, que si se han enfermado por la contaminación las personas que viven ahí alrededor de la laguna, porque hay muchas casitas ya ahorita. Entonces los niños si se llegan a enfermar, luego con la contaminación que hay se llega uno a enfermar, ahora imagínese estar percibiendo ahí el mal olor de la laguna y luego en tiempo de calores todavía, pues sí es bastante el foco de infección.*

¿De qué enfermaron?

¿De qué edades?

5. ¿Recuerda algún tiempo en el que la Laguna La Piedad fue un lugar de pesca y/o esparcimiento?  
¿qué actividades recuerda?

*No, como no, en ese tiempo cuando estábamos, yo estaba yo en el 2000 estuve también como representante ejidal del 2000 al 2003, en ese lapso fue como en el 2001 o en 2002, cuando sucedió eso de que echaron químicos a la laguna, porque después de nosotros que entro la otra administración en el 2003, ya no hubo pesca. Incluso abrían las compuertas para regar las parcelas y en las tierras nada más se veían blanquear las carpas muertas que salían. Todas salieron por el agua que salía de la compuerta para regar las tierras, entonces fue por el 2000-2002, porque en el 2003 cuando entraron ellos ya en semana santa ya no dieron carpas porque ya no había. Entonces fue del 2000-2003 que estuvimos nosotros, en ese lapso fue cuando contaminaron las aguas de la Laguna.*

6. ¿Recuerda si antes había más especies de animales dentro y alrededor de la Laguna La Piedad y de qué tipo?

*Antes había muchísimas especies de aves, ahorita ya no hay nada, ve uno una parvadita de patos, hay, pero muy, muy escasos, anteriormente si había muchísimo pato, había pato que le decían la codorniz, la gallinita que le decían había los pelícanos, había muchas especies de patos, de carpas. Por ejemplo, de las carpas había de la huachinanga, había de la ese del pescado robalo, de la trucha que se le dicen, de la mojarra.*

*Todo eso había ahorita ya ninguna de estas especies hay, ahorita todo se terminó por la contaminación. Entonces qué tipo de pescados o de estos puede llegar ahí si esta todo bien contaminado.*

*¡Horrible, horrible, horrible que esta!*

*En donde se recopila el agua hasta se ve toda como esta toda la nata de la suciedad que hay, excremento y de todo eso, está muy feo. Entonces ya personas antes se comían por ejemplo unos chintoniles, no sé si los conozca, los chintoniles, las verdolagas, que las malvas, que los cenizos, los huanzontles. Todo eso juntaban de las tierras, porque el agua que salía de ahí era agua muy cristalina que llegaba de la presa de Lago de Guadalupe, entonces el*

agua estaba muy bien, muy limpia, incluso nosotros cuando íbamos a cuidar los animales por ahí cerca, había veces que hacíamos una cuevita a un ladito en el bordo de la laguna y luego luego salía el agua cristalina y de ahí nos íbamos y nos empinábamos o con una botella rota, pues la cortábamos con esa botella sacábamos agua para tomar, entonces estaba limpia el agua.

Pero ahorita, ahorita ya ni: "Te voy a juntar unos quintoniles, no pues ahí, unas malvas, unos quelites, o algo -¿y de donde los vas a juntar?- No esa agua está bien sucia, bien contaminada", y si, la verdad sí. Entonces pues ahorita ya se perdió todo, la forma de vida de la gente igual, porque antes que no tenía para carne u otra cosa –"pues vamos a juntar unos quelites, unas verdolagas, unas malvas o huanzontles, cenizos"-, lo que fuera y ya iban y ya regresaban con sus hierbas para hacerlas, pero estaban limpiecitas, ahorita ya están bien contaminadas, ¿ya quién va a comprar?, o ¿quién va a juntar de eso?

Compramos, no sabemos, como dicen: "ojos que no ven, corazón que no siente". Compramos y no sabemos a lo mejor hasta de esas de ahí nos traen de por ahí mismo.

7. ¿Recuerda si alguna vez, los peces flotaron muertos en la laguna la Piedad? Si  
¿En qué fecha aproximadamente?

Le digo que, en el 2003, 2002, 2003, no pues sí, si flotan es que esos en cuantos se mueren flotan, y no nada más los peces, las ranas, luego luego las ranas salen con la pancita para arriba, y empiezan a flotar, en el momento en el que se mueren empiezan a flotar. Peces y ranas, pues de todas las especies, las ranas, los peces, los criles, los acociles, los ajolotes, lógico flotan nada más se llenan de agüita y empiezan a flotar, nada más se veían todos los animalitos encima. Y cuando regaron en las milpas, nada más se veían blanquearse todos los pescados los animalitos que había.

¿Sabe la causa?

La contaminación que según nos dijeron que habían lavado las pipas de amoniaco ahí en la Laguna, entonces lógico que la contaminaron y eso fue la causa de que los animalitos hayan muerto.

¿Se tomó alguna medida?

No creo, pues eso ya fue yo pienso que de acuerdo con los del ayuntamiento. Entonces sí, pues no hacían caso, nosotros hicimos un oficio que le giramos directamente al Gobernador Alfredo (del Mazo) y a López Obrador, porque realmente administraciones pasan, administraciones vienen y yo digo que todo fue en coordinación con los del municipio de la administración que en su momento estuvo, porque realmente hicieron muchos fraccionamientos y los fraccionamientos, pues todos sus desechos los echan a la Laguna, entonces si realmente los municipios sabían que no tenían las descargas en los lugares adecuados pues no hubieran autorizado esos fraccionamientos y sin embargo lo hicieron. Nosotros adquirimos unas hojas de entrega-recepción, en donde nos hacen ver desde que

*fecha habían entregado y a nosotros nos dijeron: “no, es que no tenemos la entrega-recepción”, y ya después conseguimos toda esa información y entonces...*

¿Quién llevó a cabo esa medida?

8. ¿Sabe si llegaban a la Laguna la Piedad, aguas que vienen desde las plantas de Tratamiento?  
*No, las plantas de tratamiento, según pusieron plantas de tratamiento, pero unas plantas que nunca funcionaron, nunca funcionaron, cuando los presidentes en ese entonces estaban fungiendo, daban su informe y decían: “se invirtió tantos MDP en la planta tratadora fulana de tal”, pero nunca funcionaron esas plantas, entonces esa agua llegaba directamente del Lago de Guadalupe y llegaba de Lago de Guadalupe y se metía a la Laguna, cuando las personas regaban bajaba el nivel, entonces ya tenían sus guías que tenían que ir a Lago de Guadalupe, para que abrieran sus compuertas por que el nivel del agua de la Piedad ya había bajado, entonces abrían las compuertas y ya se llenaba la laguna de acá de la Piedad, pero no llegaban de una planta tratadora ni nada.*

PARA HABITANTES CIRCUNDANTES A LA LAGUNA LA PIEDAD

9. ¿Cuenta con servicio de agua potable proveniente de la red de agua municipal en su casa (o trabajo)?

Sí ( x )

¿Sabe de dónde viene el agua que llega a su casa?

*Tenemos agua potable que viene de los pozos de Izcalli, nosotros tenemos agua de Izcalli, el agua potable llega por la Tubería y ya nos llega a los domicilios.*

¿Cuánto tiempo tiene usted el agua disponible?

*Ahorita está muy escaso, hay veces que nos llega unas 2 veces a la semana y no completo llega unas 3 horas, 2 horas, y hay veces que no llega en un día, hay veces que nos llega en tres días, o sea que no hay horarios ni hay días en que vaya a llegar o días que no. Cuando nos anuncian que van a hacerle mantenimiento al Cutzamala nos avisan y nos tarda el agua una semana, más de una semana.*

¿medidor de agua en su casa?

*No, pagamos, así nada más.*

No ( ) ¿Cómo obtiene agua para su vivienda?

10. ¿Cuenta con servicio público de drenaje en su domicilio (o el lugar donde trabaja)?

Sí ( x )

¿Sabe si el agua que sale de su casa a ese drenaje recibe algún tratamiento posterior a que sale de su domicilio?

*La verdad no tengo idea, yo sabía que, en Cofradía, un Fraccionamiento que se llama Cofradía, ahí tienen unas plantas tratadoras donde tratan el agua, entonces el agua que llega de los drenajes llega a esos tanques que están ahí grandes y ahí la están tratando y ya de ahí tienen un tubo que le echan a la barranca, pero ya sale el agua limpia, ya sale el agua tratada.*

No ( ) ¿Sabe si existen en la comunidad, descargas que vayan a la laguna?

11. ¿Cómo se beneficiaría Usted si la Laguna La Piedad estuviera limpia?

*Para mí sería una satisfacción muy grande, porque realmente nosotros, ahora si como lo estaba comentando el señor don Lauro, ya don Lauro tiene 70 años, yo tengo 69, ahí vamos, entonces le digo, pues ya el poco tiempo que tengamos, que Dios nos preste vida, pues que nos de la gracia y que realmente veamos que nuestros sueños que hemos tenido de años se hagan realidad, aunque no los disfrutemos, pero al menos pues dejamos una buena imagen, para nuestra familia, para nuestra comunidad.*

12. ¿Cómo se beneficiaría su comunidad si la Laguna La Piedad estuviera limpia?

*YO pienso que nos beneficiaríamos, por ejemplo, no nada más los ejidatarios, sino los que viven ahí alrededor, porque pues ahorita la forma de vida está muy difícil, entonces a lo mejor se pensaría que se dijera: "Saben que, pues vamos a poner una palapita, vamos a hacer una asociación, vamos a hacer una cooperativa, vamos a comprar una lanchita, unas dos lanchitas y vamos a empezarle por ahí, ¿no?, para que ya tengamos un ingreso". Entonces pues eso también la gente ya se motivaría por qué diría: "Pues vamos ahí a la Piedad, el agua esta cristalina, y hay antojitos mexicanos que venden, hay una fondita donde venden comida, etcétera, etcétera".*

*Y entonces por ese lado se beneficiarían todos, no nada más los ejidatarios, todos los que viven por ahí cerca y los que, los hijos de los ejidatarios, los nietos de los ejidatarios y vieran que todo eso estuviera bien limpiecito.*

*Eso sería en cuanto a que si estuviera el agua limpia y se beneficiaría por ese lado por que cualquiera se acercaría ahí y le diríamos a la familia: "saben que vamos a hacer día de campo, aunque llevemos nuestras tortas, nos llevemos nuestra comida, allá nos vamos a sentar a la orilla del río, no vamos a percibir malos olores, porque el agua esta cristalina mira, a lo mejor los niños andarían en un charquito y ahí andan" pero con esto, pues a que se exponen a que reciban una fuerte infección.*

## DATOS DE LA ENTREVISTA

Fecha: 6 de octubre de 2020 Número de entrevista: 05

Lugar: Vía Telefónica

Consentimiento para grabar entrevista: Si

Consentimiento para publicar audio de la entrevista: Si

Consentimiento para publicar la transcripción de la entrevista: Si

## DATOS DEL INFORMANTE

Nombre: Diego Vivar Sánchez

Edad: 22 Género: F ( ) M ( x )

Colonia en la que vive: Fraccionamiento la Piedad, Cuautitlán Izcalli, Edomex.

## CUESTIONARIO:

1. ¿Vive o trabaja cerca de la Laguna la Piedad?

Sí ( x ) Habitante ( x ) Trabajador de la zona ( )

2. ¿Desde cuándo habita o trabaja cerca de la Laguna La Piedad?

*Desde hace aproximadamente 15 quizá 16.*

3. ¿Sabe usted si el agua de la Laguna la Piedad es aprovechada de alguna forma, la gente usa el agua de la Laguna para algo?

*Sí.*

¿Para qué?

*Yo sabía que era de tierra para Cultivos*

4. ¿Sabe si hay personas que hayan enfermado por el aprovechamiento (uso o contacto) del agua de la Laguna la Piedad (enfermedad, edades)?

*No conozco a nadie que se haya enfermado.*

¿De qué enfermaron?

¿De qué edades?

5. ¿Recuerda algún tiempo en el que la Laguna La Piedad fue un lugar de pesca y/o esparcimiento?

*Si, de hecho, era un lugar muy recurrido por mi familia. Dábamos algunas vueltas los fines de semana y recuerdo muy bien un día en que pasamos y todos los peces estaban encallados en la orilla.*

¿qué actividades recuerda?

*Caminatas.*

6. ¿Recuerda si antes había más especies de animales dentro y alrededor de la Laguna La Piedad y de qué tipo?

*Recuerdo que había garzas y patos, y bueno los peces.*

7. ¿Recuerda si alguna vez, los peces flotaron muertos en la laguna la Piedad? si  
¿En qué fecha aproximadamente?

*Hace como 10 diez años.*

¿Sabe la causa?

*La causa No, pero quiero pensar que fue por anoxia.*

¿Se tomó alguna medida?

*No, que yo sepa no hubo ninguna medida.*

¿Quién llevó a cabo esa medida?

8. ¿Sabe si llegaban a la Laguna la Piedad, aguas que vienen desde las plantas de Tratamiento?

*Conozco las Plantas de tratamiento, pero no sabía que llegaban a la Laguna.*

PARA HABITANTES CIRCUNDANTES A LA LAGUNA LA PIEDAD

9. ¿Cuenta con servicio de agua potable proveniente de la red de agua municipal en su casa (o trabajo)?

Sí ( x )

¿Sabe de dónde viene el agua que llega a su casa?

*Del Cutzamala.*

¿Cuánto tiempo tiene usted el agua disponible?

*La tenemos disponible de 5:30 de la mañana a 8:30 de la mañana.*

¿medidor de agua en su casa?

*Sí.*

No ( ) ¿Cómo obtiene agua para su vivienda?

10. ¿Cuenta con servicio público de drenaje en su domicilio (o el lugar donde trabaja)?

Sí ( x )

¿Sabe si el agua que sale de su casa a ese drenaje recibe algún tratamiento posterior a que sale de su domicilio?

*Como tal, no, no sé.*

No ( ) ¿Sabe si existen en la comunidad, descargas que vayan a la laguna?

11. ¿Cómo se beneficiaría Usted si la Laguna La Piedad estuviera limpia?

*Sería un lugar de esparcimiento para mí, ya que, en las cercanías, por lo menos en el fraccionamiento y en la colonia no hay espacios de uso público de ese tamaño, ni con ese grado de tranquilidad al que se puede llegar, yo lo ocuparía más por eso, como un espacio lúdico.*

12. ¿Cómo se beneficiaría su comunidad si la Laguna La Piedad estuviera limpia?

*Aparte de la necesidad del espacio lúdico, podría ser aprovechada en otras actividades que beneficiaran a las comunidades aledañas, inicialmente ese era su propósito, ¿no?*

*Si fuera el agua de mejor calidad, no se los cultivos podrían realizar o la acuacultura podría ser una buena actividad para las personas que habitan, tanto económico como desarrollo humano.*

#### **DATOS DE LA ENTREVISTA**

Fecha: 23 de Octubre de 2020 Número de entrevista: 06

Lugar: Vía Telefónica

Consentimiento para grabar entrevista: s

Consentimiento para publicar audio de la entrevista: si

Consentimiento para publicar la transcripción de la entrevista: si

#### **DATOS DEL INFORMANTE**

Nombre: Gabriela Monreal Peñaloza

Edad: 26 Género: F ( x ) M ( )

Colonia en la que vive: San Francisco Tepojaco, Cuautitlán Izcalli, Edomex.

#### **CUESTIONARIO:**

1. ¿Vive o trabaja cerca de la Laguna la Piedad?

Sí ( x ) Habitante ( x ) Trabajador de la zona ( )

2. ¿Desde cuándo habita o trabaja cerca de la Laguna La Piedad?

*Desde hace 26 años.*

3. ¿Sabe usted si el agua de la Laguna la Piedad es aprovechada de alguna forma, la gente usa el agua de la Laguna para algo?

*Ahorita no tengo el conocimiento, pero antes mi abuelita y su esposo, mi abuelito, utilizaban el agua para riego, para sus milpas.*

¿Para qué?

*Para riego.*

4. ¿Sabe si hay personas que hayan enfermado por el aprovechamiento (uso o contacto) del agua de la Laguna la Piedad (enfermedad, edades)?

*No, ahorita no, no he sabido nada de eso.*

¿De qué enfermaron?

¿De qué edades?

5. ¿Recuerda algún tiempo en el que la Laguna La Piedad fue un lugar de pesca y/o esparcimiento?

*Si.*

¿qué actividades recuerda?

*Me acuerdo cuando mi papá nos llevaba de día de campo, así para pescar y eso.*

6. ¿Recuerda si antes había más especies de animales dentro y alrededor de la Laguna La Piedad y de qué tipo?

*Todavía hay patos, pero ya no como antes, en la temporada de frío venían los pelicanos y ahorita pues ya no, había mucha fauna, muchas aves perdón, serpientes y todo eso, hace como 3, 4 meses hicimos limpieza y ya no hay casi.*

7. ¿Recuerda si alguna vez, los peces flotaron muertos en la laguna la Piedad?

*NO recuerdo.*

¿En qué fecha aproximadamente?

¿Sabe la causa?

¿Se tomó alguna medida?

¿Quién llevó a cabo esa medida?

8. ¿Sabe si llegaban a la Laguna la Piedad, aguas que vienen desde las plantas de Tratamiento?

*Si, cuando fuimos a hacer la limpieza abajo había como drenaje y había muy muy muy feo el agua, entonces me imagino que, si hay descargas, ya sea de canales clandestinos o de las mismas plantas de tratamiento.*

PARA HABITANTES CIRCUNDANTES A LA LAGUNA LA PIEDAD

9. ¿Cuenta con servicio de agua potable proveniente de la red de agua municipal en su casa (o trabajo)?

Sí ( x ) ¿Sabe de dónde viene el agua que llega a su casa?

*No, la mía es directo de un pozo, aquí del pueblo de Tepojaco hay pozo.*

¿Cuánto tiempo tiene usted el agua disponible?

*Dos veces por semana 1 h.*

¿medidor de agua en su casa?

*No.*

No ( ) ¿Cómo obtiene agua para su vivienda?

10. ¿Cuenta con servicio público de drenaje en su domicilio (o el lugar donde trabaja)?

Sí ( x )

¿Sabe si el agua que sale de su casa a ese drenaje recibe algún tratamiento posterior a que sale de su domicilio?

*No, buena pregunta.*

No ( ) ¿Sabe si existen en la comunidad, descargas que vayan a la laguna?

11. ¿Cómo se beneficiaría Usted si la Laguna La Piedad estuviera limpia?

*Huy, pues aire limpio, agua limpia, fauna, tranquilidad, seguridad y en base a los, hay muchas milpas alrededor.*

12. ¿Cómo se beneficiaría su comunidad si la Laguna La Piedad estuviera limpia?

*Entonces yo creo que también se beneficiaría el comercio local, beneficio en los alimentos, igual, la calidad de los alimentos y más seguridad.*

Este cuestionario fue revisado por la Antropóloga Angélica Dorantes Vera, colaborador del Grupo Académico Interdisciplinario Ambiental (GAIA)-UNAM.

Por cuestiones de las medidas impuestas por la Secretaría de Salud en las jornadas de sana distancia implementadas para la prevención de la propagación del virus SARS-CoV-2, no fue posible llevar a cabo más entrevistas ni realizar alguna de forma presencial.

## 9.4. Memoria de cálculo

Tubería de Alimentación de la PTAR.

$Q_{ME}$  de 4 LPS = 0.004 m<sup>3</sup>/s

V = 3 m/s (La velocidad la impulsa una bomba)

$$Q = V A$$

Entonces:

$$A = \frac{Q}{V} = \frac{0.004 \frac{m^3}{s}}{3 \frac{m}{s}} = 1.333 \times 10^{-3} m^2$$

Si:

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

Despejando D (Diámetro), entonces:

$$D = \sqrt{\frac{4 A}{\pi}} = \sqrt{\frac{(4) (1.333 \times 10^{-3} m^2)}{\pi}} = 0.041202533 m$$

D = 1.62221469"

Por lo que se puede proponer un diámetro de tubería mínimo de 2", sin embargo, debido a que se espera tener RSU se considerará un diámetro de 4", para evitar obstrucciones en el tubo

Diseño conceptual del sistema de desarenado.

Para el este diseño se considera una condición crítica de operación para un  $Q_{ME}$  de 4 LPS = 0.004m<sup>3</sup>/s = 4000 cm<sup>3</sup>/s = 345.6 m<sup>3</sup>/d y un  $Q_{med}$  de 2 LPS = 172.8 m<sup>3</sup>/d y la construcción de 2 canales de desarenado.

Tabla 39. Viscosidad dinámica del agua líquida a varias temperaturas<sup>36</sup>.

Temperatura °C	Viscosidad dinámica kg/ (m·s)	Temperatura °C	Viscosidad dinámica kg/ (m·s)
0	0.001792	34	0.000734
1	0.001731	35	0.000720
2	0.001674	36	0.000705
3	0.001620	37	0.000692
4	0.001569	38	0.000678
5	0.001520	39	0.000678
6	0.001473	40	0.000666
7	0.001429	41	0.000653
8	0.001386	42	0.000641
9	0.001346	43	0.000618
10	0.001308	44	0.000607
11	0.001271	45	0.000596
12	0.001236	46	0.000596
13	0.001202	47	0.000586
14	0.001170	48	0.000576
15	0.001139	49	0.000566
16	0.001109	50	0.000556
17	0.001081	51	0.000547
18	0.001054	52	0.000538
19	0.001028	53	0.000529
20	0.001003	54	0.000521
21	0.000979	55	0.000504
22	0.000955	56	0.000496
23	0.000933	57	0.000489
24	0.000911	58	0.000481
25	0.000891	59	0.000474
26	0.000871	60	0.000467
27	0.000852	61	0.000460
28	0.000833	62	0.000453
29	0.000815	63	0.000447
30	0.000798	64	0.000440
31	0.000781	65	0.000434
32	0.000765	66	0.000428
33	0.000749	67	0.000422

Los datos de diseño son los siguientes:

Canales propuestos: 2

Diámetro de partícula máximo (arenas)= 0.086mm

Densidad de la partícula propuesta = 2650 kg/m<sup>3</sup>

T<sub>min</sub> agua: 2.6 °C

T<sub>máx</sub> agua: 27.1 °C

De las temperaturas se determina la viscosidad dinámica, realizando una interpolación según los datos de las Tablas de Viscosidad dinámica del agua líquida a varias temperaturas, extraída de vaxasofware (Tabla 39.).

<sup>36</sup>Vaxasofware, 2020, Propiedades del agua en función de la temperatura, 10 de julio de 2020, sitio web: [http://www.vaxasofware.com/doc\\_edu/qui/viscoh2o.pdf](http://www.vaxasofware.com/doc_edu/qui/viscoh2o.pdf)

Viscosidad dinámica del agua ( $\mu$ ): 0.001109 kg/m·s

Densidad del agua: 999.964 kg/ m<sup>3</sup>

Es posible establecer el volumen y área de la partícula en función de una sola variable, en este caso el diámetro.

$$A = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

y

$$V = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^3$$

Sustituyendo las ecuaciones de la geometría en una igualdad de fuerzas que sucede cuando la partícula ya no se acelera, se obtiene la siguiente ecuación, llamada Ley de Newton que relaciona la velocidad constante que adquiere una partícula esférica sumergida en un líquido:

$$V_s^2 = \frac{\frac{4}{3} g D (\rho_p - \rho_w)}{C_D \rho_w}$$

Suponiendo un flujo laminar y sustituyendo el coeficiente de arrastre en la Ley de Newton, se tiene:

$$C_D = \frac{24 \mu}{V D \rho_w}$$

Ecuación de Stokes:

$$V_s = \frac{1}{18 \mu} D^2 g (\rho_p - \rho_w)$$

donde:

A = Área (m<sup>2</sup>)

D = Diámetro de partícula máximo (m) = 0.086mm = 0.00086m

$\pi$  = 3.1416

V = Volumen de partícula (m<sup>3</sup>)

C<sub>D</sub> = Coeficiente de Newton, también llamado de arrastre

$\mu$  = Viscosidad Absoluta o dinámica del fluido (m/L)

$\rho_w$  = Densidad del fluido (m/L<sup>3</sup>) = 999.964 kg/m<sup>3</sup>

$\rho_p$  = Densidad de la partícula (m/L<sup>3</sup>) = 2650 kg/m<sup>3</sup>

V<sub>s</sub> = Velocidad de sedimentación (cm/s)

$$V_s = \frac{1}{(18) \left(0.01109 \frac{kg}{m \cdot s}\right)} (0.00086 \text{ m})^2 \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) \left(2650 \frac{kg}{m^3} - 999.964 \frac{kg}{m^3}\right)$$

Se determina que la  $V_s = 0.05997 \text{ m/s} = 5.997 \text{ cm/s}$

La velocidad de flujo se calcula con las siguientes ecuaciones

Ecuación de Camp:

$$Va = K \sqrt{(\varphi_p - 1)Dp}$$

donde:

$V_a$  = Velocidad de arrastre (cm/s)

$K$  = factor que depende del tipo de partículas (usualmente 125 arenas)

$\varphi_p$  = densidad relativa de la partícula, en el caso de la arena (2.65)

$D_p$  = diámetro de la partícula (cm) = 0.00086 cm

$$Va = 125 \sqrt{(2.65 - 1) 0.0086} = 14.89 \text{ cm/s}$$

Una forma de asegurar que la partícula, una vez sedimentada no se resuspenda, es generar una velocidad en el flujo ( $V_h$ ) menor que la velocidad de arrastre, y como medida de seguridad se recomienda una velocidad igual a la tercera parte de la velocidad de arrastre, por lo que se puede establecer una relación de la velocidad del flujo con respecto a la velocidad de arrastre (César-Valdez *et al.*, 2003).

$$V_h = \frac{V_a}{3} = \frac{12.89 \frac{\text{cm}}{\text{s}}}{3}$$

Se determina que la  $V_h = 4.9634 \text{ cm/s}$

Se proponen la construcción de 2 canales.

Para calcular el área transversal del canal ( $a$ ) se empleó la ecuación:

$$a = \frac{Q}{V_h} = \frac{4000 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}}{4.9634 \frac{\text{cm}}{\text{s}}} = 805.89 \text{ cm}^2$$

Se determinó que  $a = 805.899 \text{ cm}^2$

Para calcular el área superficial del canal se empleó la ecuación:

$$A = \frac{a V_h}{V_s} = \frac{(805.89 \text{ cm}^2)(4.9634 \frac{\text{cm}}{\text{s}})}{5.997 \frac{\text{cm}}{\text{s}}}$$

Se determinó que  $A = 666.9925\text{cm}^2$

Se proponen los valores de ancho ( $w$ ), altura ( $h$ ) y longitud ( $L$ ) de cada uno de los canales en m, los cálculos realizados se vierten en la Tabla 40. y se marca en amarillo el valor de diseño conceptual seleccionado.

Tabla 40. Cálculo de valores propuestos para el desarenador.

$w$ (cm)	$h = a/w$ $h$ (cm)	$l = A/b$ $l$ (cm)
56	14.39	11.91
57	14.14	11.70
58	13.89	11.50
59	13.66	11.30
60	13.43	11.12
61	13.21	10.93
62	13.00	10.76

Para mantener la velocidad de derrame en 3.0 m/s, para evitar que la arena se resuspenda o que se retengan materiales orgánicos en el canal, como consecuencia de la variación de la velocidad en porcentajes de hasta 25% arriba o debajo de este valor, se colocaran para controlar la velocidad horizontal, un vertedor en la salida de los desarenadores, que proporcionan la altura del agua en los desarenadores, el gasto de la misma, para mantener una velocidad de derrame constante (César-Valdez *et al.*, 2003).

#### Diseño conceptual del canal Parshall.

Se tienen dos puntos de medición de carga hidráulica: uno aguas arriba, situado en la sección convergente (designado con  $h_1$ ) y otro situado en la salida de la garganta (designado como  $h_w$  en la misma Figura). Tanto  $h_1$  como  $h_w$  se miden utilizando el piso horizontal de la sección convergente como nivel de referencia, el límite modular al cociente se define como  $h_w/h_1$  (Valdez *et al.*, 2003).

A continuación, en la Tabla 41. se enmarca en rojo el valor de diseño adecuado para un gasto de entre 0.77 LPS y 32.1 LPS y son válidas para un intervalo definido por el límite modular, de la siguiente manera:

Para canales de ancho de garganta  $w = 76.2$ , el límite es 0.5; según el diseño conceptual propuesto.

Tabla 41. Características de descarga de canales Parshall (Ackers, 1978)<sup>37</sup>.

ANCHO DE GARGANTA w (mm)	INTERVALO DE DESCARGA		ECUACIÓN DEL GASTO Q (m <sup>3</sup> /s) h <sub>1</sub> (m)	INTERVALO DE CARGA HIDRÁULICA		LÍMITE MODULAR h <sub>w</sub> /h <sub>1</sub>
	MÍNIMO Q (l/s)	MÁXIMO Q (l/s)		MÍNIMO h <sub>1</sub> (m)	MÁXIMO h <sub>1</sub> (m)	
76.2	0.77	32.1	0.177 h <sub>1</sub> <sup>1.550</sup>	0.030	0.33	0.5
152.4	1.50	111.1	0.3812 h <sub>1</sub> <sup>1.580</sup>	0.030	0.45	0.6
228.6	2.50	251.0	0.5354 h <sub>1</sub> <sup>1.530</sup>	0.030	0.61	0.6
304.8	3.32	457.0	0.6909 h <sub>1</sub> <sup>1.530</sup>	0.030	0.76	0.7
457.2	4.80	695.0	1.0560 h <sub>1</sub> <sup>1.538</sup>	0.030	0.76	0.7

Las relaciones empleadas para calcular el gasto a través de un canal Parshall en función del ancho de garganta para w' (ancho de garganta) de 76.2mm es la siguiente:

$$Q = 0.177 h_1^{1.550}$$

Entonces:

$$h_1 = \sqrt[1.550]{\frac{Q}{0.177}} = \sqrt[1.550]{\frac{0.004 \frac{m^3}{s}}{0.177}} = 0.08672 m$$

dónde:

h<sub>1</sub> = tirante hidráulico a la entrada del canal en m.

w = ancho de la garganta en m.

Q = gasto en m<sup>3</sup>/s.

El valor de las variables considerado para el diseño conceptual es el siguiente:

W = 76.2 mm

Q<sub>min</sub> = 0.77 LPS

Q = 4 LPS

Q<sub>max</sub> = 32.1 LPS

El valor del tirante obtenido es:

$$h_1 = 0.08672 m = 86.72 mm$$

<sup>37</sup> Fuente: Valdez, E. C; Alba B; Vázquez González. Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. México 2003. Extracto del Cuadro 9.1. Características de descarga de canales Parshall (Ackers, 1978).

En la Tabla 42. se presentan las dimensiones estándar de los canales Parshall.

Tabla 42. Geometría de los canales Parshall (Ackers, 1978)<sup>38</sup>.

w	A	B	C	D	E	L	G	K	M	N	P	X	Y
76.2	467	457	178	259	457	152	305	25	-	57	-	25	38

Notas:

Medidas en milímetros

La distancia "a", medida desde donde se inicia la garganta hasta el punto de medición de  $h_1$  es igual a dos tercios de la distancia "A" que tiene de largo la pared convergente.

Para el cálculo de la distancia a se emplea la siguiente ecuación:

$$a = \frac{2}{3} A = \frac{2}{3} (467 \text{ mm})$$

El valor del tirante obtenido es:

$$a = 311.333 \text{ mm}$$

Ahora se calcula el tirante hidráulico de la garganta ( $h_w$ ) se emplea la ecuación del cociente del límite modular:

$$\text{Límite modular} = \frac{h_w}{h_1}$$

Entonces:

$$h_w = \text{Límite modular} * h_1 = (0.5) (86.72 \text{ mm})$$

Sí el límite modular = 0.5

$$h_w = 43.36 \text{ mm.}$$

Diseño conceptual del humedal artificial de flujo subsuperficial.

Las consideraciones de los datos para el diseño del HAFSS de entrada al sistema son las encontradas en el muestreo realizado el día 23 de marzo del año 2020 en el sitio denominado Sitio 1. Entrada a la Laguna, dichos resultados se vierten en la Tabla 43.

Tabla 43. Parámetros de diseño del HAFSS.

Parámetro	Afluyente PTAR	% Remoción HAFSS	Límite Máximo del Efluente
DBO (mg/L)	89	85	9.35
SST (mg/L)	90	90	9
NT (mg/L)	63.574	42.5	15.48105

<sup>38</sup> Fuente: Valdez, E. C; Alba B; Vázquez González. Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. México 2003. Extracto del Cuadro 9.2. Características de descarga de canales Parshall (Ackers, 1978).

Los datos adicionales considerados son los siguientes:

T media del mes más caluroso = 18.1 °C

T media del mes más frío = 12.2 °C

Constante cinética  $K_{v,20} = 1.104 \text{ d}^{-1}$

*Características del medio de empaque.*

El diámetro de grava media ( $D_g$ ):

$$D_g = 25\text{mm} = 2.5\text{cm} = 0.025\text{m}.$$

Para el cálculo de la conductividad hidráulica ( $K_s$ ) se empleó la siguiente ecuación:

$$K_s = 12\,600 D_g^{1.9}$$

Entonces:

$$K_s = (12600)(0.025\text{m})^{1.9} = 11.3882 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$$

$$K_{s,1\%} = 0.113882$$

$$K_{s,10\%} = 1.13882$$

La porosidad del material:

$$n = 0.43.$$

Se empleó la ecuación de Arrhenius para evaluación del efecto de la T en la constante cinética:

$$K_{v,T} = 1.104 \text{ d}^{-1} (1.06)^{T_{med} - 20}$$

Evaluación del efecto de la T en la constante cinética para el mes más caluroso:

$$K_{v,T} = (1.104\text{d}^{-1})(1.06)^{18.1^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}} = 0.9883 \text{ d}^{-1}$$

Evaluación del efecto de la T en la constante cinética para el mes más frío:

$$K_{v,T} = (1.104\text{d}^{-1})(1.06)^{12.2^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}} = 0.7008 \text{ d}^{-1}$$

Para la determinación del área superficial ( $A_s$ ) se empleó la siguiente ecuación:

$$A_s = \frac{Q \frac{m^3}{d} [\ln DBO_o - \ln DBO_F]}{K_{V,T} D_M n}$$

Cálculo de  $A_s$  para el mes más caluroso:

$$A_s = \frac{172.8 \frac{m^3}{d} [\ln (89) - \ln (9.35)]}{(0.9883d^{-1})(0.6m)(0.43)}$$
$$A_s = 1527.0295 \text{ m}^2$$

Cálculo de  $A_s$  para el mes más frío:

$$A_s = \frac{172.8 \frac{m^3}{d} [\ln (89) - \ln (9.35)]}{(0.7008d^{-1})(0.6m)(0.43)}$$
$$A_s = 2153.482 \text{ m}^2$$

Se selecciona el área para las condiciones menos favorables considerando que esta tendrá el 30% de la longitud total, por tanto, el área para la zona inicial ( $A_1$ ) de tratamiento se calcula de la siguiente forma:

$$A_1 = \% \text{ zona inicial} * A_s \text{ del área mayor}$$

$$A = (0.3)(2153.482m^2)$$

Se obtiene:

$$A_1 = 646.044 \text{ m}^2$$

Para la zona final de tratamiento ( $A_2$ ), con el área en las condiciones menos favorables, considerando que esta tendrá el 70% de la longitud total:

$$A_2 = \% \text{ zona final} * A_s \text{ del área mayor}$$

Se obtiene:

$$A = (0.7)(2153.482m^2)$$

$$A_2 = 1507.4374 \text{ m}^2$$

*Determinación del ancho mínimo necesario para mantener el flujo de agua por debajo de la superficie y determinar la altura de salida del efluente.*

Se determina el ancho mínimo teórico (W), utilizando la ecuación de Darcy y para la zona inicial tratamiento se tiene:

$$W = \left( \frac{Q A_1}{K_{S,1\%} d_{hi} D_{W,o}} \right)^{0.5} = \left( \frac{\left( 172.8 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right) (646.044 \text{m}^2)}{\left( 0.11388239 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{d}} \right) (0.06 \text{m}) (0.6 \text{m})} \right)^{0.5} =$$

Se obtiene:

$$W = 5218.2319 \text{ m}$$

Determinación de la pérdida de carga en la zona inicial de tratamiento, la longitud (Li) de tratamiento se determina de la siguiente forma:

$$L_i = \frac{A_i}{W} = \frac{646.044 \text{m}^2}{5218.2319 \text{ m}}$$

Se obtiene:

$$L_i = 0.1238 \text{ m}$$

Verificación de la pérdida de carga, debe ser igual a

$$d_{hi} = \frac{Q L_i}{K_{S,1\%} W D_{W,o}} = \frac{\left( 172.8 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right) (0.1238 \text{ m})}{\left( 0.11388239 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{d}} \right) (5218.2319 \text{ m}) (0.6 \text{ m})}$$

Se obtiene:

$$d_{hi} = 0.0599975 \text{ m}$$

Determinación de la longitud (L<sub>F</sub>) y la pérdida de carga en la zona final de tratamiento:

$$L_F = \frac{A_2}{W} = \frac{1507.4374 \text{ m}^2}{5218.2319 \text{ m}}$$

Se obtiene:

$$L_F = 0.2889 \text{ m}$$

Propuesta de profundidad del agua en zona inicial de tratamiento ( $D_{W0}$ ) = 0.6 m

Propuesta de profundidad del agua en zona final de tratamiento ( $D_{WF}$ ) = 0.6 m

Propuesta de profundidad del lecho ( $D_M$ ) = 0.6 m

Propuesta de valor de pérdida de carga máxima en zona inicial ( $d_{hi}$ ) = 0.06m

Propuesta de valor de Pendiente del fondo del humedal ( $S_F$ ) = 0.005

*Determinación de la pérdida de carga en la zona  $d_{HF}$ :*

$$d_{hF} = \frac{Q L_F}{K_{S, 10\%} W D_{W,F}} = \frac{\left(172.8 \frac{m^3}{d}\right) (0.2889 m)}{\left(1.1388239 \frac{m^3}{m^3 d}\right) (5218.2319 m) (0.6 m)}$$

Se obtiene:

$$d_{hF} = 0.014m$$

La longitud del humedal equivale a:

$$L = L_i + L_F = 0.1238m + 0.2889m$$

Se obtiene:

$$L = 0.41 m$$

Se recomiendan 2 (dos) celdas de tratamiento para facilitar las actividades de operación y mantenimiento.

Ahora bien, para cumplir con las recomendaciones de la relación Larco ancho (2:1 a 4:1), se propone un número de celdas (N) las celdas deberán estar separadas por una geomembrana:

$$N = 4$$

Cálculo del ancho de cada celda:

$$W_{celda} = \frac{W}{N} = \frac{5218.2992 m}{4}$$

Se obtiene:

$$W_{\text{celda}} = 1304.5748 \text{ m}$$

Relación Largo Ancho = 2:1

*Determinación de las elevaciones del fondo:*

La elevación a la salida del efluente  $E_{be}$  se asume cero:

$$E_{be} = 0 \text{ m}$$

Elevación a la entrada de la zona final de tratamiento:

$$E_{bF} = L_F S_F = (0.2889 \text{ m})(0.005)$$

Se obtiene:

$$E_{bF} = 0.001445 \text{ m}$$

Elevación a la entrada de la zona inicial de tratamiento:

$$E_{b0} = L S_F = (0.041 \text{ m})(0.005)$$

Se obtiene:

$$E_{b0} = 0.00205 \text{ m}$$

*Determinación de las elevaciones de la superficie del agua*

Elevación del agua al inicio de la zona final de tratamiento:

$$E_{WF} = E_{bF} + D_{WF} = 0.001445 \text{ m} + 0.6 \text{ m}$$

Se obtiene:

$$E_{WF} = 0.6014 \text{ m}$$

Elevación de la superficie del agua a la salida:

$$E_{WE} = E_{WF} - d_{hF} = 0.6014 \text{ m} - 0.014 \text{ m}$$

Se obtiene:

$$E_{WE} = 0.5874 \text{ m}$$

Elevación de la superficie del agua a la entrada:

$$E_{W0} = E_{WF} + d_{hi} = 0.6014 \text{ m} + 0.014 \text{ m}$$

Se obtiene:

$$E_{W0} = 0.6154 \text{ m}$$

*Determinación de la profundidad del agua:*

Profundidad del agua a la entrada,

$$D_{W0} = E_{W0} - E_{b0} = 0.6154 \text{ m} - 0.00205 \text{ m}$$

Se obtiene:

$$D_{W0} = 0.61335 \text{ m}$$

Profundidad al inicio de la zona final de tratamiento,

$$D_{WF} = E_{WF} - E_{bF} = 0.6014 \text{ m} - 0.001445 \text{ m}$$

Se obtiene:

$$D_{WF} = 0.59995 \text{ m}$$

Este valor es igual al propuesto:  $D_{WF}$  obtenido =  $D_{WF}$  Propuesto, por lo tanto, se considera correcto el cálculo.

Profundidad del agua a la salida del humedal:

$$D_{WE} = E_{WE} - E_{be} = 0.5874 \text{ m} - 0 \text{ m}$$

Se obtiene:

$$D_{WE} = 0.5874 \text{ m}$$

*Determinación de la profundidad del medio:*

Distancia propuesta entre la superficie del medio y la del agua ( $D_{WM}$ ):

$$D_{WM} = 0.100 \text{ m}$$

Elevación de la superficie del medio a la salida:

$$E_{M0} = E_{W0} - D_{WM} = 0.6154 \text{ m} - 0.100 \text{ m}$$

Se obtiene:

$$E_{M0} = 0.5154 \text{ m}$$

Elevación de la superficie del medio a la entrada de la zona final de tratamiento:

$$E_{MF} = E_{WF} + D_{WM} = 0.6014 \text{ m} + 0.100 \text{ m}$$

Se obtiene:

$$E_{MF} = 0.7014 \text{ m}$$

Elevación de la superficie del medio a la salida:

$$E_{ME} = E_{WE} + D_{WM} = 0.5874 \text{ m} + 0.100 \text{ m}$$

Se obtiene:

$$E_{ME} = 0.6874 \text{ m}$$

Profundidad del medio a la entrada:

$$D_{M0} = E_{M0} - E_{b0} = 0.5154 \text{ m} - 0.00205 \text{ m}$$

Se obtiene:

$$D_{M0} = 0.51335 \text{ m}$$

Profundidad del medio a la entrada de la zona final de tratamiento:

$$D_{MF} = E_{MF} - E_{bF} = 0.7014 \text{ m} - 0.001445 \text{ m}$$

Se obtiene:

$$D_{MF} = 0.69995 \text{ m}$$

Profundidad del medio a la salida:

$$D_{ME} = E_{ME}$$

Se obtiene:

$$D_{ME} = 0.700 \text{ m}$$

*Determinación del tiempo de residencia hidráulica (TRH) nominal:*

$$TRH_{Nominal} = \frac{n D_{WF}}{\left(\frac{Q}{As}\right)} = \frac{(0.43)(0.59995 \text{ m})}{\left(\frac{172.8 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{2153.482 \text{ m}^2}\right)} =$$

Se obtiene:

$$TRH_{NOMINAL} = 3.2126 \text{ d} = 77.1 \text{ h}$$

*Concentración estimada de NT en el efluente, empleando la ecuación de regresión:*

$$C_{e,NT} = (0.52 C_{0,NT}) + 3.1 = \left((0.52) \left(63.574 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)\right) + 3.1$$

Se obtiene:

$$C_{e,N} = 36.1584 \text{ mg/L}$$

Se encuentra dentro de los LMP de la NOM-001-SERMARNAT-1996.

*Concentración estimada de SST esperada en el efluente ( $C_{e,SST}$ )*

Se considera la ecuación propuesta por Reed and Brown (1995):

$$C_{e,SST} = C_{0,SST} \left( 0.1058 + 0.0011 \frac{100 Q}{As} \right) =$$
$$C_{e,SST} = 90 \frac{mg}{L} \left( 0.1058 + 0.011 \left( \frac{100 \left( 172.8 \frac{m^3}{d} \right)}{2153.482 m^2} \right) \right)$$

Se obtiene:

$$C_{e,SST} = 17.4659 \text{ mg/L}$$

Se encuentra dentro de los LMP de la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Número de macrófitas requeridas para la instalación ( $N_v$ ):

$$N_v = \left( \frac{L}{d_{M-M}} - 1 \right) \left( \frac{W}{d_{M-M}} - 1 \right)$$
$$N_v = \left( \frac{0.41 m}{1 m} - 1 \right) \left( \frac{5218.2319 m}{1 m} - 1 \right)$$

Se obtiene:

$$N_v = 3078.166 \text{ Macrófitas}$$

Volumen estimado del material del lecho (V):

$$V = As D_{ME} = (2153.482 m^2)(0.700m)$$

Se obtiene:

$$V = 1507.1 m^3$$