



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD TÉCNICA, ECONÓMICA
Y AMBIENTAL DE INCORPORAR UN HUMEDAL
ARTIFICIAL PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD
DEL AGUA DE LAGUNA LA PIEDAD, ESTADO DE
MÉXICO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA



LÓPEZ LORENZO OSCAR ALEJANDRO

CDMX

2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: PROF. VÍCTOR MANUEL LUNA PABELLO

VOCAL: PROF. MARÍA RAFAELA GUTIÉRREZ LARA

SECRETARIO: PROF. SERGIO ADRIÁN GARCÍA GONZÁLEZ

1er. SUPLENTE: PROF. MÓNICA RODRÍGUEZ ESTRADA

2° SUPLENTE: PROF. FERNANDO SANTIAGO GÓMEZ MARTÍNEZ

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

GRUPO ACADÉMICO INTERDISCIPLINARIO AMBIENTAL (GAIA) Y LABORATORIO

DE MICROBIOLOGÍA EXPERIMENTAL

DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA

FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM

ASESOR DEL TEMA:

DR. VÍCTOR MANUEL LUNA PABELLO

SUSTENTANTE (S):

OSCAR ALEJANDRO LÓPEZ LORENZO

Agradecimientos académicos

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme un lugar donde pude desarrollarme como profesional y persona.

Agradezco al Maestro Luciano Hernández Gómez por apoyarme durante la realización de este trabajo, mediante sus enseñanzas, consejos y asesorías.

Agradezco al Doctor Pedro Magaña Melgoza, por sus recomendaciones y revisiones brindadas en este trabajo.

Se agradece el apoyo brindado por la beca FQ 10-148 UNAM 55457-958-14-VI-19 CONVENIO ESPECÍFICO DE COLABORACIÓN SOBSE/SSU/DGSUS/006/2019. Proyecto con base en ingenierías y estudios en la construcción de un humedal artificial dentro del Bosque de San Juan de Aragón en la Ciudad de México y la brindada por Grupo Multidisciplinario Ambiental (GMI) SC. mediante Proyecto SECITI/082-2017. Sistema modular sustentable para tratamiento y reúso de agua residual. Gobierno de la Ciudad de México .

Se agradece al Programa de Apoyo a la Investigación y Posgrado de la Facultad de Química asignado al Dr. Víctor Manuel Luna Pabello, clave 5000-9111, por brindar los recursos necesarios para elaborar este trabajo.

Agradecimientos personales

A mi mamá Alejandra por acompañarme en todo momento, guiarme, enseñarme y sobre todo brindarme su amor incondicional. Por ser una pieza clave en cada uno de mis logros y metas. Por el gran esfuerzo y sacrificio a lo largo de los años para poder brindarme lo que necesite para llegar a este momento. Por ser mi mayor ejemplo a seguir y también la persona que siempre estaré agradecido por todo lo que me ha brindado. Sin ella nada de esto sería posible.

A mi papa Oscar por brindarme su apoyo y consejos a lo largo de la vida, que hoy forman parte de quien soy, tanto éticamente como profesionalmente. Por ser un ejemplo para mí de dedicación y empeño para lograr nuestras metas. Porque me enseñaste en especial que un trabajo no solo tiene que cumplir con su función, si no repercutir en las personas para que puedan aspirar a lograr cosas más grandes.

A mi familia por brindarme su amor, cariño, consejos y grandes momentos de mi vida. Por siempre cuidar de mí y construir un núcleo familiar del cual saber que cuento con su apoyo incondicional. Agradezco a mis abuelos Manuel, Margarita, Lidia y Isidro por sus grandes enseñanzas y cariño que me brindaron durante mi niñez. A mis tías Margarita, Haydee y Chelo, por siempre cuidar de mi y compartir sus experiencias conmigo. Y a mis primos Jorge y Edgar por ser como unos hermanos mayores para mí.

Al Doctor Víctor Manuel Luna Pabello, por su confianza para dejarme formar parte de proyectos tan significativos en el desarrollo de un mejor futuro. Por sus enseñanzas y sobre todo por ser alguien que siempre me brindo apoyo cuando he acudido a su consejo.

A mis amigos Jair, Edwin, Aldo, Christian, Daniel, Max, Jesús y Andrea por siempre brindarme su apoyo, consejo y grandes alegrías, por los grandes momentos que hemos compartido juntos.

A mis compañeros del laboratorio de microbiología experimental de la Facultad de Química, por brindarme sus conocimientos, enseñanzas y momentos que he compartido con ellos. Gracias a Laura, Damián, Luis Enrique, Carlos, Ruth, Emiliano, Luis, Aranza, Sareth

Al Grupo Multidisciplinario Ambiental y a Grupo Académico Interdisciplinario Ambiental, por brindarme la confianza y permitirme formar parte de un grupo donde sus distintos expertos me han compartido su experiencia y enseñanzas. En especial me gustaría agradecer a Mónica Rodríguez y a Fernando Santos por sus enseñanzas brindadas.

A la comunidad de la laguna La Piedad en especial a Gustavo Schinca por sus constantes esfuerzos por cuidar y buscar la rehabilitación de la laguna.

ÍNDICE

1.	Introducción.....	3
1.1	Objetivo general	4
1.2	Objetivos específicos	4
1.3	Estrategia de Trabajo	5
2.	Marco Teórico	6
2.1	El Agua en México	6
2.2	Marco legislativo	8
2.3	Calidad de agua	10
2.4	Sistemas de tratamiento de agua residual	11
2.5	Humedales Artificiales.....	12
2.5.1	Componente vegetal.....	13
2.5.2	Microrganismos	14
2.5.3	Material de soporte	14
2.5.4	Procesos de depuración de contaminantes	14
2.5.5	Clasificación de los humedales artificiales.....	16
2.6	Descripción de la zona de estudio	18
2.6.1	Localización.....	18
2.6.2	Clima	18
2.6.3	Hidrología	19

2.6.4	Actividades económicas.	20
2.6.5	Antecedente histórico.	21
2.6.6	Plantas de tratamiento en Cuautitlán Izcalli.	22
2.6.7	Descargas residuales en la laguna la Piedad.	23
3.	Metodología	26
3.1	Actividades para definir el área de estudio.	26
3.2	Elaboración de plano topográfico.	26
3.3	Elaboración de balance hídrico.	26
3.3.1	Método del caudal por medio de flotadores.	27
3.4	Determinación de la calidad de agua	27
3.5	Elaboración y evaluación de propuestas conceptuales.	29
3.6	Selección de áreas para la construcción de humedal artificial	30
3.7	Diseño del humedal artificial en las propuestas	30
3.8	Análisis costo beneficio	31
4.	Resultados	32
4.1	Condiciones topográficas del área de estudio.	32
4.2	Uso de suelo	36
4.3	Calidad de agua.	37
4.4	Balance Hídrico	40
4.5	Propuestas para el de tratamiento de agua de laguna “La Piedad”	43

4.5.1	Condición de las distintas PTAR y servicios complementarios en el área de estudio	43
4.5.2	Operación PTAR “La Piedad II”	48
4.5.3	Propuesta I. Implementación de un humedal artificial	50
4.5.4	Propuesta II. Operación conjunta de humedal artificial y PTAR “La Piedad II”.....	56
4.5.5	Costos de construcción de los sistemas de tratamiento	58
4.5.6	Costos de operación.....	59
4.5.7	Beneficios	61
5.	Análisis y discusión de resultados.....	63
5.1	Evaluación de factibilidad técnica	68
5.2	Evaluación de factibilidad económica.....	70
5.3	Evaluación de factibilidad ambiental	72
6.	Conclusiones.....	74
7.	Referencias.....	76
	Anexo I. Declaratoria de Propiedad Nacional.....	86
	Anexo II Datos hídricos laguna la Piedad.....	88
	Anexo III Valores considerados para el balance hídrico la Piedad.....	89
	Anexo IV Memoria de cálculo humedal artificial	91

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1. Principales artículos constitucionales en temas de recursos hídricos	8
Tabla 2. Leyes generales relacionadas con recursos hídricos en México	9
Tabla 3. Normas Oficiales Mexicanas relacionadas con la calidad de agua en México.	9
Tabla 4. Principales tecnologías y operaciones unitarias para el tratamiento de aguas residuales	11
Tabla 5. Procesos de depuración de contaminantes en los humedales artificiales	15
Tabla 6. Principales cuerpos de agua en Cuautitlán Izcalli	19
Tabla 7: Principales ríos en el área de estudio a la laguna “La Piedad”.	20
Tabla 8. Condición de actividad económica de acuerdo con datos de población económicamente activa e inactiva	21
Tabla 9. Plantas de tratamiento en el área de estudio	23
Tabla 10. Métodos Analíticos realizados para conocer los parámetros de calidad de agua por IDECA S.A de C.V.	28
Tabla 11. Concentraciones establecidas por la NOM-001-SEMARNAT-1996 para uso agrícola (B)	29
Tabla 12. Valores de referencia en % de remoción de contaminantes según los parámetros que se utilizan para el diseño de propuestas conceptuales.	30
Tabla 13 Valores INPP considerados para actualizar precios de las propuestas	31
Tabla 14. Parámetros de calidad de agua de muestras tomadas por distintas dependencias en el área de estudio.	37
Tabla 15. Datos de calidad de agua de muestreo realizado el 23 de agosto de 2020 por UNAM/IDECA	39

Tabla 16. Valores de calidad de agua de entrada para la Propuesta 1.	48
<i>Tabla 17. Valores de calidad del efluente de la PTAR La Piedad II.</i>	49
Tabla 18. Características de módulos del humedal artificial.	53
Tabla 19. Material de soporte en módulos del humedal artificial "La Piedad"	53
Tabla 20. Tipo, distribución y cantidad de ejemplares del componente vegetal presente en humedal artificial.	54
Tabla 21. Tiempo de residencia hidráulico en los módulos del humedal artificial	54
Tabla 22. Valores de calidad de agua de entrada para la Propuesta I.	55
Tabla 23. Valores de calidad de agua del efluente de la Propuesta I.	55
Tabla 24. Valores de calidad de agua del efluente de la Propuesta II	56
Tabla 25. Costos de inversión para la PTAR "La Piedad"	58
Tabla 26. Costos inversión para construcción de humedal artificial	58
Tabla 27. Costos de inversión para la Propuesta 3	59
Tabla 28. Costo de operación de PTAR "La piedad II"	59
Tabla 29. Coste de operación para el humedal artificial.	60
Tabla 30 Costo de operación simultanea de PTAR "La Piedad" y humedal artificial	60
Tabla 31. Resumen general de las distintas propuestas	67
Tabla 32 Valores climáticos I Cuautitlán Izcalli entre 1991-2021	88
Tabla 33 Valores climáticos II Cuautitlán Izcalli entre 1991-2021	88
Tabla 34 Valores de entrada en la laguna La Piedad	89
Tabla 35 Valores de salida de la laguna La Piedad.	89
Tabla 36 Valores de entrada debido a precipitación	90
Tabla 37 valores de flujos de entrada en L/s y m ³ /d	91

Tabla 38 Valores de constante cinética para distintos parámetros	92
Tabla 39 Valores para determinar C*	93
Tabla 40 Área requerida para construcción de humedal artificial de flujo subsuperficial	93

Resumen

La laguna La Piedad se encuentra ubicada en el Municipio de Cuautitlán Izcalli, Estado de México; es un cuerpo de agua con una superficie 33 hectáreas. Forma parte del Área Natural Protegida Estatal correspondiente a la Laguna de Zumpango. La laguna presenta problemas debido a descargas de aguas residuales, vertidas sin tratamiento en la laguna. Asociadas a este cuerpo de agua existen dos Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales tipo Lodos Activados (PTAR), una con capacidad para tratar 18 L/s y la otra 24 L/s. Ambas PTAR se encuentran fuera de operación debido a la inexistencia de recursos económicos para su reparación, operación y mantenimiento. Este documento tiene como objetivo, evaluar la implementación un sistema de tratamiento de agua residual basado en sistemas depuradores de agua conocidos como humedales artificiales para el tratamiento del agua que recibe y/o contiene la laguna la Piedad. Los humedales artificiales son una tecnología que se basa en los procesos de depuración que efectúan los ecosistemas de humedales naturales. El diseño realizado tiene como finalidad obtener agua tratada que cumpla con los Límites Máximos Permitidos, establecido NOM-001-SEMARNAT-1997, para determinados parámetros de interés para el proyecto, con el posible beneficio adicional de contribuir a la recuperación de la laguna con fines turísticos. Las investigaciones y usos a escala real han demostrado su alta capacidad para la remoción de nitrógeno y fósforo en aguas residuales. Además de tener, comparativamente, un bajo costo de mantenimiento y operación con respecto a otras tecnologías como son los sistemas de lodos activados.

Los alcances establecidos de este trabajo son: elaborar planos topográficos con curvas de nivel del área de estudio, acopiar y analizar datos históricos de calidad de agua; estudios hidrológicos; la conceptualización de propuestas conceptuales integrales considerando el sistema de tratamiento a base de los Humedales Artificiales; áreas tentativas requeridas; probables entradas y salidas de agua;

requerimientos de eficiencia de remoción acordes a calidades de agua tratada, definida como efluente. Las propuestas evaluadas en este trabajo muestran que las opciones en las cuales se considera la implementación de un humedal artificial son viables técnicamente debido a que cumplen con la remoción requerida para los distintos valores máximos permitidos de parámetros establecidos por la normatividad aplicable. Sin embargo, la capacidad de agua que se puede tratar por el humedal artificial es inferior en comparación con los demás sistemas de tratamiento analizados.

La evaluación económica muestra que las propuestas con humedales artificiales requieren una mayor inversión para su construcción. Sin embargo, los costos de mantenimiento/operación y el ser alternativas sostenibles, presentan una atractiva de solución a la problemática de abandono del tratamiento de aguas residuales debido a los costos antes mencionados.

Este documento muestra que se pueden implementar humedales artificiales que traten parte del volumen de las aguas residuales municipales que se vierten a la laguna La Piedad, o bien, el agua contenida en la propia laguna, de forma que contribuya a la recuperación de su calidad, deje de ser foco de infección, promueva el retorno de aves y pueda ser reusada con fines turísticos.

1. Introducción

El agua es uno de los recursos más importantes para la vida en el planeta. Los seres humanos dependemos de su disponibilidad no sólo para el consumo doméstico, sino también para el funcionamiento y la continuidad de las actividades agrícolas e industriales (INSP, 2021).

La creciente población global y su cada vez mayor capacidad económica, ha conducido inevitablemente a una mayor presión sobre las fuentes de abasto de agua, básicamente como resultado de la necesidad de producir más alimentos y energía, así como de abastecer con mayores volúmenes a las zonas urbanas y a las actividades productivas, principalmente la agricultura y la industria. (SEMARNAT, 2016).

La información oficial documenta coberturas aceptables de suministro de agua (92.5% de la población), drenaje (73%) o fosas sépticas (18%). Sin embargo, el tratamiento de las aguas residuales es insuficiente: sólo se reportan como tratados 129 m³/s (57%) de los 212 m³ /s de aguas residuales municipales colectadas. (Pérez et al., 2018).

En México, una de las situaciones por las que existe insuficiente número de plantas de tratamiento es debido al alto costo que estas involucran en cuanto a diseño, instalación, operación y mantenimiento, entre los que se resaltan también los altos consumos de energía que éstas requieren (Vidal-Álvarez, 2018).

Las tecnologías extensivas denominadas también no convencionales, eco-tecnologías, como los humedales artificiales; son capaces de depurar el agua residual con nulo o bajo consumo de energía, generan lodos de forma reducida, no requieren de personal cualificado para su mantenimiento y tienen ventajas ambientales; como la integración paisajística (Quispe-Arellano, 2016).

1.1 Objetivo general

Evaluar la factibilidad técnica, económica y ambiental de incorporar un humedal artificial para el mejoramiento de la calidad del agua de la laguna la Piedad, Cuautitlán Izcalli, Estado de México.

1.2 Objetivos específicos

Diagnosticar la situación actual de la laguna La Piedad, Estado de México.

Realizar el balance hídrico, estudios de calidad de agua calidad de agua de la laguna La Piedad mediante la determinación de flujos y análisis fisicoquímicos de muestras de agua obtenidas de sitios pre-establecidos.

Elaborar un plano topográfico con el fin de conocer las áreas disponibles para la construcción de un humedal artificial .

Elaborar propuestas conceptuales basadas en humedales artificiales para el mejoramiento de la calidad de agua que entra en la laguna La Piedad

Elaborar el diseño conceptual de un humedal artificial para depuración del agua residual que se introduce a la laguna La Piedad que cumpla con los límites máximos establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Evaluar la factibilidad técnica, económica y ambiental de incorporar un Humedal artificial para el mejoramiento de la calidad del agua de la laguna la Piedad con y sin considerar la PTAR existente.

1.3 Estrategia de Trabajo

En la figura 1, se presenta la estrategia de trabajo realizada para cumplir con el objetivo general y los objetivos específicos.

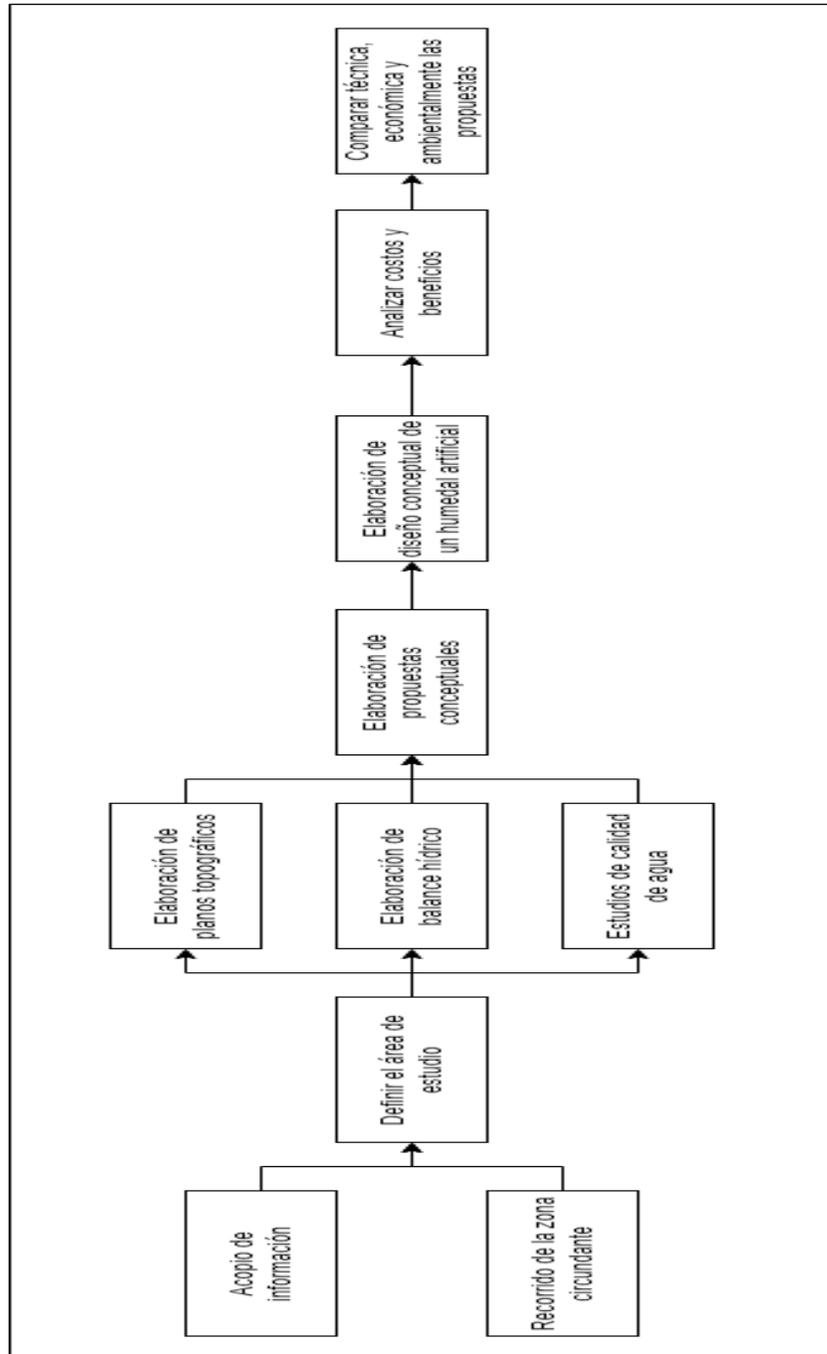


Figura 1. Estrategia de trabajo

2. Marco Teórico

2.1 El Agua en México

Los Estados Unidos Mexicanos tienen una extensión territorial de 1964 millones de kilómetros cuadrados, de los cuales 1959 millones corresponden a la superficie continental y el resto a áreas insulares, se estima que la población es de 126 millones de habitantes (INEGI,2020).

El agua en México es empleada en diversas actividades humanas, ya sea para subsistir o producir e intercambiar bienes y servicios. El uso del agua se puede agrupar en 4 principales grupos de acuerdo al tipo de actividad, los cuales se pueden observar en la Figura 2.

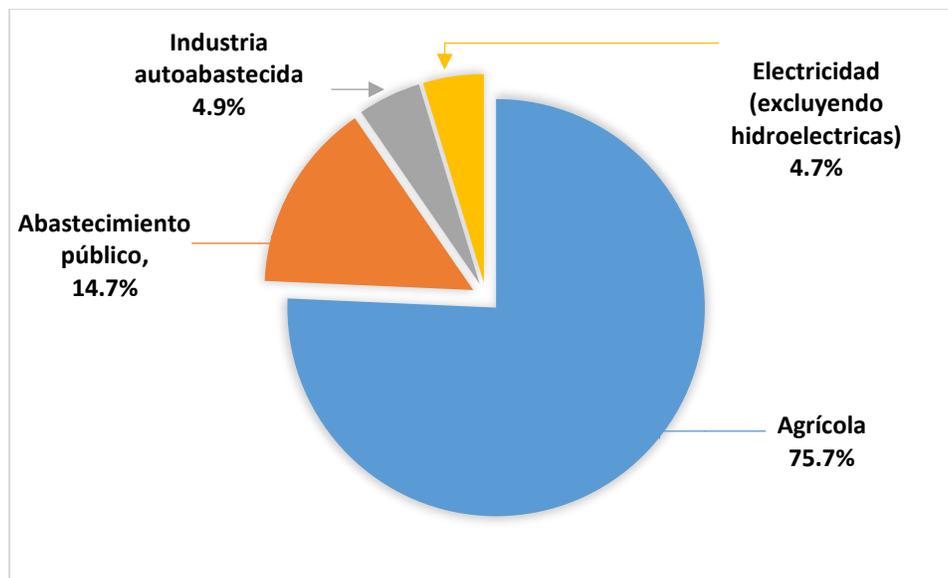


Figura 2. Usos del agua en México de acuerdo con los principales grupos de actividades (CONAGUA, 2019)

El volumen de agua requerido para llevar a cabo las diversas actividades en el año 2018 fue de 271,353 hm³, la cual proviene principalmente de fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos) con un 60.9% y el otro 39.1% proviene de fuentes acuíferas

(CONAGUA, 2019). En México se tiene una cobertura de 94.4% de acceso a los servicios de agua potable y un 91.4% de acceso a los servicios de alcantarillado y saneamiento básico (CONEVAL, 2019); al año se producen 7.41 miles de m³/año de aguas residuales municipales de las cuales el 63 % son tratadas (CONAGUA, 2017). México cuenta con una infraestructura que consta de 2526 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), con una capacidad instalada de 181.15 m³/s y un caudal potabilizado de 135.58 m³/s (CONAGUA, 2019). En la *Figura 3*, se muestra la distribución de los principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales empleados en México.

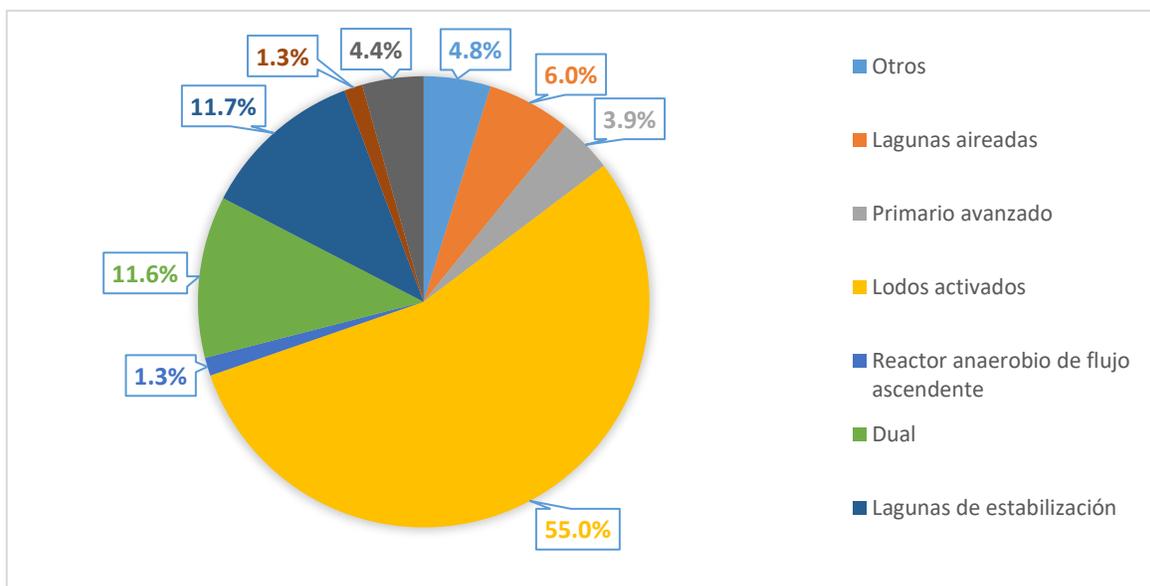


Figura 3. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales, por caudal tratado en México (CONAGUA, 2019).

Sin embargo, la problemática que enfrenta la infraestructura instalada en el país son problemas donde los recursos municipales son insuficientes para operarlas dejando de operar y siendo abandonadas (De la Peña, 2013). Aproximadamente, el 23.96% de las plantas de tratamiento se encuentran fuera de operación (Anda, 2017). Aunque en casos como el Estado de México donde el 46% de las plantas de tratamiento se encuentran fuera de operación (CONAGUA, 2017).

2.2 Marco legislativo

Dentro del marco legislativo, la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos establece una serie de artículos referentes a los recursos hídricos de la nación, los cuales se muestran en la.

Tabla 1.

Tabla 1. Principales artículos constitucionales en temas de recursos hídricos

Artículo Constitucional	Contenido
Artículo 4°	<i>“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.”</i>
Artículo 27	<i>La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, corresponde originariamente a la Nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada. ,(…) 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;(…)”</i>
Artículo 115	<i>“(…) Los Municipios tendrán a su cargo las funciones y servicios públicos siguientes: a) Agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales;(…)”</i>

Fuente: Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 2022.

Lo anterior se complementa con leyes generales las cuales ofrecen las bases para el desarrollo de la normativa local y actuación de los estados y municipio. En la *Tabla 2*, se muestran algunas de las leyes generales más importantes en referencia con los recursos hídricos de la nación.

Tabla 2. Leyes generales relacionadas con recursos hídricos en México

Título de la Ley General	Objetivo
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente	<i>Esta es una pieza fundamental reguladora de las relaciones entre los gobernantes y gobernados en nuestro territorio, su fin último es el de ordenar el territorio de manera sustentable y garantizando el derecho humano a un medio ambiente sano.¹</i>
Ley de Aguas Nacionales	<i>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</i>

1.Bolio, 2013.

En México se cuentan con Normas Oficiales Mexicanas en el sector ambiental expedidas por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), dentro de ellas se establecen las características, especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes dependiendo su uso final. Las normas en cuestión son mostradas la *Tabla 3*.

Tabla 3. Normas Oficiales Mexicanas relacionadas con la calidad de agua en México.

Norma	Nombre
NOM-001-SEMARNAT-1996, 2021	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
NOM-002-SEMARNAT-1996	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal
NOM-003-SEMARNAT-1996	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público

2.3 Calidad de agua

La calidad de agua es un valor ecológico esencial para la salud y el crecimiento económico (Villena, 2018), con ello la calidad de agua es una medida de las propiedades físicas, químicas y biológicas las cuales para ser medidas se establecen estándares específicos en función de los usos que se le pretende dar (SEMARNAT, 2015),

La calidad del agua se determina mediante la caracterización física y química de muestras de agua y su comparación con normas y estándares de calidad. (CONAGUA, 2019). En la *Figura 4*, se pueden ver algunos de los parámetros físicos, químicos y biológicos en las aguas residuales

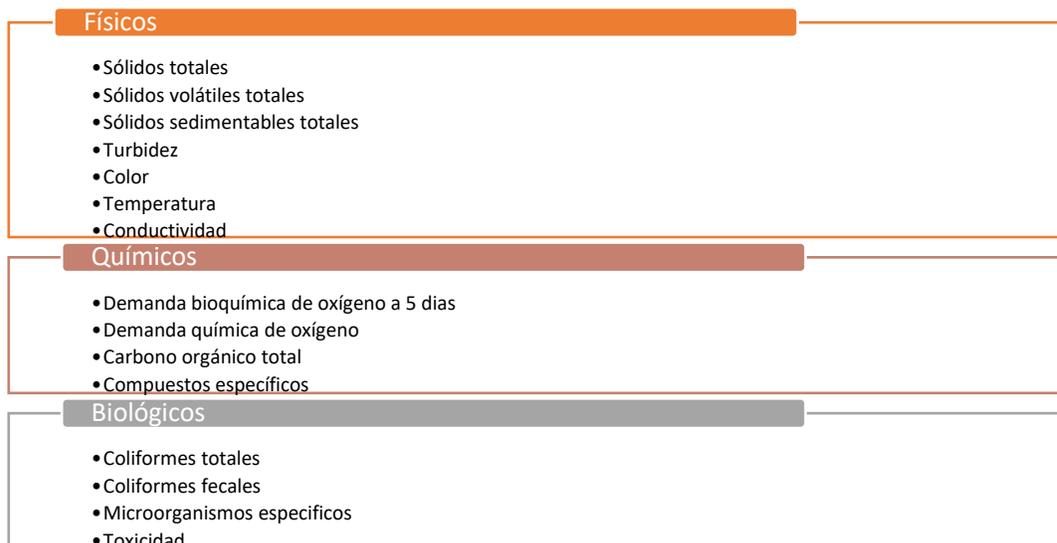


Figura 4. Principales parámetros en las aguas residuales (Fuente Metcalf y Eddy, 2014).

En el caso de aguas residuales de origen municipal provienen de descargas de aguas de las viviendas, edificios públicos y de las escorrentías; estas aguas residuales son colectadas por el drenaje. Sus principales contaminantes son el nitrógeno, fósforo, compuestos orgánicos, bacterias coliformes fecales y materia orgánica (SEMARNAT, 2015).

2.4 Sistemas de tratamiento de agua residual

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales tienen como objetivo la remoción de contaminantes, mediante una interacción de los componentes físico, químicos y biológicos entre una combinación de diferentes tecnologías y procesos unitarios de tratamiento para lograr la calidad de agua establecida requerida para su uso final.

Dentro de los tratamientos de agua se pueden definir etapas de tratamiento en función y cantidad de contaminantes que se deben de remover. En la Tabla 4. Principales tecnologías y operaciones unitarias para el tratamiento de aguas residuales se muestran algunas de las tecnologías de tratamiento de acuerdo a su etapa en la que son empleadas.

Tabla 4. Principales tecnologías y operaciones unitarias para el tratamiento de aguas residuales

Pretratamiento	Desbaste: Rejas Rejillas, Cedazos. Trituradores Desarenadores Separación de aceites y grasas Homogenización
Tratamiento Primario	Sedimentación primaria. Flotación Precipitación química Filtros gruesos Oxidación química Coagulación, floculación, sedimentación y filtración
Tratamiento Secundario	Lodos activados (Convencional, alta capacidad, aireación prolongada, contacto estabilizado) Filtración biológica (Baja capacidad, Alta Capacidad, Contacto estabilización, Aereación Prolongada) Laguna estabilización (aerobia, anaeróbica, facultativa) Humedales Artificiales
Tratamiento Terciario	Coagulación Filtración Adsorción de carbón activado Intercambio iónico Destilación Ósmosis inversa Cloración u ozonización

Fuente: Rojas, 2002

2.5 Humedales Artificiales

Los Humedales Artificiales se utilizan como una tecnología verde que surge de la necesidad de replicar los beneficios ecosistémicos de los humedales naturales para tratar diversos afluentes de aguas residuales (Arteaga-Cortez et al., 2019). Los Humedales Artificiales (*Figura 5*) son sistemas diseñados y construidos con el fin de lograr la depuración de los contaminantes presentes en las aguas residuales, mediante procesos físicos, químicos y biológicos. (CENTA,2016).

Los humedales han mostrado una serie de aspectos que ha motivado su interés por esta tecnología, siendo las principales: sus costos de operación y mantenimiento son significativamente menos a los sistemas convencionales de tratamiento, el aporte de oxígeno es espontáneo, no genera fangos, se integran bien dentro del paisaje, contribuyen al desarrollo de vida salvaje y posibilidad de ser utilizados para la conciencia y educación ambiental (Sanz et al., 2019).

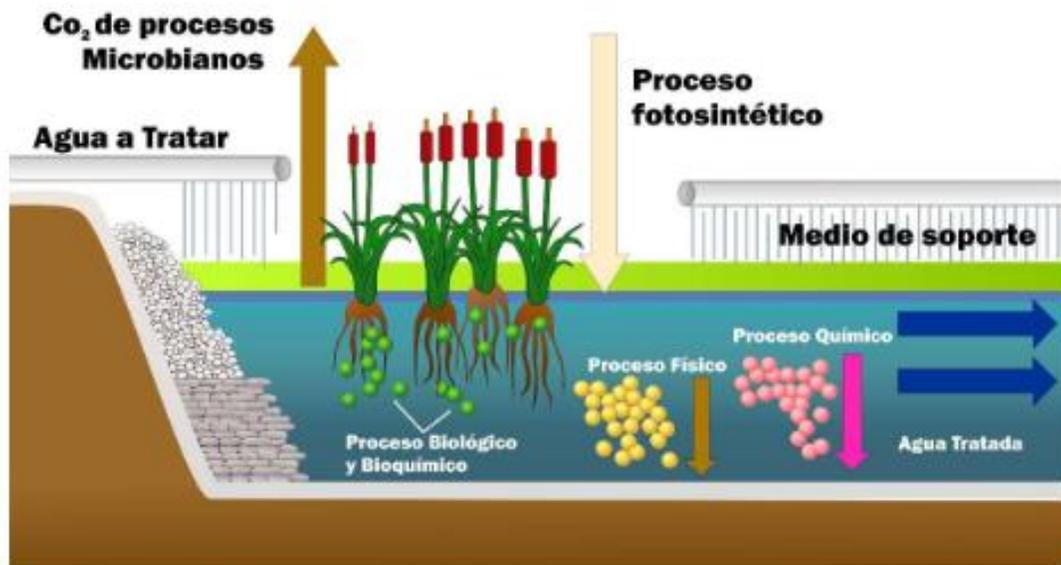


Figura 5. Principales componentes y procesos depurativos en Humedales Artificiales. Fuente: Luna-Pabello y Aburto-Castañeda, 2014.

Los principales componentes de un humedal artificial, son el componente vegetal, representado por plantas vasculares terrestres y/o acuáticas, los microorganismos y el material de empaque o medio de soporte constituido por agregados pétreos (Luna-Pabello y Aburto-Castañeda, 2014).

2.5.1 Componente vegetal.

La vegetación juega un papel importante dentro de los Humedales Artificiales, debido a una serie de funciones fundamental tales como: proveer un ambiente, superficie y nutrientes a los microorganismos para crecer, ayudan en la filtración de material suspendida, protegen y estabilizan el sustrato mediante su sistema de raíces, ayudan a la oxigenación del agua por medio de la liberación de oxígeno desde sus raíces hasta la rizosfera (Kataki et al., 2020).

La vegetación ocupada debe ser tolerante de altas concentraciones orgánicas y de nutrientes presentes en el agua, tener órganos subterráneos (raíces y rizomas) capaces de brindar sustrato a las bacterias y oxigenación de las áreas adyacentes a las raíces, adaptabilidad al medio de soporte, tolerancia a exposición prolongada a los rayos directos del sol, sencillez de manipulación, facilidad de propagación, estética (color, textura, talla y tamaño), baja a media velocidad de propagación, crecimiento y reproducción (Vymazal, 2011).

En los humedales el componente vegetal es elegido con base en su función dentro del humedal, siendo la vegetación depuradora como *Phragmites australis* (carrizo), es la planta más usada, *Arundo donax* (carrizos gigantes), *Juncus effusus* (juncos de esferas). También es acompañada de vegetación de ornato que brinden un beneficio económico tal como *Typha latifolia* L (cola de gato) y *Zantedeschia aethiopica* (alcatraz) (Caballeria et al., 2015 y Zitacuaro-contreras et al., 2021).

2.5.2 Microorganismos

Los microorganismos se encuentran nadando libremente en el agua contenida o bien crecen adheridos al medio de soporte forma de una biopelícula (biofilm). Entre los principales se encuentran bacterias heterótrofas aerobias, facultativas y anaerobias, protozos bacterívoros y micrometazoos (Luna-Pabello y Morales-Ferrero, 2018).

La actividad microbiana forma parte de la remoción de la mayoría de los contaminantes. Por ejemplo, la mineralización de materia orgánica tanto en condiciones anaerobias como aerobias, la remoción de nitrógeno por parte de procesos de amonificación, nitrificación-desnitrificación, la remoción de fósforo, participando en procesos de desinfección mediante ingesta directa de bacterias de origen fecal, por parte de protozoos y micrometazoos (Meng et al., 2013).

2.5.3 Material de soporte

El material de empaque sirve de soporte a la vegetación, permite la filtración del agua a tratar, ayudan a distribuir/recolectar de manera uniforme el caudal y proporcionan área superficial para el crecimiento de la biopelícula microbiana. (ONU, 2008).

La selección de los sustratos, el costo, la disponibilidad en la zona, conductividad hidráulica, velocidad de infiltración, porosidad, la permeabilidad, capacidad de eliminación de contaminantes, funcionamiento y el ciclo de vida son los criterios a considerar (Wang,2020).

Los minerales naturales (la arena, grava, piedras calizas, zeolitas naturales) son los sustratos más aplicados en los humedales artificiales (Ji et al., 2022).

2.5.4 Procesos de depuración de contaminantes .

La depuración de los contaminantes presentes en el influente de un humedal artificial se realiza mediante procesos de tipo físico, químico y biológico; éstos

pueden efectuarse simultáneamente o de manera secuenciada. Los mecanismos predominantes y su secuencia de reacción dependen de los parámetros externos del agua de entrada al sistema, las interacciones internas y las características del humedal (Viloria, 2020).

Los componentes de los humedales artificiales interactúan entre sí para llevar a cabo remoción de diversos contaminantes, por medio de distintos procesos depurativos, como se puede ver en la Tabla 5.

Tabla 5. Procesos de depuración de contaminantes en los humedales artificiales

Contaminante	Proceso depurativo
Materia orgánica (MO).	-Las partículas de MO son eliminadas por sedimentación y filtración, luego convertidas a DBO ₅ soluble. -La MO soluble es fijada y adsorbida por el biofilm y degradada por las bacterias adheridas en este.
Sólidos suspendidos totales	-Sedimentación y filtración. -Descomposición durante los largos tiempos de retención por bacterias especializadas en el medio de soporte
Nitrógeno	-Nitrificación/desnitrificación por el biofilm -Absorción de las plantas (influencia limitada).
Fósforo	-Retención en el lecho de soporte -Precipitación con aluminio, hierro y calcio -Absorción de las plantas (influencia limitada)
Patógenos	-Sedimentación y filtración -Absorción por el biofilm -Depredación por protozoarios. -Eliminación de bacterias por condiciones ambientales desfavorables (Temperatura y pH).
Metales pesados	-Precipitación y adsorción -Absorción de las plantas (influencia limitada)

Fuente: Hoffman et al., 2011

2.5.5 Clasificación de los humedales artificiales

Los Humedales Artificiales se pueden clasificar basado en sus principales características como lo son la dirección del flujo de agua y el tipo de vegetación que se ocupa en ellos, como se muestra en la Figura 6.

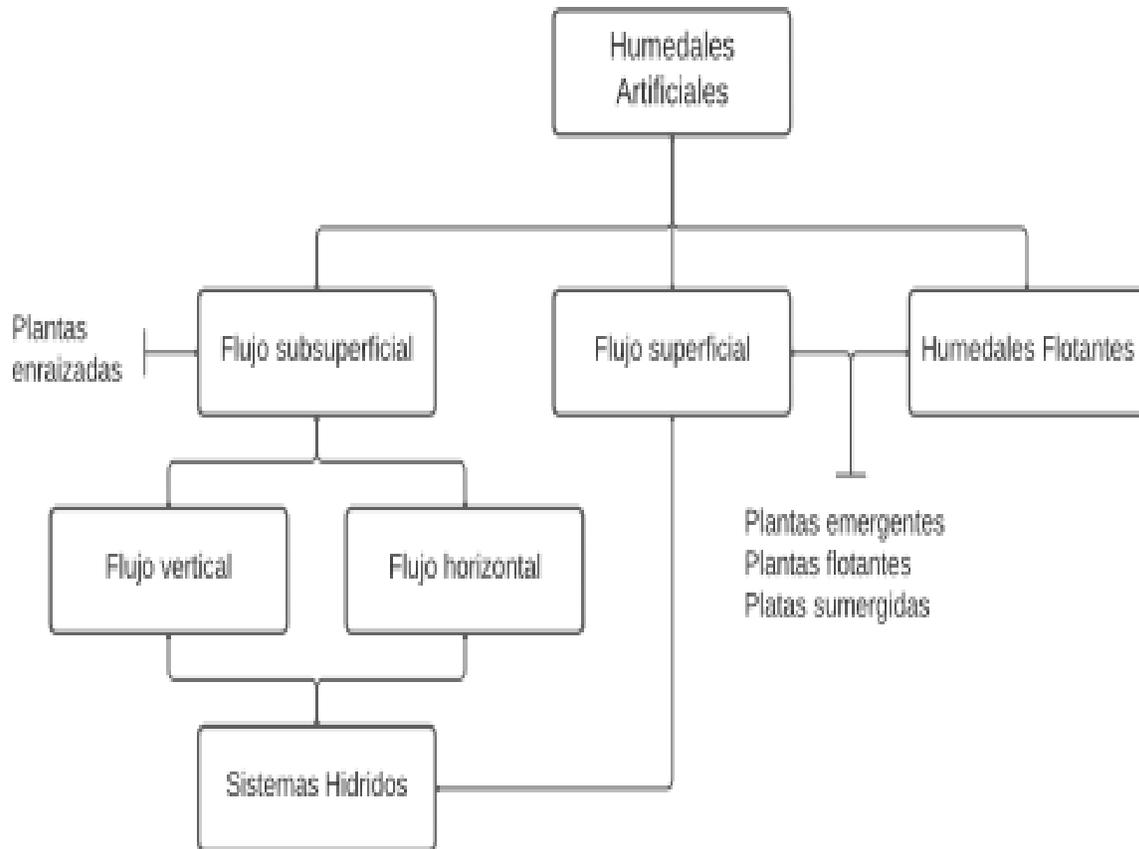


Figura 6. Clasificación de humedales artificiales. Fuente: Stefanakis, 2016.

Los Humedales Artificiales de flujo superficial son aquellos sistemas construidos en los cuales el agua está expuesta en una o más cuencas o canales de poca profundidad (0.3-0.4 m) que tienen recubrimiento de fondo y una capa sumergida de suelo para las raíces de la vegetación emergente seleccionada. (EPA, 2000). Este tipo de tecnología son los más similares en apariencia a los humedales

naturales. Se pueden aplicar para mejorar la calidad para mejorar la calidad de efluentes que ya han sido previamente tratados (Rajadel, 2017).

Los Humedales Artificiales de flujo subsuperficial, son aquellos sistemas que generalmente se excavan en el suelo, se revisten, se rellenan con un medio granular y se usan plantas emergentes. Las Aguas residuales fluyen a través del medio granular y entran en contacto con biopelículas, las raíces y rizomas de las plantas. (García et al., 2010).

Los Humedales Artificiales de flujo subsuperficial se pueden clasificar en flujo horizontal o flujo vertical, según el movimiento del flujo. En los primeros, el agua residual fluye de forma horizontal, tienen una profundidad en un rango entre 0.3 y 0.9 m y se caracterizan por funcionar permanentemente inundados.

Los Humedales Artificiales de Flujo Vertical, circula de forma vertical y tiene lugar de forma discontinua o por medio de pulsos, de manera que el medio granular no está permanentemente inundado. La profundidad del medio granular en este tipo de humedales está en un intervalo de 0.5 a 0.8 m (Asprilla et al., 2020).

Aprovechando las diferentes características de los diferentes tipos de humedales, se pueden combinar los humedales artificiales de flujo subsuperficial y superficial para formar los sistemas híbrido el cual mejore la eficiencia del tratamiento de agua residual, como por ejemplo la remoción de nitrógeno total necesita una condición aerobia/anaerobia para llevar acabo la nitrificación/desnitrificación, la cual puede ser brindada por la combinación de un humedal artificial subsuperficial de flujo vertical (condiciones aerobia) y uno de flujo horizontal(condiciones anaerobias).(Sayadi et al., 2012).

2.6 Descripción de la zona de estudio

2.6.1 Localización.

La laguna "La Piedad" se encuentra ubicada al norte de Ciudad de México, localizada en el municipio de Cuautitlán Izcalli, Estado de México como se observa en la Figura 7. Se localiza en la provincia fisiográfica del eje Neo volcánico y forma parte de la sub provincia fisiográfica Lagos y Volcanes de Anáhuac (INEGI, 2022).

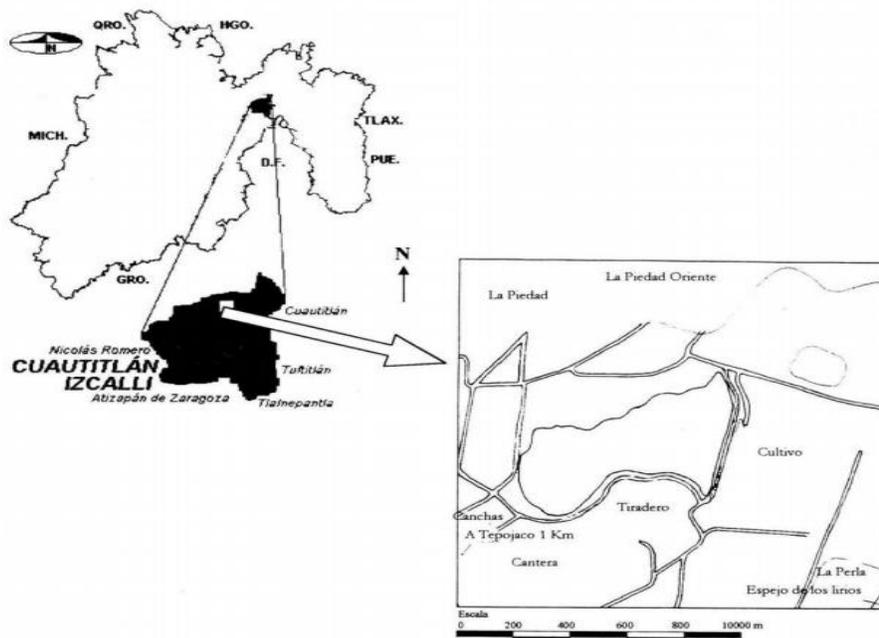


Figura 7: Localización laguna "La Piedad", Cuautitlán Izcalli.

2.6.2 Clima

El clima predominante es el templado subhúmedo la temperatura media anual asciende a 15.1 °C; el mes más caluroso es mayo con 17.9 °C y el más frío febrero con 12.4 °C de temperatura media mensual. El mes más lluvioso es julio con 140.8 mm y el más seco diciembre con 5.9 mm (CONAGUA, 2017).

2.6.3 Hidrología

El municipio de Cuautitlán Izcalli forma parte de la Región Hidrológica número 26 denominada Alto Panuco, en la subregión del Río Moctezuma (26D), dentro de las subcuencas 26 DP (Lagos de Texcoco y Zumpango), así como en la subregión del Río Cuautitlán (26 DN)³. Subcuenca Río Cuautitlán (DN). En la Tabla 6, se muestran los principales cuerpos de agua en la región.

Tabla 6. Principales cuerpos de agua en Cuautitlán Izcalli

Nombre de Cuerpo de agua	Descripción
Lago Guadalupe	Es un cuerpo de agua con capacidad de 60 millones de m ³ de agua y se tiene una extensión de 348 hectáreas
Espejo de los Lirios	Funciona como parque ecológico con una capacidad de 19,500 m ³ de agua en 14.78 hectáreas
Lago de Zumpango	Tiene función de ser un vaso regulador, tiene una capacidad de 100 millones m ³ y una superficie aproximada de 1853 hectáreas
Laguna “La Piedad”	Tiene una capacidad de almacenamiento de 762 000 m ³ y tiene una superficie de 34 hectáreas

Fuente: Plan de Desarrollo Municipal 2019 (INEGI, 2020).

El área de estudio de la laguna “La Piedad” cuenta con una serie de ríos y canales de riego, los cuales funcionan como entradas y salidas de agua los cuales se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Principales ríos en el área de estudio a la laguna “La Piedad”.

Nombre de Cuerpo de agua	Descripción
Ex canal Aurora	Se origina en la colonia La Aurora y su recorrido va por las colonias La Piedad, Tepojaco para desembocar en el cauce de río Tepojaco.
Río Tepojaco	Origina de compuerta Tepojaco la cual sirve como conexión entre la Presa de Guadalupe, sigue su cauce hasta desembocar en la laguna “La Piedad”. También conocido como Río Zamorita
Río Cuautitlán	Es un río que nace en la presa de Iturbide y sigue su cauce hasta llegar con a la presa de Guadalupe. Tiene una longitud de 24 km. Se conecta con la laguna “La Piedad” mediante canales localizados al este de la laguna.

Fuente: Plan de Desarrollo Municipal Cuautitlán Izcalli 2019.

El municipio de Cuautitlán Izcalli cuenta con una población de 531,041 personas distribuidas en Urbana 97%, en proceso de urbanización 2% y rural 1% en un total de 10 localidades que conforman el territorio municipal, se tiene una densidad de población de 4, 815 Hab/km². (Plan de desarrollo Municipal 2019).

2.6.4 Actividades económicas.

El producto Interno Bruto de Cuautitlán Izcalli es de \$ 87,700.30 millones de pesos, lo cual representa el 5.4% del producto interno bruto del Estado de México. Los indicadores sociales mostrados en el Plan de Desarrollo Municipal Cuautitlán Izcalli 2019-2021, se muestra que la pobreza en el municipio es menor comparada con el estado y el país, sin embargo, el porcentaje de población perteneciente a esta población es del 27.7 % del total de población.

La Tabla 8, muestra la condición de la actividad económica, en el municipio de Cuautitlán Izcalli, de acuerdo con el número de población económicamente activa e inactiva.

Tabla 8. Condición de actividad económica de acuerdo con datos de población económicamente activa e inactiva

Población total		Población de 12 años y mas	Población económicamente activa			Población económica -mente no activa	No especificado
			223, 446				
			Total	Ocupada	Desocupada	210,192	2,355
Total	531,041	435,993	51.25%	95.32%	4.68%	48.21%	0.54%
Hombres	257,010	208,741	68.25%	94.93%	5.07%	31.22%	0.53%
Mujeres	247,001	227,252	35.60%	96.01%	3.99%	63.82%	0.58%

Fuente Plan de Desarrollo Municipal Cuautitlán Izcalli 2019.

En el territorio municipal, predominan las actividades económicas terciarias destinadas a los servicios y comercio. En segundo lugar, se encuentran las secundarias dedicadas a la producción de bienes principalmente manufactureros.

2.6.5 Antecedente histórico.

La laguna “La Piedad” es un cuerpo de agua, el cual ha sufrido una serie de cambios a lo largo de su existencia. Especialmente en los últimos años, debido al proceso de urbanización acelerado, debido al incremento demográfico del municipio de Cuautitlán Izcalli. A continuación, se nombran algunos de los sucesos más importantes en referencia con la laguna la Piedad.

En sus orígenes, la laguna funcionaba como vaso regulador para almacenar el agua, la cual era aprovechada para riego agrícola. En 1889 se construye la Fábrica de Fibras Duras y Similares de la República Mexicana, encargada de producir hilados y costales de yute. Esta fábrica, requirió a la construcción del ahora ex canal de la Aurora para descargar en la laguna los residuos de su proceso de producción. Debido a la construcción de la fábrica, se estableció una

pequeña población con servicios como agua potable, drenaje, baños.

Entre 1936 y 1943, se construye la presa de Guadalupe para captar y regular el agua de lluvia y de riego de la zona. Mediante el ahora río Tepojaco, se enviaba agua con frecuencia a la laguna cuando el volumen de esta disminuía a niveles críticos. Según registros se tiene un valor de 20 L/s de agua enviada de lago de Guadalupe a la laguna la Piedad. Se funda Cuautitlán Izcalli el 31 de julio de 1971, el 15 de septiembre de 1978 la laguna la Piedad queda incluida dentro de la Declaratoria de Propiedad Nacional Núm. 6062.

Entre 1975 y 1980 se da un incremento demográfico en la población debido al cual se crean 33 polígonos de estructura urbana entre ellos destaca La Piedad (Fracción I y II). Entre 1995 y 2000, se empezaron la construcción de fraccionamientos y conjuntos urbanos de La Piedad (Primera Etapa). Para los años entre 2000 y 2010 se construyen viviendas de uso social entre ellas la Piedad (Segunda Etapa) y Lomas de Cuautitlán. Por ello se construye la planta de tratamiento Lomas de Cuautitlán que opera entre el año de 2000 y 2006. Debido a la construcción del desarrollo urbano la Piedad, se construye una planta de tratamiento llamada la Piedad II en 2010, la cual se mantuvo en operación hasta 2014 por falta de recursos asignados a su mantenimiento.

En 2019, se realizaron campañas para la recolección de basura en la laguna destacando la organizada por Grupo Televisa la cual convocó a una gran cantidad de personas.. Las campañas se siguen realizando en 2022 por medio de campañas convocadas por los vecinos del área limítrofe.

2.6.6 Plantas de tratamiento en Cuautitlán Izcalli.

El municipio de Cuautitlán Izcalli cuenta con una infraestructura para el tratamiento de aguas residuales que consta de 8 plantas de tratamiento las cuales tratan el 2.53% de las aguas residuales por año ya que solo opera una planta tratadora. En

el área de estudio se encuentran 3 plantas de tratamiento las cuales son las mostradas en la Tabla 9

Tabla 9. Plantas de tratamiento en el área de estudio

Nombre	Capacidad instalada	Descripción
La Piedad II	18 L/s	Consta un sistema de rejillas de tres trenes de tratamiento con capacidad de 6 L/s, un reactor aerobio y un proceso terciario de desinfección. Actualmente fuera de servicio debido a la falta de equipamiento.
Lomas de Cuautitlán	24 L/s	Consta de un proceso tratamiento de rejillas, un desarenador, un reactor aerobio y un proceso terciario de desinfección. Actualmente fuera de servicio debido a la falta de equipamiento y abandono total de las instalaciones
Planta de tratamiento de aguas residuales Presa de Guadalupe	750 L/s	Cuenta con tres trenes de tratamiento de 250 L/s. Sin embargo, aún no se encuentra en operación, por falta de construcción de un colector de alimentación.

Fuente: Elaboración propia

2.6.7 Descargas residuales en la laguna la Piedad

Las descargas residuales en la laguna la Piedad se han presentado principalmente debido al crecimiento urbano de las áreas cercanas como el conjunto urbano la Piedad y Lomas de Cuautitlán en los últimos 20 años. Lo cual ha llevado a la pérdida de biodiversidad en la laguna La Piedad como resultado del deterioro de la condición de la laguna, lo cual ha causado no solo problemas

en el medio ambiente y en la salud de los habitantes del área limítrofe a la laguna.

Actualmente, se cuentan con cuatro descargas continuas y una descarga intermitente que desembocan en la laguna La Piedad debido al sistema de ríos que alimentan al cuerpo de agua. Estas descargas residuales son domésticas sin tratar debido a que las plantas de tratamiento se encuentran fuera de servicio, lo que ha provocado un deterioro en la laguna La Piedad. En las figuras 8, 9 y 10 se muestra la condición de la laguna La Piedad, por efecto de las descargas residuales y los distintos desperdicios vertidos en la laguna.



Figura 8. Condición de la laguna La Piedad. Fuente: Elaboración propia.



Figura 9. Condición del área cercana a la laguna La Piedad. Fuente: Elaboración propia.



Figura 10. Aves observadas en la laguna (Foto tomada por: Gustavo Schinca, 2022.)

3. Metodología

Para poder cumplir con los objetivos de la investigación se necesitaron emplear diversas metodologías, las cuales fueron llevadas a cabo en el laboratorio de microbiología experimental de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México y mediante trabajo de campo, en la zona de la Piedad, Cuautitlán Izcalli, Estado de México. Las actividades realizadas se muestran a continuación.

3.1 Actividades para definir el área de estudio

Se realizaron recorridos con la finalidad de localizar y documentar, aquellas zonas de interés con respecto al área de estudio, las cuales fueron: entradas y salidas directas de la laguna La Piedad, cuerpos de agua, plantas de tratamiento existentes, conexiones entre los cuerpos de agua en su caso de existir. Se llevó a cabo, una investigación bibliográfica con el objetivo de conocer: análisis históricos de calidad de agua, estudios hidrológicos o información histórica relacionada con el área de estudio.

3.2 Elaboración de plano topográfico.

La información obtenida, se procesó y se delimitó un área mediante una georreferenciación, para conocer la información territorial mediante el programa Civil 3d AutoCAD a partir de delimitar la zona de interés mediante un área poligonal. Como resultado se obtuvieron las curvas de nivel del terreno en el plano. Al plano se le adicionó un pie de plano, y acotaciones referentes a los cuerpos de agua y áreas de interés.

3.3 Elaboración de balance hídrico.

El balance hídrico de agua en el área de estudio se elaboró con base en información recopilada, tanto presencial como acerca de las entradas y salidas de agua por medio del método de medición directa conocido como: “método de medición de caudal por flotadores”. Los valores relacionados con las lluvias, fueron obtenidos con base en los datos registrados por la estación Climatológica

San Martín de Obispo, Cuautitlán Izcalli. Los volúmenes de entrada y salida, que no pudieron ser evaluados, se conocieron mediante un balance volumétrico del agua en el sistema.

3.3.1 Método del caudal por medio de flotadores.

Este método, nos permite estimar en forma aproximada el caudal de una corriente de un cuerpo de agua. Para ello, se debe de estimar la velocidad de agua y el área del canal. El caudal se estima mediante la siguiente expresión matemática:

$$Q = FC \times A \times \left(\frac{L}{t}\right)$$

Ecuación 1

Donde FC es el factor de corrección, A es el área [m^2], L longitud del punto A al punto B [m], t el tiempo [s] y Q es el caudal [m^3/s]. (DGRIA,2015).

El procedimiento consiste en delimitar un tramo recto y uniforme, de entre 5 y 10 metros de longitud, se marcan los puntos de inicio (A) y el punto de salida (B), se mide la profundidad en el área delimitada en secciones transversales del ancho del cauce. Un objeto con capacidad de flotar, es arrojado 2 metros antes de las marcar de punto A, se mide el tiempo que tarda en pasar por los puntos marcados, este proceso se repite de 3 a 5 veces. Se obtiene un promedio del tiempo y se obtiene el caudal promedio.

3.4 Determinación de la calidad de agua

En la Figura 11 se muestra los puntos (Puntos 1 a 7) donde fueron tomadas las muestras de agua el día 23 de marzo de 2020, para después ser analizadas por el laboratorio certificado IDECA S.A de C.V. En la Tabla 10 se muestra los métodos realizados por el laboratorio para conocer los valores de calidad de agua solicitados.



Figura 11. Puntos de muestreo del estudio de calidad de agua elaborado el 23 de marzo de 2020

Tabla 10. Métodos Analíticos realizados para conocer los parámetros de calidad de agua por IDECA S.A de C.V.

Parámetro	Unidades	Métodos Analíticos
DBO ₅	mg/L	NMX-AA-028-SCFI-2001
DQO	mg/L	NMX-AA-030/2-SCFI-2011
Fósforo total	mg/L	EPA-365.1-1993
Nitrógeno total Kjeldahl	mg/L	EPA-351.2-1993
Nitritos (N-NO ₂)	mg/L	SM-4500-NO3I
Nitratos (N-NO ₃)	mg/L	SM-4500-NO3I
Nitrógeno total	mg/L	SUMA
Grasas y aceites	mg/L	SM 5520-D 2012
Sólidos sedimentables	mL/L	NMX-AA-004-SCFI-2013
Sólidos suspendidos totales	mg/L	NMX-AA-034-SCFI-2015
Coliformes totales	NMP/100mL	NMX-AA-042-SCFI-2015
Coliformes fecales	NMP/100mL	NMX-AA-042-SCFI-2015

3.5 Elaboración y evaluación de propuestas conceptuales

Con la información recolectada , se llevaron a cabo propuestas conceptuales sobre las alternativas disponibles para el tratamiento de agua de la laguna “la Piedad” con el fin de integrar las alternativas para el tratamiento del agua residual , mediante una descripción general del tratamiento, probables entradas y salidas de agua, requerimientos de remoción basados en la NOM-001-SEMARNAT-1996 para uso agrícola de embalses naturales y artificiales para uso agrícola (B) del efluente con respecto al influente para los parámetros de DBO₅, Fosforo Total , Nitrógeno Total, Sólidos Suspendidos Totales y Coliformes totales, como se puede ver en la Tabla 11. Concentraciones establecidas por la NOM-001-SEMARNAT-1996 para uso agrícola (B), costos de construcción y mantenimiento. El humedal artificial requirió, plantear áreas tentativas para su construcción y llevar acabo un diseño conceptual

Tabla 11. Concentraciones establecidas por la NOM-001-SEMARNAT-1996 para uso agrícola (B)

Parámetro	Unidades	Promedio mensual
DBO ₅	mg/L	75
Solidos Suspendidos Totales	mg/L	75
Nitrógeno Total	mg/L	40
Fósforo Total	mg/L	20
Coliformes Totales	NMP/100mL	N/a

Fuente: NOM-001-SEMARNAT-1996 (2021).

Debido a la condición de las plantas de tratamiento de lodos activados (PTAR), se utilizaron parámetros de remoción de contaminantes de referencia descritos por Rodríguez-Miranda (2015) los cuales se pueden ver en la Tabla 12, para conocer los distintos parámetros de salida de la PTAR.

Tabla 12. Valores de referencia en % de remoción de contaminantes según los parámetros que se utilizan para el diseño de propuestas conceptuales.

Parámetro	Sedimentador primario		Planta de tratamiento de Lodos activados	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
DBO ₅ mg/L	25	40	85	95
FT mg/L	-	-	10	25
NT mg/L	-	-	10	30
SST mg/L	40	65	10	15
Coliformes Total NMP/100mLes	-	-	70	95

Fuente: Metcalf & Eddy (2003)

3.6 Selección de áreas para la construcción de humedal artificial

Los criterios para elegir las áreas tentativas se basan en características topográficas, ubicación de viviendas, localización del cuerpo de agua a tratar, El terreno apto para la instalación de un sistema humedales artificiales debe de tener una topografía uniforme horizontal o con ligera pendiente no mayores a 5%.

Se debe tomar en cuenta el uso de suelo siendo las áreas preferidas para la instalación de sistemas de humedales artificiales espacios abiertos o de uso agrario. El tipo de suelo también se debe de considerar, debido al proceso de impermeabilización de la capa superficial del terreno, el establecimiento de la vegetación, por último las estructuras de entrada y salida.

3.7 Diseño del humedal artificial en las propuestas

Los criterios y bases de diseño de un humedal artificial permiten dimensionar el área requerida por un Humedal artificial basado en la remoción de DBO, de acuerdo a modelo propuestos por Kadlec & Knight para HAFSS el cual permite conocer el Área Superficial necesaria. Se establece una propuesta conceptual

basado en una distribución del área necesaria y se conocen las propiedades tales como el tiempo de retención hidráulico (TRH) basado en las propiedades del medio de soporte, el cual es elegido dependiendo de las propiedades del mecánicas y químicas del material de soporte. Por su parte la elección del componente vegetal basadas en las características previamente descritas para un HAFSS y se considera que el número empleado debe ser de 1 planta por m². La memoria de cálculo asociada a los humedales planteados se puede consultar en el **ANEXO IV**.

3.8 Análisis costo beneficio

Con base en las propuestas expuestas, se realizó una comparación los valores presentes aproximados del costo de construcción, rehabilitación, operación y mantenimiento. Se investigo y documentaron, beneficios tangibles intangibles, de los distintos sistemas de tratamiento de las propuestas. Los costos reportados fueron actualizados, con base en el Índice de Precios al Productor (INPP), del sector de construcción (23), para los meses de febrero de los distintos años. En la *Tabla 13*, se muestran los índices considerados para actualizar los costos.

Tabla 13 Valores INPP considerados para actualizar precios de las propuestas

Año	INPP
2002	51.94
2006	61.01
2010	70.92
2014	80.34
2018	92.63
2022	112.97

Fuente: INEGI (2022).

4. Resultados

4.1 Condiciones topográficas del área de estudio

La laguna la Piedad cuenta con una medida de 330 000 m², los cuales presenta una variación de alturas de 2280 m a 2274 m de este a oeste donde se encuentra localizado el bordo la piedad con una altura aproximada de 2.4 m de altura.

En la Figura 16, se puede observar el plano topográfico del área de estudio, donde se muestra un área con variaciones de alturas que van desde los 2309 m a 2274 m. La zona suroeste se presenta como el área más elevada y la parte noreste como la zona menos elevada.

El rio Tepojaco fluye de suroeste a noroeste, con un perfil de nivel que se observa en la Figura 12 que va desde la compuerta Tepojaco hasta la laguna La Piedad. En el recorrido, se une la descarga del ex -canal la Aurora, mediante un canal de riego.

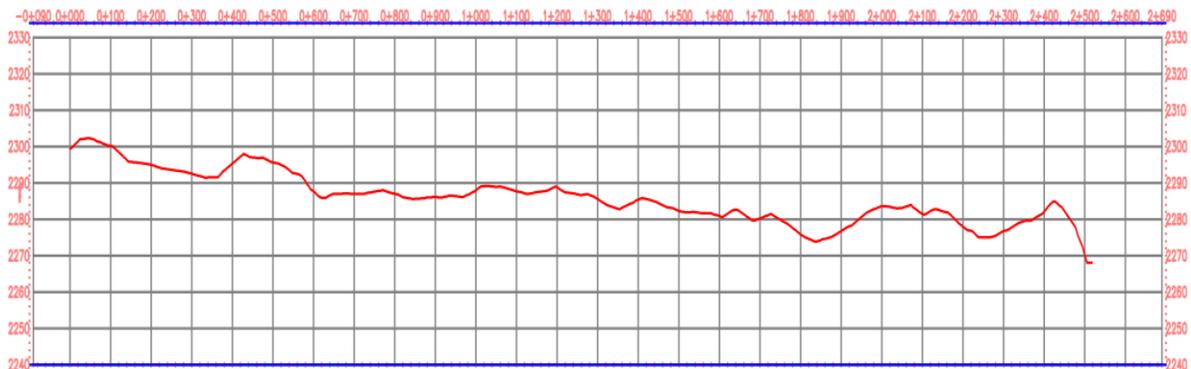


Figura 12. Perfil de nivel de río Tepojaco

El ex canal de la Aurora fluye de suroeste a noroeste hasta una desviación para llevar las descargas al río Tepojaco. En la Figura 13. Perfil de nivel de ex-canal Aurorase muestra el perfil de nivel del ex-canal Aurora, sin considerar el tramo de

desviación.

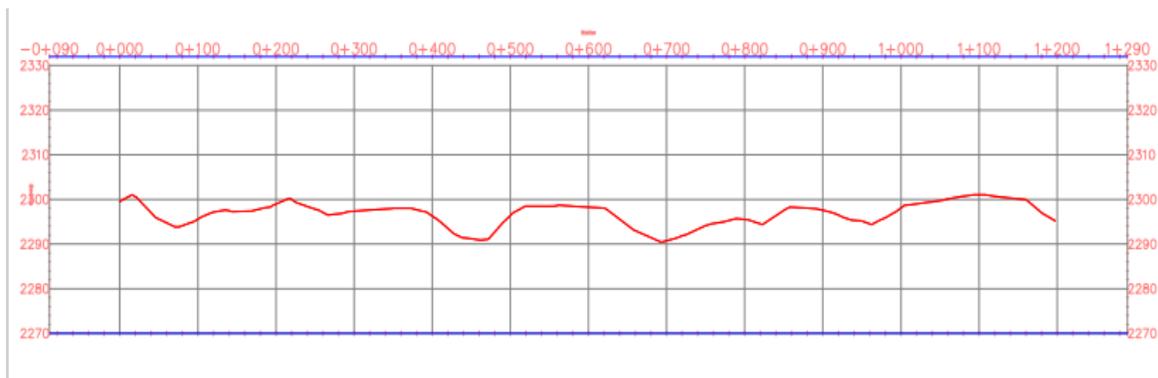


Figura 13. Perfil de nivel de ex-canal Aurora

En el área sur de la laguna se observan cambios de altura debido a la existencia de minas al aire libre en desuso, lo que lleva a la falta de áreas uniformes que permitan construir. Por ello, la mayoría de construcciones se encuentran localizadas en la zona sur este y noreste, al igual que la orilla de la laguna donde las características del área han permitido que se realicen construcciones.

Los requerimientos de área para la construcción de los humedales artificiales al necesitar extensas áreas de terreno con pocas variaciones de altura (para evitar el aumento en los costos de preparación del terreno), que se encuentren cerca del cuerpo de agua que se desea tratar, que cuente con un fácil acceso a áreas que faciliten tales como autopistas, carretera, caminos y la disponibilidad del terreno

Las áreas mostradas en la Figura 14 (Área 1) y en la Figura 15 (Área 2) cumplen con los criterios relacionados con la selección de áreas disponibles. Por ello, debido a la proximidad del a la laguna, así como su disponibilidad de terreno el Área 1, se presenta como la mejor opción para la construcción de un humedal artificial. El Área 2, a pesar de contar con el espacio que puede ser reutilizado para la construcción del sistema de tratamiento, presenta algunas desventajas, principalmente asociadas a la lejanía de la laguna.



Figura 14. Área 1, localizado en la orilla noroeste de la laguna “La Piedad”
Fuente: Google Earth, 2022.



Figura 15. Área 2, localizada en el área cercana de la PTAR Lomas de Cuautitlán
Fuente: Google Earth, 2022

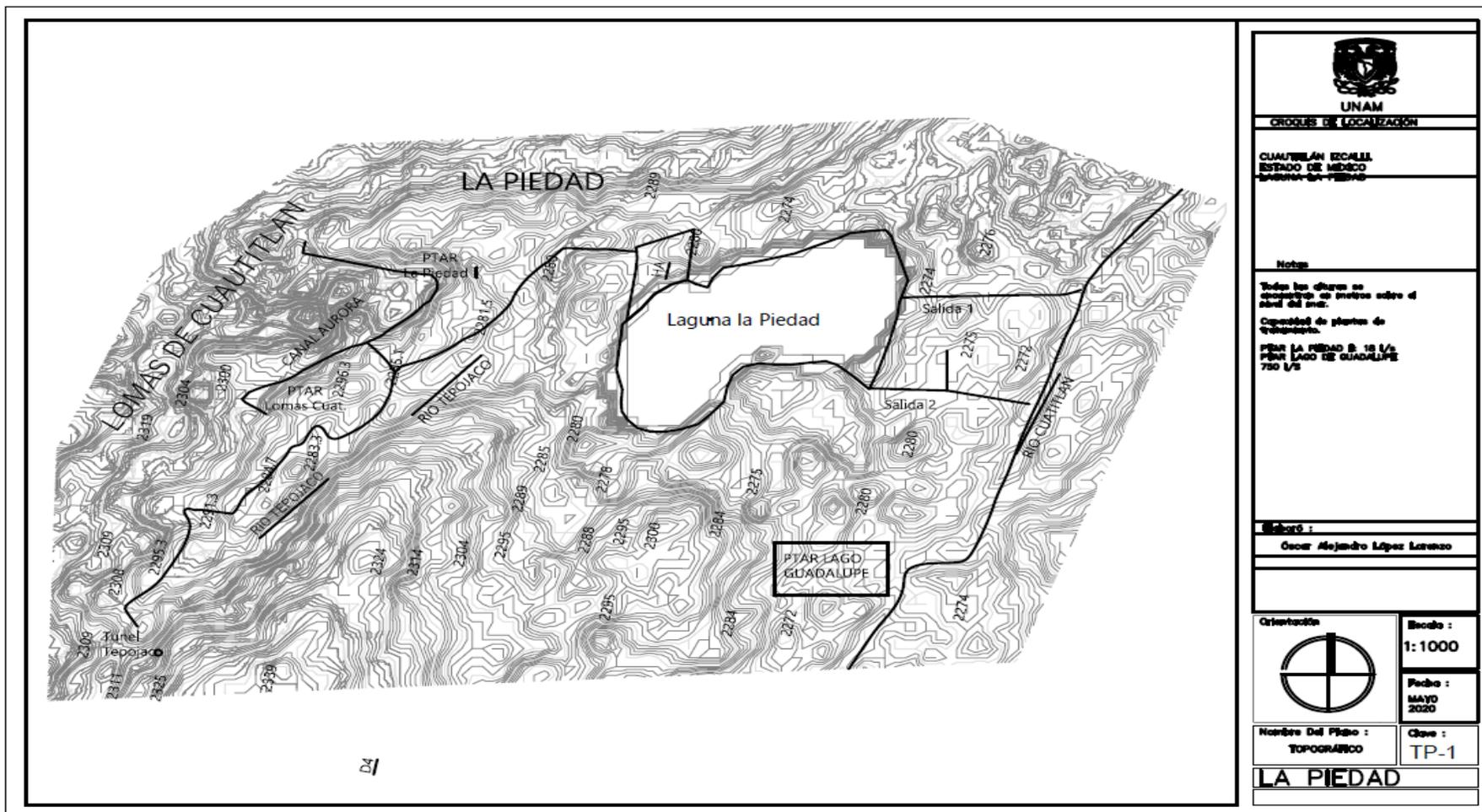


Figura 16. Plano topográfico laguna "La Piedad"

4.2 Uso de suelo

El uso de suelo en el municipio de Cuautitlán Izcalli cuenta con una extensión de 11021.91 ha las cuales están distribuidas en uso urbano 54.77 %, pastizal 14.51%, industrial 10.34%, agricultura de riego 6.98 %, agricultura temporal 5.69%, cuerpos de agua 4.29%, área verde 1.46% y 0.87 % parques.

En el área de estudio correspondiente, la mayoría de las áreas dedicadas al cultivo son de alfalfa, avena, maíz y frijol para autoconsumo.

De acuerdo con la Secretaria de Desarrollo Sustentable del Estado de México, el área circundante a la laguna “La Piedad” se considera en su mayoría como un área de recreación y turismo como se observa en Figura 17, con la notación de RT. la laguna forma parte del área natural protegida con la categoría de parque estatal al parque “Santuario del agua laguna de Zumpango”.

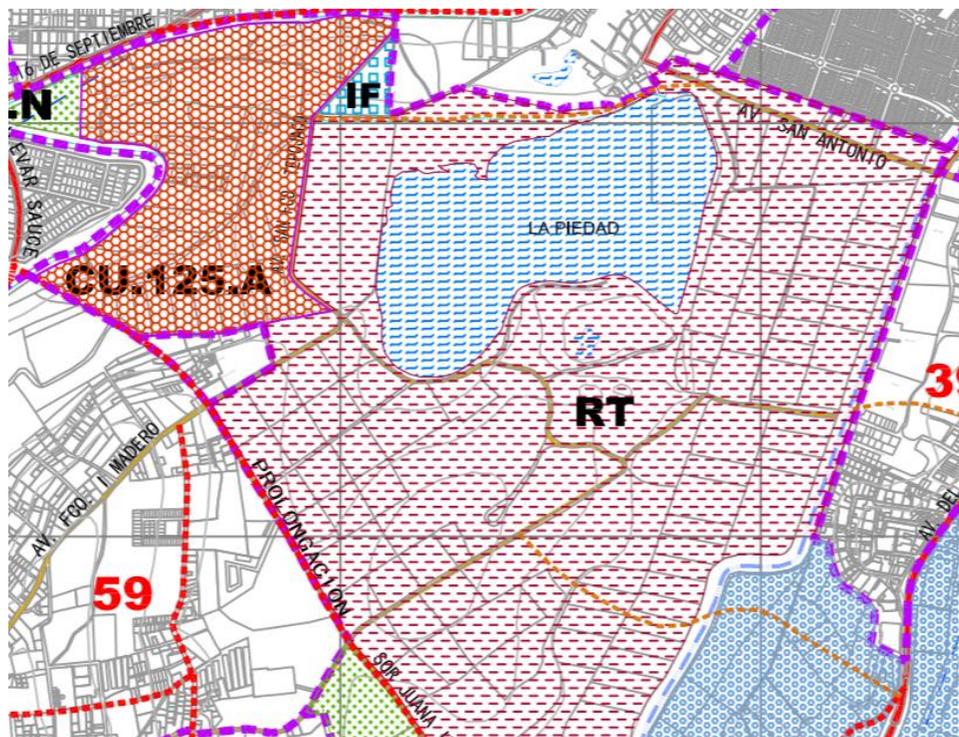


Figura 17. Usos de suelo de la zona de estudio, fragmento de: secretaria de Desarrollo Sustentable Estado de México (2012), usado en Plan Municipal de Desarrollo Urbano Cuautitlán Izcalli 2019.

4.3 Calidad de agua.

Los datos de calidad de agua mostrados en la Tabla 14, corresponden a los aportados por CAEM, los cuales fueron medidos y analizados en la fecha de 06 de agosto del 2019, en conjunto con datos tomados por la Subdirección de Plantas de tratamiento el día 14 de agosto del 2019. Se desconoce la posición exacta del lugar donde fueron tomadas las muestras: Se infiere, por el contenido de la etiqueta, que las muestras pueden ser atribuidas a la entrada y salida (para el caso de la CAEM) y para la salida de la PTAR “La Piedad II”. En el caso de la tomada por la Subdirección de Plantas de Tratamiento.

Tabla 14. Parámetros de calidad de agua de muestras tomadas por distintas dependencias en el área de estudio.

Elaboró		CAEM REG. Poniente	CAEM REG. Poniente	Subdirección de Plantas de Tratamiento	-
Fecha de muestreo		06/08/19	06/08/19	14/08/19	-
Fecha de análisis		06/08/19	06/08/19	15/08/19	-
Nombre		Entrada laguna La Piedad	Salida de la laguna la Piedad	Salida PTAR la Piedad II	NOM-001- SEMARNAT- 1996
Parámetros	Unidades				
Físico- Químicos					
Temperatura	°C	-	-	-	N.A
pH	U. de pH	-	-	-	5-10.0
SST	mg/L	48	79	292	
SS	mg/L	1.7	1.6	0.9	
Materia Flotante	(Ausencia, Presencia)	-	-	-	Ausencia
Fosforo Total	mg/L	5.4	3.9	10.8	30
Grasas y aceites	mg/L	12	46	144	25
Nitrógeno Total	mg/L	35.84	45.36	62.16	60
DQO	mg/L	239	114	899	-
DBO	mg/L	122	71	344	200

Tabla: 14. Continuación...

Metales Pesados					
Arsénico	µg/L	2.982	2.435	0.297	400
Cadmio	µg/L	1.039	0.784	-	400
Cobre	µg/L	0.0126	0.121	0.046	6
Cromo Total	µg/L	0.006	0.004	0.004	1.5
Mercurio	µg/L	0.0003	0.257	<.0003	20
Níquel	µg/L	0.064	0.056	0.023	4
Plomo	µg/L	5.252	4.375	5.782	1000
Zinc	µg/L	0.07	0.042	0.229	20
Cianuros	mg/L	<0.002	<0.002	<0.002	3

La Tabla 15 muestra los valores obtenidos por las muestras tomadas el día 23 de marzo del 2020 por parte del personal perteneciente Laboratorio de Microbiología Experimental del Departamento de Biología de la Facultad de Química de la UNAM y fueron analizados por el Laboratorio IDECA S.A de C.V.

Las muestras de agua evaluadas para la realización de los análisis de calidad agua, fueron tomadas sin considerar el tiempo de residencia del agua, las variaciones de la concentración de los contaminantes debido al desarrollo de actividades humanas a lo largo del día y el efecto de las lluvias. Los datos solo serán usados de forma indicativa, de las posibles concentraciones que se tienen presentes en el sistema hídrico del área de estudio.

Tabla 15. Datos de calidad de agua de muestreo realizado el 23 de agosto de 2020 por UNAM/IDECA

Fecha de muestreo		23/03/20	23/03/20	23/03/20	23/03/20	23/03/20	23/03/20	23/03/20	
Fecha de análisis		23/03/20	23/03/20	23/03/20	23/03/20	23/03/20	23/03/20	23/03/20	
Nombre		1.Salida 2 Laguna la piedad	2.Laguna la piedad parte sur.	3. Salida 1 Laguna la piedad	4. Entrada laguna La Piedad	5.Rio Tepojaco	6. Planta de Lomas de Cuautitlán	7.Descarga a Lomas de Cuautitlán	NOM-001-SEMARNAT-1996
Parámetros	Unidades								
Temperatura	°C	-	-	-	-	-	-	-	N.A
pH	U. de pH	-	-	-	-	-	-	-	5-10.0
SST	mg/L	68	54	58	90	186	195	145	75
SS	mg/L	0.1	0.1	< 0.1	0.4	0.5	< 0.1	0.1	75
Materia Flotante	(Ausencia, Presencia)	-	-	-	-	-	-	-	Ausencia
Fosforo Total	mg/L	9.576	11.46	9.347	6.108	6.952	9.603	87.071	30
Grasas y aceites	mg/L	12.4	9.1	15.8	24	26.4	90.0	82.1	25
Nitrógeno Total	mg/L	67.507	63.152	59.406	63.574	60.643	63.521	87.071	60
DQO	mg/L	149	179	51	159	150	3475	3965	-
DBO₅	mg/L	38	40	125	89	87	1609	1554	200
Coliforme Totales	NPM/100mL	≤2.4x10 ⁴	≤2.4x10 ⁴	≤2.4x10 ⁴	≤2.4x10 ⁴	≤2.4x10 ⁴	≤2.4x10 ⁴	≤2.4x10 ⁴	>1000

4.4 Balance Hídrico

El balance hídrico se llevó a cabo mediante un monitoreo de los flujos de entrada y salida, en un periodo entre el año 2019-2020. Se clasificaron de acuerdo a la presencia de distintas entradas y salidas observadas, se nombró como “Temporada de Lluvias” los meses de mayo a octubre. Los meses de noviembre a abril fueron clasificados como “Temporada de Estiaje”, durante este periodo se presenta la “Temporada de Estiaje II” por efecto de la apertura túnel Tepojaco localizada en el origen del Rio Tepojaco para llevar un mayor flujo de agua proveniente del lago de Guadalupe en el rio riego de parcelas presentes a lo largo del Rio Tepojaco. Esta apertura se lleva a cabo durante un periodo aproximado de tres semanas entre los meses de marzo y abril.

La laguna recibe dos descargas principales las cuales son nombradas como “descarga fluvial” y “entrada a la laguna” localizadas al noroeste de la laguna. La corriente “entrada a la laguna” resulta de la unión de los flujos aportados por las entradas “Descarga la Piedad” y “Compuerta Tepojaco” en el cauce del rio Tepojaco por medio de un canal de riego. La “descarga fluvial” se forma debido a las descargas fluviales en el sistema de alcantarillado de las zonas aledañas en la temporada de lluvias.

Según los datos reportados en el plan de desarrollo de Cuautitlán Izcalli, la precipitación anual promedio es de 653 mm, el mes más lluvioso es Julio con 132 mm y el más seco es diciembre con 6 mm. Por su parte el mes con más días de lluvia corresponde a julio con 19.5 promedio días de lluvia

Las salidas de la laguna son dos nombradas como “Salida I” y “Salida II” localizados en la parte este. Las salidas están reguladas por compuertas las cuales se abren y se cierran en función de la necesidad de agua para las parcelas ubicadas en esa región. Sin embargo, la mayor parte del tiempo permanecen abiertas llevando el flujo de salida hasta el rio Cuautitlán.

La temporada de Estiaje II, representa donde los flujos de entrada y salida de la laguna son los mayores registrados en comparación otras temporadas del año. El aumento del flujo de entrada de agua es ocasionado por la apertura total de la “compuerta Tepojaco” para el riego de las parcelas localizadas en la zona este del área de estudio. Los flujos de entrada y salida varían a lo largo de esta temporada como efecto de la apertura y clausura de canales para riego localizados a lo largo del río Tepojaco.

Los resultados se muestran en la Figura 18, en la cual se puede observar el balance hídrico del área de estudio, elaborado a partir de los datos de **ANEXO II** y **ANEXO III**.

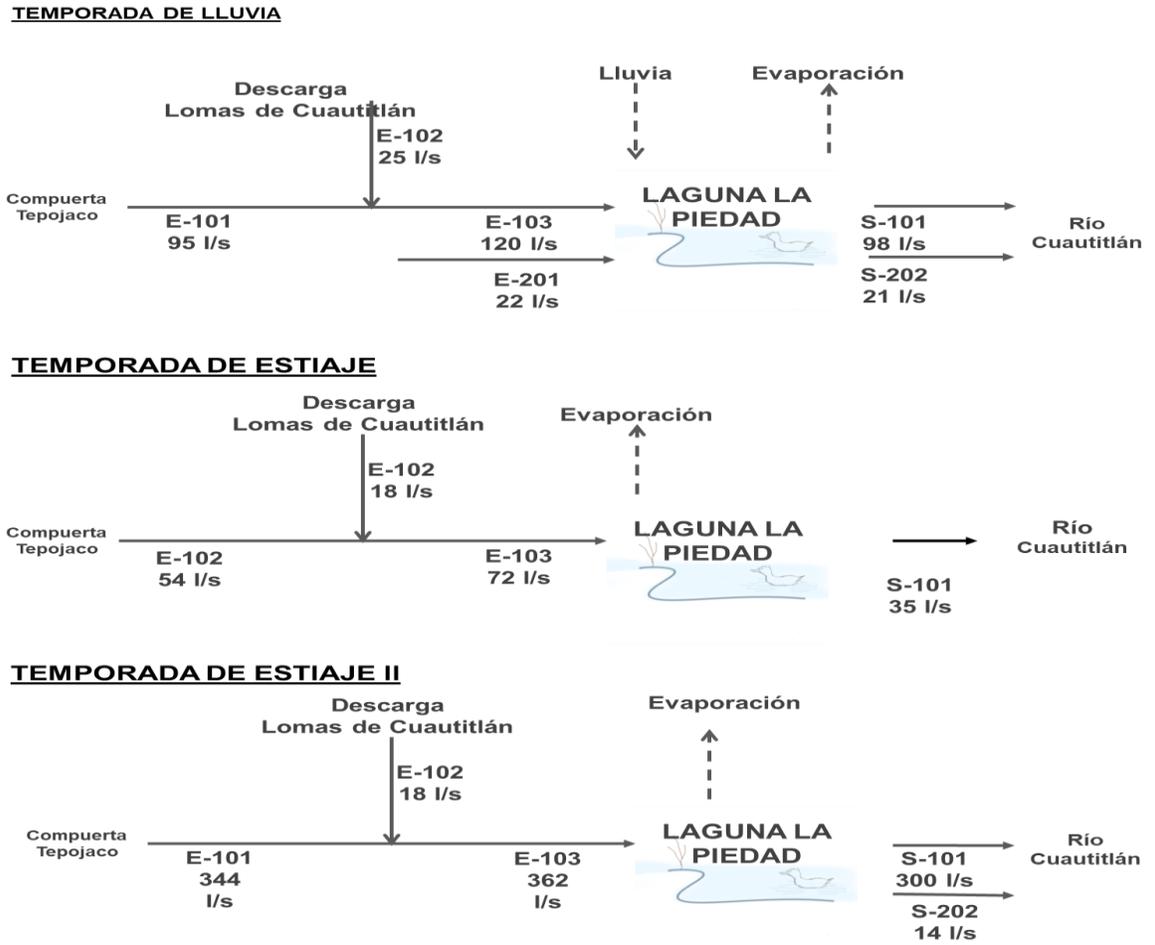


Figura 18. Balance hídrico laguna "La Piedad"

La *Figura 19* muestra los flujos de entrada registrados a lo largo del año 2020 por parte de las corrientes aportadas por la “Compuerta Tepojaco”, la “Descarga la Piedad” y la “descarga fluvial”.

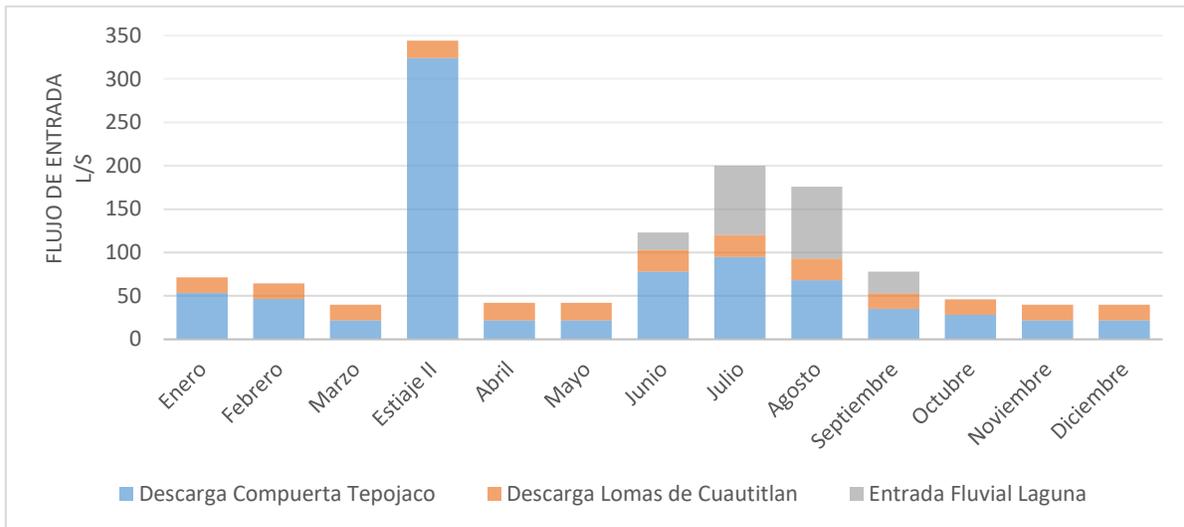


Figura 19. Flujos de entrada de agua de la Laguna La Piedad

Los valores mostrados la figura 20 fueron estimados a partir del promedio mensual de precipitación reportados por Estación Meteorológica San Martin Obispo.

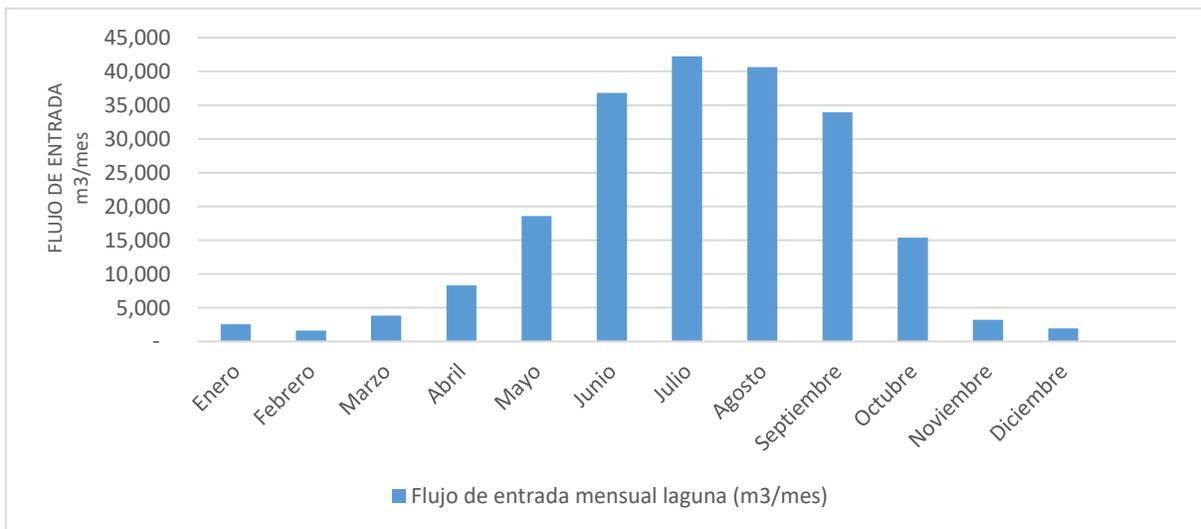


Figura 20. Flujos de entrada mensuales en la laguna con base precipitación promedio mensual

La Figura 21, muestra los valores de los flujos de la salida I y salida II registrados durante el periodo evaluado; el valor combinado de evaporación y acumulación debido a su relación con el volumen de la laguna se llevó a cabo una aproximación con base en la diferencia de los flujos de entrada y salida a la laguna .

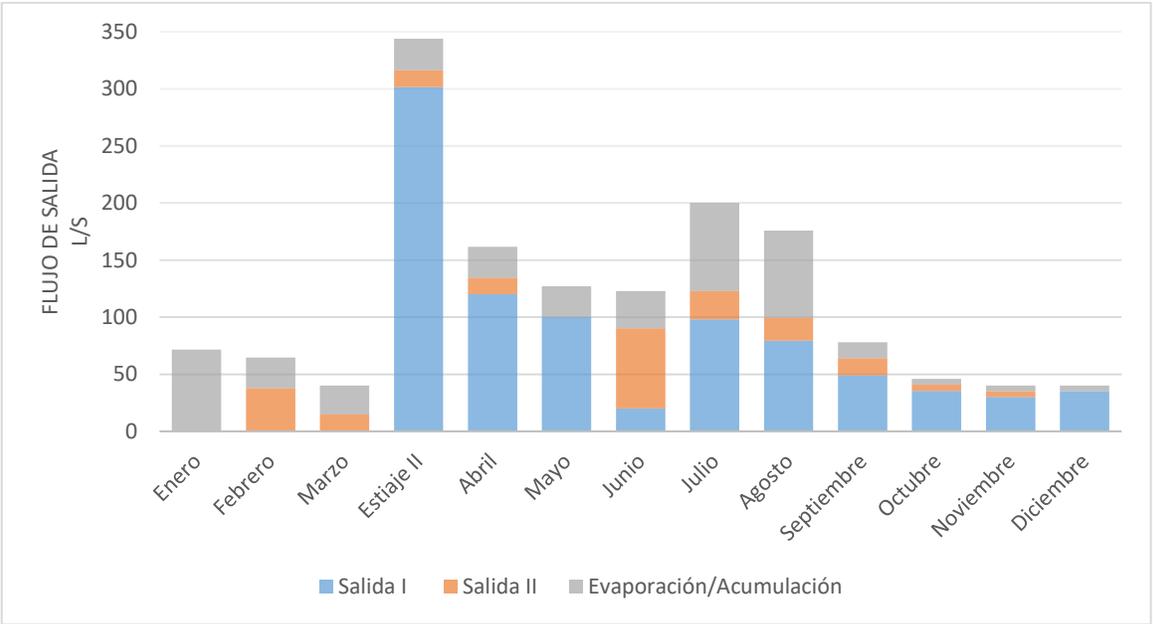


Figura 21. Flujos de salida de agua a la Laguna La Piedad

4.5 Propuestas para el de tratamiento de agua de laguna “La Piedad”

La laguna muestra un claro deterioro debido a las descargas residuales que recibe sin previo tratamiento. Las diversas PTARs en el área de estudio se encuentran fuera de servicio, ya sea por un abandono de su operación o por la falta de infraestructura.

4.5.1 Condición de las distintas PTARs y servicios complementarios en el área de estudio

En el área de estudio que se muestra en la Figura 22, se pueden observar la localización de las distintas PTAR construidas en el área de estudio. Se llevará a

cabo la construcción de un “colector marginal” para transportar parte de las descargas residuales para ser tratadas en la PTAR “Lago de Guadalupe”. Asimismo, en la Figura 22, se muestra una probable trayectoria que puede tener el colector. Los canales y ríos en el área de estudio permiten el agua tratada por la PTAR la Piedad II ser llevados a la laguna la Piedad.

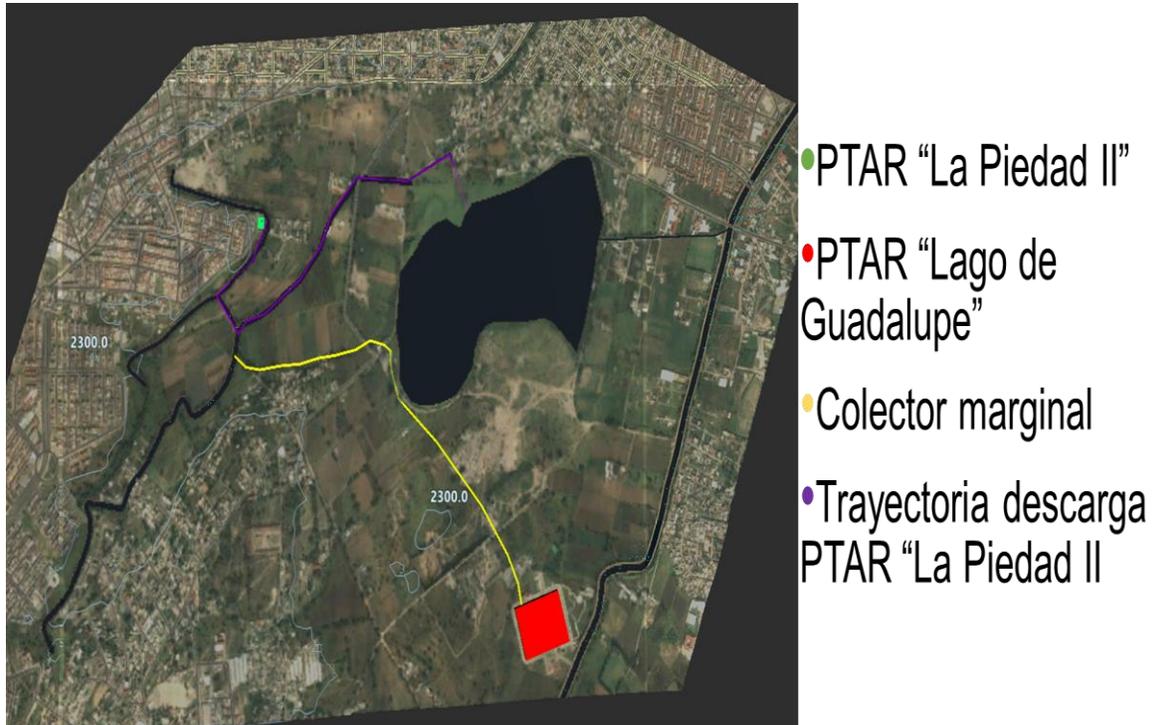


Figura 22 Sistemas de tratamiento de interés presentes en el área de estudio.

Como se puede observar en la Figura 23 la PTAR “La Piedad II”, no cuenta con el equipo necesario para operar, tales como aireadores para el reactor aerobio o bombas de cárcamo. Sin embargo, a diferencia de la PTAR Lomas de Cuautitlán (Figura 24), la instalación se encuentra resguarda y en mejor condición estructural. Por ello, se debe evaluar la rehabilitación de la PTAR “La Piedad II, como parte de una propuesta conceptual.



Figura 23. Condición actual PTAR La Piedad II Fuente: Propia



Figura 24. Condición actual PTAR Lomas de Cuautitlán. Fuente: Propia

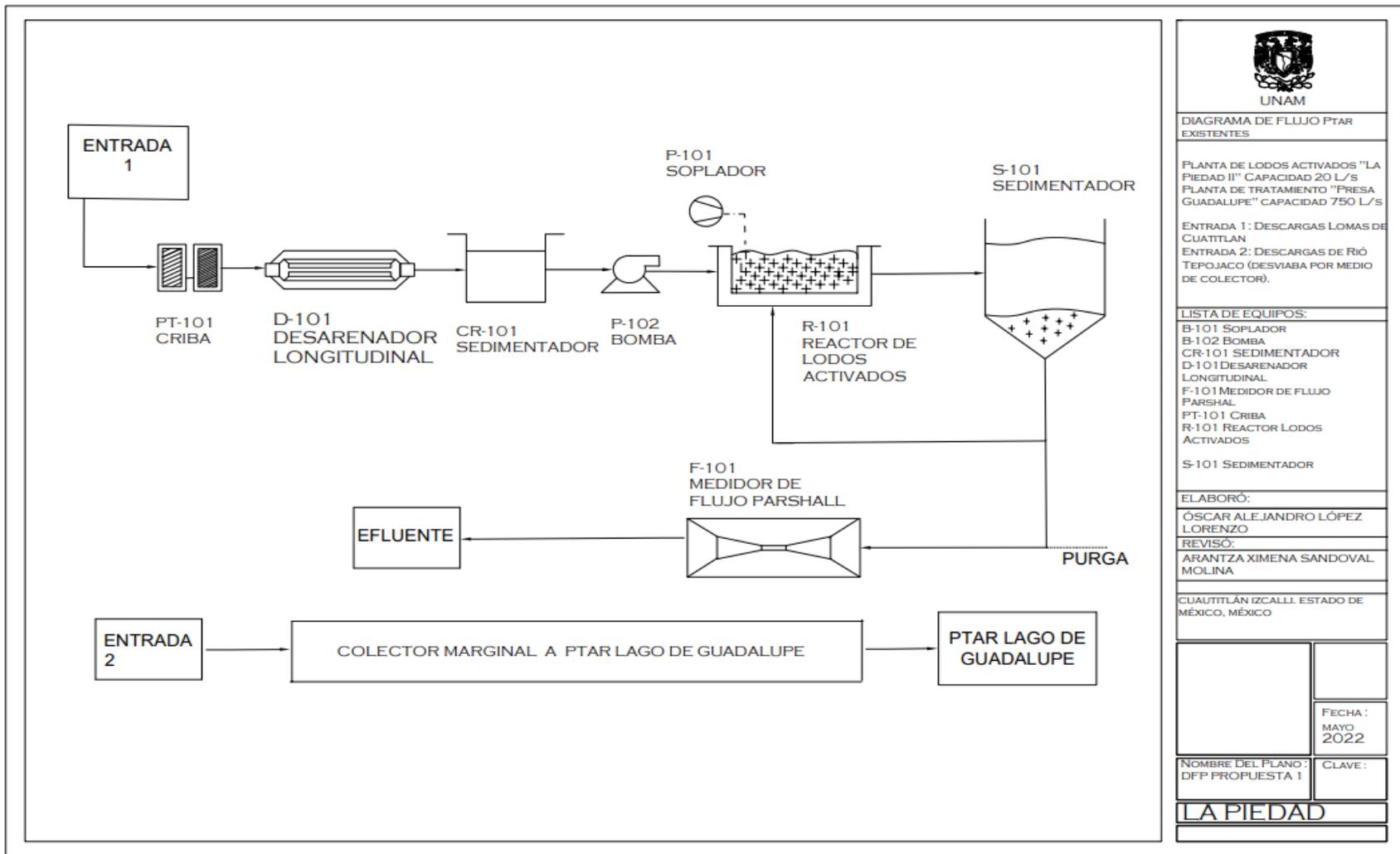
Para llevar a cabo la operación de la PTAR “La Piedad II” para el tratamiento de las descargas residuales provenientes de la descarga Lomas de Cuautitlán, es necesario realizar una rehabilitación integral de la infraestructura, lo cual constara

de adquirir equipos, reparar la infraestructura, capacitar personal operativo. El diagrama proceso se observa en la Figura 26. La PTAR “La Piedad II”, tiene el pretratamiento que consiste en un sistema de cribado y desarenador; un tratamiento primario mediante un sedimentador; seguido por un sistema de lodos activados aerobios. Los lodos biológicos de purga una vez secos son entregados para su manejo y disposición externa.

La PTAR Lago de Guadalupe, la cual pretende recibir las descargas residuales del río Tepojaco por medio de la construcción de un “colector sanitario marginal”. La PTAR Lago de Guadalupe fue diseñada para cumplir con la calidad de agua establecida en la NOM-003-SEMARNAT-1996 y el manejo de lodos, según lo establece la NOM-004-SEMARNAT-2002. Sin embargo, no se cuenta con información sobre su estado actual de operación. En la Figura 25, se muestra la PTAR Lago de Guadalupe.



Figura 25 PTAR Lago de Guadalupe



1.

Figura 26. Diagrama de Flujo de Proceso de la PTAR "La Piedad II"

4.5.2 Operación PTAR “La Piedad II”

Los valores de parámetros de calidad del agua que serán considerados para la alimentación de la PTAR la Piedad II, serán los valores reportados por la Subdirección de Plantas de Tratamiento. En la *Tabla 16*. se muestran los valores de parámetros de entrada a considerar como el agua residual doméstica proveniente de la salida de lomas de Cuautitlán. Los valores mostrados en ella son comparados con los valores máximos permitidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996 para uso en riego agrícola (B) para con el conocer el % de remoción requerido para cumplir con los límites máximos establecidos en ella.

Tabla 16. Valores de calidad de agua de entrada para la Propuesta 1.

Parámetro	Unidades	Entrada PTAR La piedad II	NOM-001- SEMARNAT-1996 Uso en Riego Agrícola (B)
DBO ₅	mg/L	344	75
SST	mg/L	292	75
NT	mg/L	62.16	40
PT	mg/L	10.8	20
Coliformes Totales	NMP/100mL	$\leq 2.4 \times 10^4$	$\leq 2 \times 10^3$

Basándose en los % de remoción de una planta de lodos activados descritos en la Tabla 12 para valores de diseños conceptuales las características del efluente al no contar con las características reales de diseño para la PTAR la Piedad II, al igual que la tabla anterior se compran con los límites máximos establecidos por la normativa.

Tabla 17. Valores de calidad del efluente de la PTAR La Piedad II.

Parámetro	Unidades	Efluente máximo PTAR La piedad II	Efluente mínimo PTAR La piedad II	NOM-001- SEMARNAT-1996 Uso en Riego Agrícola (B)
DBO ₅	mg/L	51.6	17.2	75
SST	mg/L	157.7	86.9	75
NT	mg/L	55.94	43.51	40
PT	mg/L	9.72	8.1	20
Coliformes Totales	NMP/100mL	7.2 x10 ³	1.2 x10 ³	≤2 x10 ³

La PTAR la Piedad II estaría tratando un volumen de 20 L/s o bien 1728 m³/día los cuales serían descargados en la laguna la Piedad. Por su parte el colector tendría una capacidad de llevar a tratamiento 262 L/s o 22637 m³/día, lo cual sería llevado a tratar en la PTAR lago de Guadalupe, para después ser descargados en el río Cuautitlán.

La PTAR “La Piedad II” ha presentado problemas para operar tanto en lo operativo como en lo económico, por lo que se evaluará el uso de humedales artificiales al ser una tecnología la cual presenta pocos costos operativos y una fácil operación en comparación con los sistemas de tratamiento convencionales. Por ello se propone evaluar las siguientes propuestas para el tratamiento de agua que entra en la laguna basados en humedales artificiales :

Propuesta I: Implementación de un humedal artificial.

Propuesta II: Operación conjunta de la PTAR “La Piedad” con un humedal artificial.

4.5.3 Propuesta I. Implementación de un humedal artificial

Esta propuesta, evalúa la construcción de un humedal artificial en el Área 1, localizada en el área limítrofe de la laguna la Piedad, para el tratamiento de agua residual con una capacidad de tratamiento de $432 \text{ m}^3/\text{día}$. En conjunto con la operación de la PTAR Lago de Guadalupe para tratar el agua proveniente del río Tepojaco.

El diagrama de flujo en la Figura 27, se muestra el proceso en el cual se trata el agua residual proveniente de la descarga lomas de Cuautitlán. El agua será tratada mediante un proceso de pretratamiento el cual consiste en un sistema de cribado, un desarenador longitudinal y un sedimentador primario.

Posteriormente, ingresará en el humedal artificial, el cual se puede observar en la Figura 28. El flujo se distribuirá en las 6 secciones del humedal artificial conformados por 4 módulos distribuidos en una forma hexagonal, donde se almacenará en “espejos de agua”, previo a su descarga a la laguna. De esta forma podrá ser aprovechada en actividades que le den un valor agregado al efluente.

El humedal artificial tiene un área total de $10,177 \text{ m}^2$ de los cuales: $7,742 \text{ m}^2$ son destinados a área de humedal, 993 m^2 el área de andadores de servicio y $1,442 \text{ m}^2$ en “espejos de agua”.

El área elegida para la localización del humedal artificial está localizada dentro del Área 1, mostrada en la Figura 14, ya que cumple con las características requeridas para la construcción de un humedal artificial.

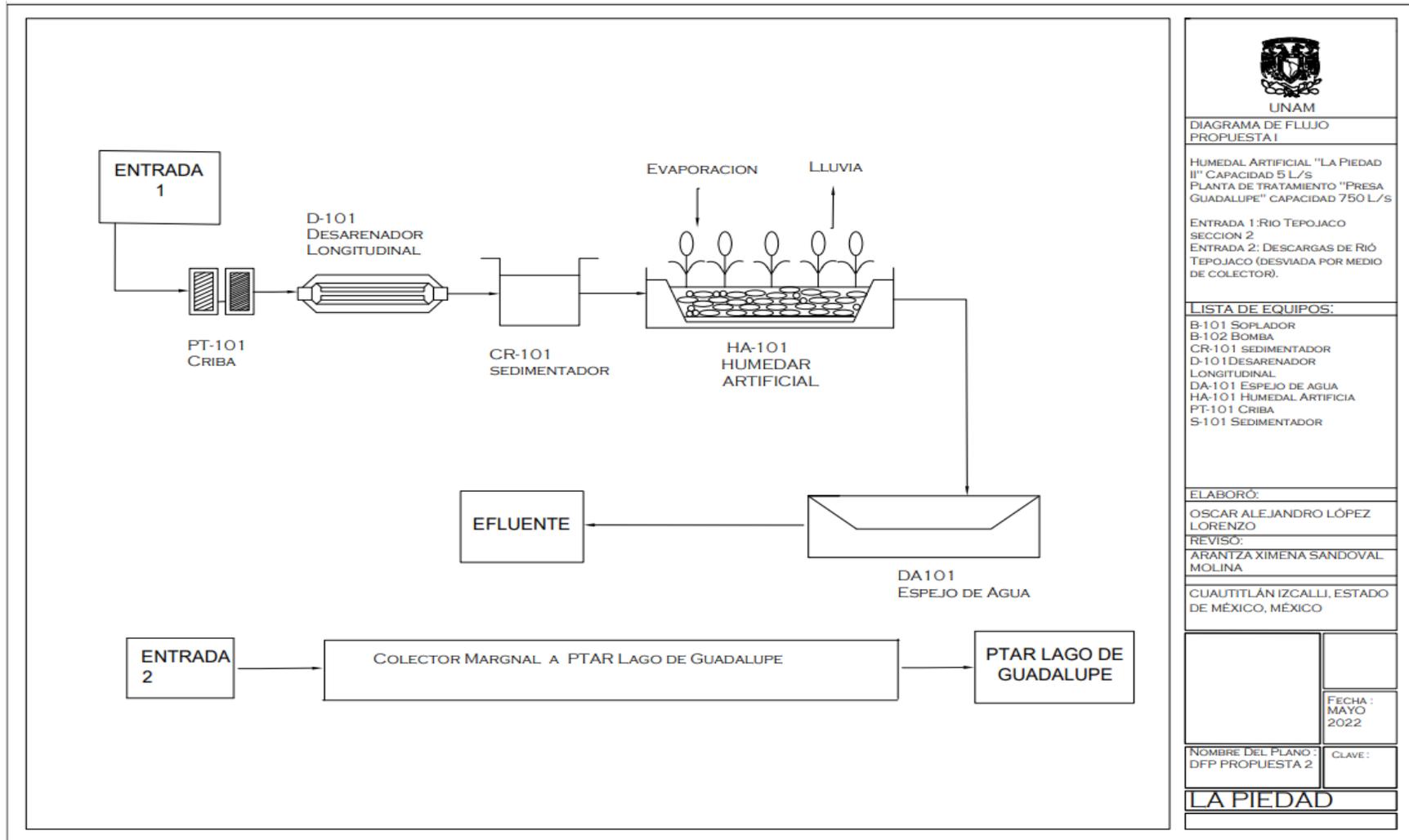


Figura 27. Diagrama de Flujo de Proceso de Propuesta 2.

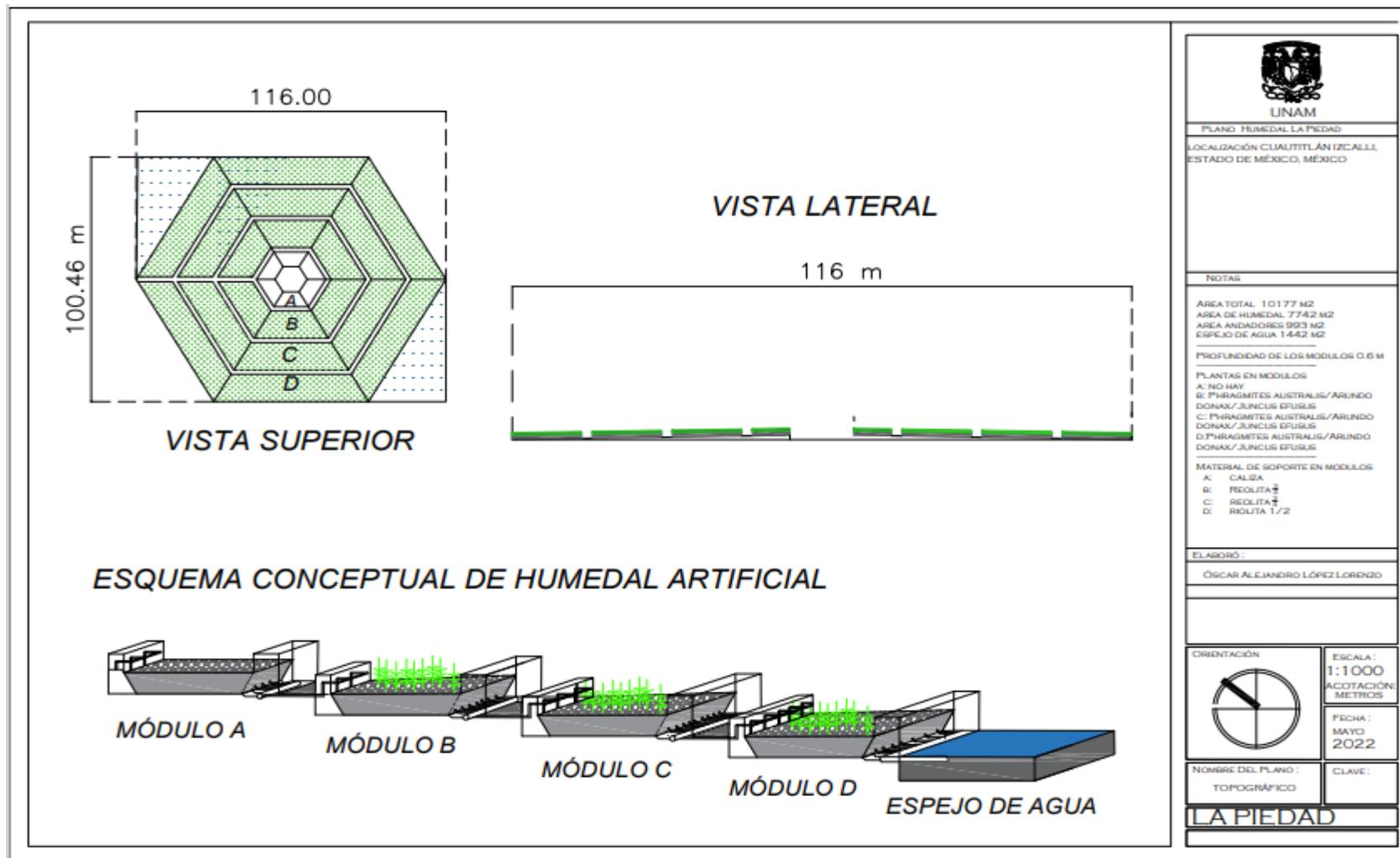


Figura 28. Diseño conceptual Humedal artificial en la Laguna la Piedad.

Los módulos mostrados en esquema conceptual de la *Figura 28*, corresponden a un humedal artificial híbrido, conformado por un acomodo de distintos tipos de humedal artificial, para mejorar el tratamiento de aguas residuales. En la Tabla 18, se muestra la relación de módulos, su descripción y área correspondiente.

Tabla 18. Características de módulos del humedal artificial.

Módulos	Descripción	Área (m ²)
A	Celda de caliza	58
B	Humedal artificial de flujo sub superficial Horizontal	242
C	Humedal artificial de flujo sub superficial Horizontal	411
D	Humedal artificial de flujo sub superficial Vertical	580

El material de soporte que contiene cada módulo se puede observar en la Tabla 19, considerando un arreglo horizontal para la distribución del mismo.

Tabla 19. Material de soporte en módulos del humedal artificial "La Piedad"

Módulos	Descripción de material de soporte
A	Caliza
B	Grava de 3/4 "
C	Grava de 3/4
D	Grava fina de 1/2

El componente vegetal está compuesto por tres especies de plantas vasculares depuradoras, las cuales son: *Phragmites australis*, *Arundo donax*, *Juncus effusus*. Los ejemplares de las mismas serán distribuidos en los distintos módulos de

acuerdo con lo mostrado en la Tabla 20, en la cual también se indica el número aproximado de plantas requeridas para cada sección del humedal artificial.

Tabla 20. Tipo, distribución y cantidad de ejemplares del componente vegetal presente en humedal artificial.

Módulo	Tipo de plantas	Número de plantas
A	NA	NA
B	<i>Phragmites australis</i> <i>Arundo donax</i> <i>Juncus effusus</i>	1452
C	<i>Phragmites australis</i> <i>Arundo donax</i> <i>Juncus effusus</i>	2466
D	<i>Phragmites australis</i> <i>Arundo donax</i> <i>Juncus effusus</i>	3479

De acuerdo con el tipo de humedal y el material de soporte elegido, el humedal artificial cuenta con un tiempo de residencia hidráulico de 2 días y 10 horas aproximadamente, como se observa en la Tabla 21.

Tabla 21. Tiempo de residencia hidráulico en los módulos del humedal artificial

Módulo	Tiempo de residencia hidráulico
A	5 horas 11 minutos
B	19 horas 22 minutos
C	32 horas 22 minutos
D	40 horas 41 minutos

Los intervalos de valores de los parámetros de entrada empleados para el humedal artificial, estarán en función de la operación del colector. Por ello, se

considerarán los valores de la descarga de Lomas de Cuautitlán y los reportados a la entrada a la laguna de “La Piedad”, indicados en la *Tabla 22*.

Tabla 22. Valores de calidad de agua de entrada para la Propuesta I.

Parámetro	Unidades	Descarga Lomas de Cuautitlán (IA)	Descarga Río Tepojaco (IB)	NOM-001-SEMARNAT-1996
DBO ₅	mg/L	344	89	75
SST	mg/L	292	90	75
NT	mg/L	62.2	67.5	40
PT	mg/L	10.8	11.5	20

Para esta propuesta los intervalos de los valores del efluente del humedal artificial, se encuentran indicados en la *Tabla 23*.

Tabla 23. Valores de calidad de agua del efluente de la Propuesta I.

Parámetro	Unidades	Valores mínimos (IA)	Valores máximos (IA)	Valores mínimos (IB)	Valores máximos (IB)	NOM-001-SEMARNAT-1996
DBO ₅	mg/L	103	76	26.7	23	75
SST	mg/L	58.4	66	18	45	75
NT	mg/L	37.3	28	40.5	29	40
PT	mg/L	8.6	6	9.2	7	20
Coliformes Totales	NMP/100 mL	<24	<24	<24	<24	<1000

2.

4.5.4 Propuesta II. Operación conjunta de humedal artificial y PTAR “La Piedad II”.

Esta propuesta, evalúa la operación conjunta donde el agua tratada de PTAR “La Piedad II”. El diagrama de proceso mostrado en la Figura 29, corresponde al sistema de tratamiento de esta propuesta. El tratamiento primario (criba y desarenador) y tratamiento secundario (lodos activados aerobios), se realizarán en la PTAR “La Piedad II”, el efluente de la PTAR será tratado en el humedal artificial donde se mejorará el efluente tendrá una mejor calidad de agua, Por último, ser almacenado en los espejos de agua, para su aprovechamiento en actividades de valor agregado.

Para esta propuesta se emplearon los valores de los parámetros de entrada y salida de agua de la PTAR “La Piedad II” indicados en las Tabla 16 y

Tabla 17, correspondientemente. Los valores aproximados de los parámetros a la salida de del humedal artificial son los indicados en la Tabla 24.

Tabla 24. Valores de calidad de agua del efluente de la Propuesta II

Parámetro	Unidades	Valores mínimos Humedal Artificial	Valores máximos de remoción Humedal Artificial “La Piedad”	NOM-001-SEMARNAT-1996 Uso en Riego Agrícola(B)
DBO ₅	mg/L	14	7	75
SST	mg/L	59	59	75
NT	mg/L	19	31	40
PT	mg/L	6	6	20
Coliformes Totales	NMP/100 mL	<24	<24	<1000

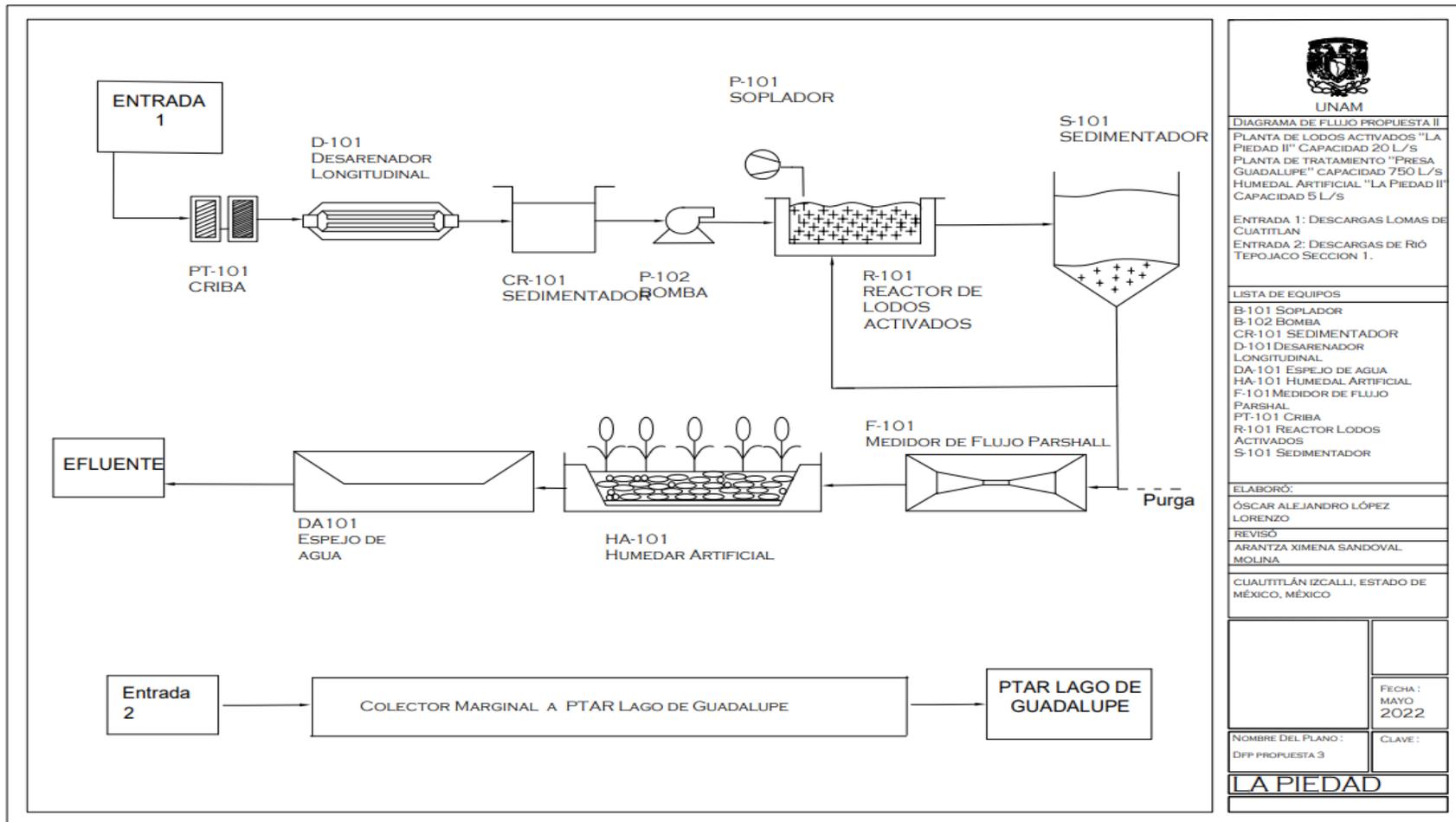


Figura 29. Diagrama de flujo de proceso para la Propuesta 3.

4.5.5 Costos de construcción de los sistemas de tratamiento

Los costos asociados para la rehabilitación de la PTAR “La Piedad II” se considerarán con base en el modelo de costos de inversión (Salas et al., 2007), para PTAR de lodos activados de acuerdo con el caudal a tratar. Los valores son los indicados en la Tabla 25, corresponden a una PTAR con una capacidad de 20 L/s.

Tabla 25. Costos de inversión para la PTAR "La Piedad"

Año	Costo de Inversión Mínimo (MXN)	Costo de Inversión Máximo (MXN)	Costo de Inversión Promedio (MXN)
2002	4,693,794	14,261,912	9,477,853
2022	10,209,647	31,021,619	20,615,633

Los costos relacionados con la construcción del humedal artificial para la propuesta 2, se pueden observar en la Tabla 26

Tabla 26. Costos inversión para construcción de humedal artificial

Concepto	Costo de inversión 2019 (MXN)	Costo de inversión 2022 (MXN)
Tratamiento primario	451,326	520,876
Obras exteriores (Acondicionamiento del terreno)	6,600,000	7,617,057
Construcción del humedal artificial	33,000,000	38,085,287
Total	40,051,326	46,223,220

El costo de inversión estimados para la propuesta 3, correspondientes a la construcción del humedal artificial y la rehabilitación de la PTAR, son los indicados en la *Tabla 27*.

Tabla 27. Costos de inversión para la Propuesta 3

Concepto	Costo de inversión 2022 (MXN)
PTAR	20,615,633
Obras exteriores	7,617,057
Construcción HA LA PIEDAD	38,085,287
Total	66,317,977

4.5.6 Costos de operación

En la Tabla 28, se puede observar una estimación de los costos de funcionamiento de la PTAR “La Piedad II”, tales como: Energía, insumos químicos, monitoreo de los procesos y calidad de agua, mano de obra para operación y mantenimiento, mantenimiento y reposición de los equipos, disposición de lodos.

Tabla 28. Costo de operación de PTAR "La piedad II"

Concepto	Valor 2022 (MXN)
Operación mensual mínima	89,757
Operación mensual máxima	156,100

*Calculado con base en los datos Salas et al. (2007)

Para el caso del humedal artificial, los costos de operación están relacionados al pago de personal que lleve a cabo tareas de mantenimiento, tal como la poda del

componente vegetal y eliminación de los lodos provenientes del tratamiento primario. Por ello, se considerará el pago de 3 personas con un salario de \$6000 (Seis mil pesos 00/100 MXN), para cumplir con estas tareas. Adicionado a esto, durante los primeros meses de operación del humedal, se deben de llevar a cabo estudios de calidad de agua mensuales. Con lo anterior los costos mensuales aproximados son los indicados en la Tabla 29.

Tabla 29. Coste de operación para el humedal artificial.

Concepto	Valor 2022 (MXN)
Operación mensual mínima	18,000
Operación mensual máxima	23,000

El costo relacionado con la operación simultanea analizado en la propuesta II de la PTAR “La Piedad” y el humedal artificial, son los mostrados en Tabla 30, estos costos se deben a las consideraciones previamente mencionados en los sistemas individualmente analizados.

Tabla 30 Costo de operación simultanea de PTAR "La Piedad" y humedal artificial

Concepto	VALOR 2022 (MXN)	
	Mínimo	Máximo
Operación PTAR “La Piedad II”	89,757	156,100
Operación humedal artificial	18,009	23,000
Total	107,766	179,100

4.5.7 Beneficios

El mejoramiento de la calidad de agua mediante los tratamientos propuestos, ayuda a la rehabilitación de la laguna La Piedad, lo cual lleva a una serie de beneficios tangibles e intangibles, brindando un beneficio a una población aproximada de 429,131 personas (INEGI ,2022 con base en datos de INEGI, 2015), considerando un área de influencia de 5 km como se puede observar en la Figura 30.

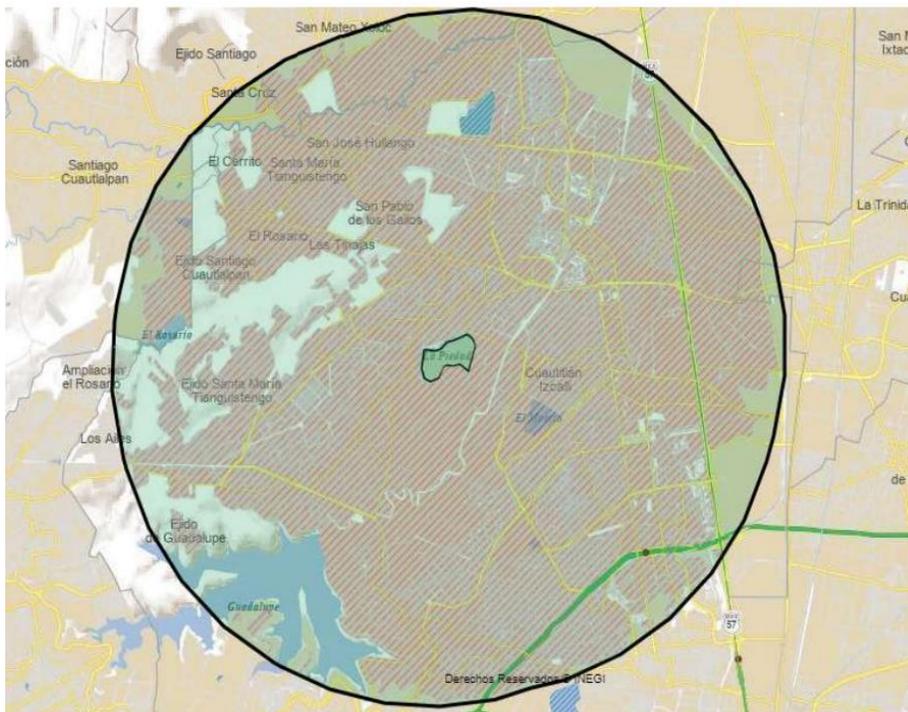


Figura 30. Área de influencia de las propuestas para el tratamiento de agua residual mediante un humedal artificial de la laguna La Piedad. Fuente: Mapa Digital de México, INEGI 2022.

El tratamiento del agua de la laguna La Piedad, puede traer consigo un beneficio económico, debido al desarrollo de actividades de recreación para el desarrollo del sector de turístico de la zona, tal como se puede observar en: el parque Espejo de Los Lirios (Cuautitlán Izcalli, Estado de México) y en Bosque San Juan de Aragón

(Gustavo A. Madero, Ciudad de México). Además del rehusó del agua proveniente para agricultura, que previamente se realizaba en la zona con agua sin previo tratamiento.

El tratamiento de aguas residuales de la laguna la Piedad, puede brindar una serie de beneficios a la salud de los habitantes de áreas aledañas (OMS, 2022), también reducir la mortalidad de especies que emigran debido al nivel de contaminación en el cuerpo de agua como ocurrió en 2019 (Velasco, 2019). El humedal artificial brinda un beneficio económico adicional debido a la venta de plantas de ornato de un valor agregado cultivadas en el humedal artificial (Zitácuaro et al., 2021). El agua proveniente del humedal artificial puede ser aprovechada en cultivos hidropónicos (Troche et al., 2021).

El humedal artificial brinda una serie de servicios ambientales como se puede ver en la Figura 31, tales como: brindar un hábitat para la vida silvestre (Zang et al., 2020), capturar carbono ambiental y aporte de oxígeno (Lu et al., 2018), aporta un atractivo turístico del valle (Delvalle et al., 2022) y funcionar como parte de la educación ambiental para la preservación de los humedales naturales.

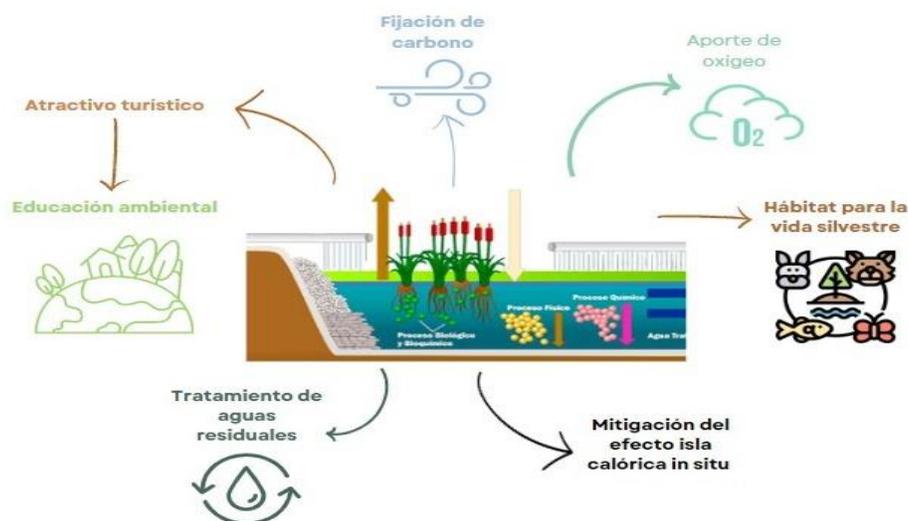


Figura 31 Servicios ambientales brindados por los humedales artificiales (Elaborado por Sareth Nuñez).

5. Análisis y discusión de resultados

De acuerdo, antecedentes históricos registrados en este trabajo, se muestra como la falta de acciones para el tratamiento del agua residual que se descarga en la laguna La Piedad, lo que ha llevado al deterioro de la calidad de agua, pérdida de flora y fauna nativa, así como ha llevado a ser un foco de infección. Por ello en este trabajo, realizaron una serie de evaluaciones del área de estudio, con el fin de conocer las condiciones de la laguna para evaluar la factibilidad técnica, económica y ambiental de la implementación de humedales artificiales para el tratamiento de agua residual de la laguna.

El estudio topográfico del área muestra un terreno con variaciones de alturas abruptas en el terreno. En especial áreas de la zona sur a la laguna debido a la existencia de áreas donde se llevó a cabo extracción de arena y que actualmente se encuentran en desuso. El diseño y construcción del “colector marginal”, cuya trayectoria será por la zona sur del área de estudio, deberá evitar el uso de equipos mecánicos para el desplazamiento del agua hacia la PTAR Lago de Guadalupe.

El área requerida para la construcción de los sistemas de tratamiento basados en humedales artificiales, aumentan en función de la calidad y el volumen de agua a tratar. Con base en el estudio topográfico del área de estudio, se identificaron dos áreas para la instalación de un humedal artificial. El Área 1, debido a sus características de terreno, disponibilidad y ubicación, fue el área seleccionada por este trabajo para llevar a cabo el diseño conceptual en el área de un humedal artificial para el tratamiento de agua de la laguna

Los estudios de calidad de agua, presentados en este trabajo muestran que los parámetros de calidad de agua reportados se encuentran por encima de los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996 para uso en riego agrícola (B).

Los diversos análisis de calidad de agua muestran un nivel que superan los límites máximos permisibles de la normativa aplicable en todas las corrientes de entrada, en los distintos puntos analizados en especial en los valores de parámetros de DBO₅.

Los parámetros de valores varían de acuerdo con el recorrido de las descargas, como se puede observar en el siguiente ejemplo: La descarga Tepojaco de acuerdo a los valores de DBO₅, que se encuentran entre 239 mg/L y 1554 mg/L dependiendo el estudio. Se observa que los valores a medida que la corriente avanza y los dos ríos se juntan, se presenta un efecto de abatimiento de la concentración, disminuyendo los valores de DBO₅ entre 114 mg/L y 239 mg/L, debido la corriente que proveniente de la compuerta Tepojaco con un valor de DBO₅ de 150 mg/L es la principal corriente de aporte de la descarga de agua entrada en la laguna, el resultando de la combinación de las corrientes es una concentración de descarga a la laguna de DBO₅ de 159 mg/L.

Los valores de Nitrógeno Total, Fosforo Total, Solidos Suspendidos Totales a la entrada de la laguna, se encuentran por encima de la normativa aplicable y pueden dar a origen a problemas de eutrofización, presentado un daño a la salud del ecosistema de la laguna (Conci et al., 2020).

Los parámetros de Coliformes Totales indicados en los estudios se encuentran en valores superiores a 2.4×10^4 , por lo que es posible debido a las concentraciones mostradas en los demás parámetros, indican que, para una calidad de agua similar, los valores de coliformes totales deberían de encontrar entre valores de $10^7 - 10^8$, para aguas urbanas medianamente contaminadas (Metcalf & Eddy, 2001).

La contaminación de la laguna la Piedad se deben en gran medida a falta de una solución integral para el tratamiento de las descargas que llevan a la laguna. Por

ello para este documento, se buscó proponer opciones para el tratamiento del agua de la laguna, de forma que las distintas tecnologías disponibles y con posibilidad de instalarse interactúen para la resolución de la problemática relacionada con las aguas residuales por medio de una solución integral.

El balance hídrico presentado en este documento fue elaborado con base en la información de los flujos registrados en el periodo de observación y datos recopilados de fuentes secundarias en el caso de la evaporación y precipitación. Con base en la naturaleza de las distintas entradas, se llevó a cabo una clasificación en tres distintas temporadas, donde se observa un comportamiento similar en sus flujos de entrada y salida.

Los valores de entrada de la laguna reportados en las distintas temporadas propuestas (lluvias, estiaje y estiaje II), los aportes por precipitaciones y la compuerta Tepojaco en la época de lluvias, son los principales contribuyentes al volumen total de la laguna en sus respectivas épocas. En la temporada de estiaje II, se presenta el mayor flujo de entrada a la laguna por medio del río Tepojaco, debido a la apertura total de la compuerta para el riego de parcelas, teniendo un efecto en el volumen almacenado de la laguna.

“

Los flujos reportados en la corriente de entrada de “descarga de Lomas de Cuautitlán”, esto se puede deber a que parte del flujo de la descarga se almacene en la sección del ex canal de la aurora entre la PTAR la Piedad y la PTAR Lomas de Cuautitlán. La “descarga fluvial” se presenta en la época de lluvia, principalmente como desfogue de las líneas de drenaje de la zona norte de la laguna, por lo que el flujo reportado puede aumentar o disminuir en función de la lluvia en la zona.

Los flujos de entrada por efecto de las precipitaciones consideradas para este trabajo se realizó una aproximación con base en los valores reportados por la estación meteorológica. Los meses de julio y septiembre corresponden a los

meses con mayores valores de precipitación. En la temporada de lluvias la precipitación se presenta como el principal volumen de entrada en la laguna, pero esta no es una entrada continua.

La salida del agua de la laguna se realiza por medio de dos canales de riego (descarga I y descarga II), la descarga I, está regulada por una compuerta la cual desvía la salida de agua a la descarga II para el riego de parcelas ubicadas en la zona este del área de estudio. Durante el periodo evaluado, se observó como el efecto del nivel de agua en la laguna afecta los flujos de la salida de agua en las canales de descarga, como se observa en los datos recopilados durante la temporada de estiaje II, donde se observa el flujo de salida en la descarga I que rebasa los 300 L/s.

Una problemática asociada al deterioro de la calidad de agua de las descargas en la laguna, es debido a la condición de las plantas de tratamiento, que, debido a los altos costos de operación, manteniendo y requerimiento de personal capacitado para su operación, han llevado a que estas no se encuentren en funcionamiento. Por ello, las propuestas II y III, consideran la construcción de un Humedal artificial, como una solución sostenible para el tratamiento de las descargas residuales en la laguna-

En las distintas propuestas se considera el uso del colector marginal que lleve agua residual de las descargas a la PTAR Lago de Guadalupe, esto se debe a que actualmente es la única medida que se está llevando a cabo por parte de dar solución a las descargas de la laguna La Piedad, por ello aunque se desconoce el recorrido, el punto donde se desviaron las descargas residuales, se tomaron en cuenta propuestas conceptuales del proyecto para considerar aspectos relacionados con las propuestas conceptuales expuestas en este trabajo.

En la Tabla 31, se presenta el resumen general de las propuestas en este documento, a partir de los valores de los parámetros de calidad de agua, costo de construcción, operación y costo de tratamiento por m³ de agua a tratar.

Tabla 31. Resumen general de las distintas propuestas

NOMBRE	Operación PTAR SOLA	PROPUESTA I A Y B	PROPUESTA II
INFRAESTRUCTURA INVOLUCRADA	-PTAR La Piedad II	-H.A. "La Piedad" -Colector Marginal -PTAR Lago de Guadalupe-	PTAR La Piedad II - H. A. La Piedad -Colector Marginal -PTAR Lago de Guadalupe
Flujo L/s	18	5	PTAR:13 Humedal: 5
Costos			
COSTO DE INVERSION (MXN)	\$20,615,633	\$46,223,220	\$66,317,977
COSTO OPERACIÓN ANUAL	\$1,475,142	\$246,000	\$1,721,142
COSTO (MXN/m ³)	\$ 2.01	\$ 1.37	\$ 3.38

Parámetros de calidad de agua de salida				
NOMBRE	Operación PTAR SOLA	Propuesta I A	Propuesta I B	Propuesta II
Nombre de la corriente de entrada	Lomas de Cuautitlán (DII)	Descarga II	Entrada la Piedad	Lomas de Cuautitlán Salida PTAR
DBO5(mg/L)	34	76	26.7	10
SST (mg/L)	122	66	18	59
NT (mg/L)	50	28	40.5	25
PT (mg/L)	9	6	9.2	6
Coliformes Totales (NMP/100 mL)	4.2x10 ³	<24	<24	<24

5.1 Evaluación de factibilidad técnica

Las distintas opciones de tratamiento basadas en la construcción y operación de un humedal artificial analizadas en este trabajo, muestran que en términos generales que los humedales artificiales presentan una ventaja técnica para llevar a cabo el tratamiento del volumen de entrada en la laguna en comparación con los sistemas previamente utilizados para el tratamiento de las descargas .

Debido a la futura construcción del colector marginal, las propuestas I A y I B fueron llevadas a cabo a partir de los distintos escenarios que pueda generar la construcción del colector para desviar una parte de las descargas en la laguna la piedad para ser tratadas en la PTAR Lago de Guadalupe. Por su parte la propuesta II, que contempla la operación simultanea del humedal artificial Y la PTAR la piedad II.

Las distintas propuestas analizadas de operación de un humedal artificial (I A, I B, II) muestran que cumplen con los requisitos de remoción establecidos por la normativa aplicable. La propuesta I B, muestra menores niveles de contaminantes presentes a la salida del humedal artificial en comparación con la propuesta I A. La propuesta I A considera tratar el agua con los parámetros de calidad reportados en la “descarga Tepojaco” los cuales son mayores en comparación con los considerados en la propuesta I B los cuales corresponden a los reportados en “Entrada la Piedad”.

La propuesta II presenta los menores niveles de contaminantes presentes en la descarga, esto debido a que los sistemas de tratamiento basados en humedales artificiales que operan en conjunto con plantas de tratamiento de lodos activados, operan principalmente para disminuir parámetros los cuales no pueden ser disminuidos de forma eficiente por los lodos activados.

Los humedales artificiales presentan mayor facilidad a la hora de operarlos y brindarles mantenimiento, así como la capacitación necesaria del personal para

llevar a cabo tales funciones. Lo cual presenta una ventaja en comparación con la operación de las PTAR anteriores, ya que la falta de mantenimiento y la dificultad para operarlos se presentó como una de las principales causas para abandonar la operación de los sistemas previamente construidos.

Los procesos de tratamiento de lodos activados generan lodos residuales, que de acuerdo con la operación previa que tuvo la PTAR se menciona que no se llevaba a cabo un correcto tratamiento de los mismos, almacenándolos en el cauce del ex canal de la Aurora. Con ello las propuestas al basar su tratamiento en los humedales artificiales, presentan una ventaja al no producen lodos, salvo por el pretratamiento.

El diseño conceptual del humedal artificial propuesto permite dividir el volumen a tratar en 6 secciones por medio de un vertedor, que en comparación con un diseño tradicional (rectangular), la distancia final considerando la inclinación necesaria para el flujo del agua (1%) es inferior lo presenta una ventaja al momento de la adaptación del terreno para la construcción y permite mejorar el control del agua buscando favores el régimen laminar en cada módulo.

El diseño conceptual permite a través de los distintos módulos llevar a cabo la reducción de los distintos contaminantes presentes en el agua residual, de forma que el tiempo de residencia hidráulico se modula, de acuerdo al material de soporte que se encuentra en cada sección. El tamaño del material de soporte permite aumentar el tiempo de residencia al reducir su tamaño de partícula debido al aumento de su conductividad hidráulica, por ello el material de soporte en cada sección fue elegido con base en la Ley de Darcy ya que cada sección tiene distintos requerimientos de conductividad hidráulica (aumentado conforme el incremento de la sección transversal).

La capacidad de tratamiento de las distintas tecnologías muestra que la PTAR La Piedad cuenta con una capacidad instalada mayor de 18 L/s en comparación con

el Humedal artificial 5 L/s, esto debido al área requerida por parte del Humedal artificial para tratar estas concentraciones de contaminantes en las aguas residuales se vuelve su mayor limitante a la hora de buscar ampliar la capacidad de tratamiento, aunque en el caso de la Propuesta I B y II, se puede llevar a cabo la modificación del tiempo de retención hidráulico lo que brindaría un incremento del volumen que fluye en el Humedal artificial al haber menor cantidad de los distintos contaminantes en el agua residual considerados a la entrada.

5.2 Evaluación de factibilidad económica

Los costos de construcción para el caso de las propuestas IA Y IB que contemplan únicamente la construcción del humedal artificial son mayores a los relacionados con la rehabilitación de la PTAR la Piedad de acuerdo a la estimación realizada.

Los costos anuales de operación son mucho menores en el caso de la operación del humedal artificial a los requeridos para operar la PTAR. Por ello la propuesta II que considera la operación simultánea de los dos, es la que presenta los mayores costos tanto de construcción y operación de las distintas propuestas. Los humedales artificiales brindan una serie de beneficios tangibles e intangibles al área adyacente por lo que costos de operación pueden disminuir en función del aprovechamiento de los productos generados por el humedal (venta de plantas de ornato, aprovechamiento del agua tratada).

Los costos de construcción/rehabilitación de las propuestas analizadas muestran que la construcción de un humedal artificial es mayor al de la rehabilitación de la PTAR La Piedad. El costo del humedal artificial es de cuarenta y seis millones doscientos veintitrés mil doscientos veinte pesos (\$46,223,220). Mientras que el costo de rehabilitación de la PTAR la Piedad II, es de veinte millones seiscientos quince mil seiscientos treinta y tres pesos (\$20,615,633). En consecuencia, el costo total para llevar a cabo la implementación de la propuesta II es de Sesenta y

seis millones trescientos diecisiete mil novecientos setenta y siete pesos (\$66,317,977).

Los costos de tratamiento x m³ son menores en el caso del Humedal artificial es de un peso con treinta y siete centavos (\$ 1.37) para el caso de las propuestas I A y II B. En comparación con los de la propuesta II, la cual tiene un costo asociado de la operación de la PTAR la piedad de dos pesos con 1 centavo (\$ 2.01). El costo combinado de operación es de tres pesos con treinta y ocho centavos (\$ 3.38). Sin embargo, la mayor diferencia en el costo de operación se ve reflejado en los costos anuales siendo el caso de la operación de la PTAR La Piedad de un millón cuatrocientos setenta y cinco mil ciento cuarenta y dos pesos (\$1,475,142), en comparación con los costos de doscientos cuarenta y seis mil pesos (\$246,000) requeridos anualmente para la operación del humedal artificial.

Lo anterior, se debe principalmente a los costos relacionados con la operación de la PTAR, los cuales son en su mayoría debido al costo por consumo de energía y de pago de personal especializado. Es precisamente en estos rubros den donde los humedales artificiales presentan ventaja al no requerir energía eléctrica para operar y no personal especializado, sino únicamente personal capacitado con conocimiento general del mantenimiento en jardinería (poda del componente vegetal principalmente) lo que disminuye el costo por estos conceptos de manera significativa.

Las propuestas analizadas muestran un impacto indirecto de una población de 429,131 personas. Sin embargo, el impacto directo del tratamiento de agua de la laguna, se presenta en las colonias aledañas a la laguna, donde esto resultaría no sólo la mejora de la calidad de la laguna, si no en el desarrollo de actividades económicas para brindar distintos servicios turísticos en la zona. En este último aspecto, la población ha mostrado su interés para la creación de las mismas.

Es importante mencionar que el humedal artificial brinda beneficios económicos

por la venta de plantas de ornato tal como el Alcatraz (*Zantedeschia aethiopica*) o Anturio (*Anturium* spp.). No obstante, para esta propuesta conceptual no se consideró ese tipo de beneficio debido a que estas plantas de ornato deben de ser elegidas con base en estudios que demuestren que no afecten la flora y fauna local. La presencia de las mismas podría llegar a ser entre el 10% y 30 % del total de las plantas consideradas. De manera complementaria, la reutilización del agua residual tratada del humedal (en especial en el caso de la propuesta II), puede permitir la cosecha de vegetales por medio de hidroponía, lo que permitiría buscar cultivos de mayor valor agregado, como el jitomate y la lechuga, en comparación con los que tradicionalmente se plantan en la zona de estudio (alfalfa, avena).

5.3 Evaluación de factibilidad ambiental

Los parámetros de resultados las propuestas de tratamiento basadas en humedales artificiales cumplen con lo establecido por la NOM-001-SEMARNAT-1996, para el uso en embalses naturales y artificiales de tipo B, dado que el uso que se da al agua de la laguna principalmente corresponde al riego de las distintas áreas agrícolas.

La propuesta II, presenta una mayor remoción de los parámetros evaluados a la salida debido a la integración del tratamiento de la PTAR La piedad con el humedal artificial. En esta propuesta, se puede observar que el humedal artificial mejora la calidad de agua de la PTAR, disminuyendo los contaminantes, principalmente aquellos que el tratamiento de lodos activados no puede conseguir (NT, SST, PT). A diferencia de la operación individual de la PTAR, cuyos valores a la salida no cumplen con lo establecido en la normativa aplicable.

Las propuestas I A y II muestran una mayor disminución de los parámetros de nitrógeno total y fósforo total de 28 mg/L y 25 mg/L, respectivamente en el caso del nitrógeno total y 6 mg/L en ambos casos para el fósforo total. Es importante disminuir los parámetros anteriormente mencionados debido a que están

estrechamente relacionados con el fenómeno de eutrofización o enverdecimiento del agua, lo cual debe prevenirse para con ello contribuir a la recuperación integral de la calidad del agua de laguna la Piedad.

El parámetro de DBO, en las distintas corrientes de entrada en las aguas residuales, que se descargan en la laguna, es el parámetro que requiere mayor remoción, en comparación con los otros parámetros evaluados. AL respecto, las propuestas conceptuales I A, I B y II basadas en un humedal artificial, son capaces de disminuir dicho parámetro a valores que cumplan con los límites máximos establecidos en la normativa aplicable. Lo anterior especialmente en la propuesta II, ya que es donde arroja una mejor disminución del mismo.

La NOM-001-SEMARNAT-1996 establece que límite máximo permitido de coliformes totales y fecales vertidos en las descargas residuales es de 2000 NMP por cada 100 mL, por lo que las propuestas conceptuales consideraron, de acuerdo a la bibliografía, que el efecto de la disminución del parámetro de coliformes totales en un tratamiento de humedales artificiales, es en una disminución de tres órdenes de magnitud, por lo que a partir del valor de entrada reportada las propuestas, estaría en condiciones de cumplir con el valor establecido en la norma.

Es importante mencionar que la implementación de un humedal artificial, cumple con los usos de suelo del área elegida para su construcción (Recreación y Turismo). Además, el diseño propuesto en este trabajo, contribuiría al aspecto turístico tanto por el propio sistema, como por los subproductos derivados del mismo, como son, aguas tratadas de buena calidad, posibles cultivos de vegetales y peces de interés comercial, el regreso de aves migratorias, entre otros, lo cual puede ser pieza clave de un futuro desarrollo de un área de recreación en el área limítrofe de la laguna La Piedad.

Los humedales artificiales, como se explicó en este trabajo, brindan una serie de servicios ambientales los cuales favorecen a la fauna de la laguna y permitiendo, además, volverse un sitio atractivo para especies observadas en los distintos cuerpos de agua de Cuautitlán Izcalli como por ejemplo el Pelicano Americano (*Pelecanus erythrorhynchos*) o el pato mexicano (*Anas diazi*) y el aumento de la diversidad aves en la laguna; fijación de carbono y aportar un espacio donde la interacción con el sistema de tratamiento ayuda en el desarrollo y enseñanza de una educación ambiental de los visitantes.

6. Conclusiones

Este trabajo evidencia que es técnica, económica y ambientalmente posible mejorar la calidad del agua de la laguna La Piedad mediante el tratamiento aguas residuales mediante la implementación un humedal artificial.

El área de estudio definida cuenta con múltiples variaciones de altura. El área 1 localizada en la parte suroeste de la laguna es un área en la cual es posible construir un humedal artificial. Las principales variables en los flujos de entrada son los aportes fluviales y la apertura de la compuerta Tepojaco. Los flujos de salida en la laguna varían en función de la temporada (lluvias o secas) en la que se encuentre. Los valores de calidad del agua superan los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad aplicable. La principal problemática observada en las PTARs existentes son los relacionados con su estado actual (abandono). No están en operación y no cuentan con mantenimiento por falta de presupuesto.

Para mejorar la calidad del agua de la laguna La Piedad, se hicieron 2 propuestas: La Propuesta I: implementar un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales. Propuesta II: Operación en conjunto de la PTAR “La Piedad II” y un

humedal artificial. Desde el punto de vista técnico, es la propuesta II la que permite obtener una mayor remoción de contaminantes: No obstante, que resulta ser la de mayor inversión para llevar a cabo su implementación y construcción. Por lo que de acuerdo con la problemática observada con la operación de las PTARs anteriormente instaladas, la Propuesta I resulta ser la indicada para solucionar la problemática asociada a los costos de operación, mantenimiento y generación de residuos productos del tratamiento

La implementación de un humedal artificial brinda servicios ambientales como fijación de bióxido de carbono y aporte de oxígeno, así como aumento de biodiversidad de aves (aves migratorias) que en conjunto contribuirían a promover el incremento de turismo, con los consecuentes beneficios económicos, aunado a aumentar la conciencia de los visitantes sobre el tratamiento y cuidado del agua.

7. Referencias

- Amábilis Sosa, L. E. (2010). *Análisis del patrón de flujo en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial. Tesis de Maestría en Ingeniería (Ambiental)*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Anda-Sánchez, J. (2017). Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México. *Sociedad y Ambiente*, 14:119-143.
- Arteaga-Cortez, V. M., Quevedo-Nolasco, A., Valle-Paniagua, D. H., Castro-Popoca, M., Bravo-Vinaja, Á., & Ramírez-Zierold, J. A. (2019). Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(5): 319-343.
- Asprilla, W. J., Ramírez, J. S., & Rodríguez, D. C. (2020). "Humedales artificiales de flujo subsuperficial: comparación de metodologías de diseño para el cálculo del área superficial basado en la remoción de materia orgánica. *Ingenierías USBMed*, 11(2): 65-73.
- Bolio-Ortíz, H. J. (2013). El concepto de Desarrollo en la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. *Hechos y Derechos*, 14.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (202). *Ley de Aguas Nacionales*. México: Diario Oficial de la Federación.

Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua ,CENTA. (2016). Manual de Depuración de Aguas Residuales Urbanas. Monográficos Agua en Centroamérica. Ideasamares.

Comision Nacional del Agua, CONAGUA. (2017). *Informacion Climatológica San Martín Obispo*. Obtenido de Normales Climatológicas por Estado: <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=mex>

Comision Nacional del Agua, CONAGUA. (04 de Diciembre de 2017). *Inventario de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) (2016)*. Obtenido de AGUA.ORG.MX: <https://agua.org.mx/biblioteca/catalogo-plantas-tratamiento-aguas-residuales-ptar-2016/>

Comision Nacional del Agua, CONAGUA. (2019). *Estadísticas del Agua en México*. México.

CONEVAL. (2019). *DIA MUNDIAL DEL AGUA*. México.

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. (2021). México. Disponible para consulta en <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/CPEUM.pdf>

de la Peña, M., Ducci, J., & Z., P. V. (2013). *Tratamiento de aguas residuales en México*. México: Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

Delvalle-Borrero, D. M. (2022). Humedales artificiales flotantes y su valor paisajisto en ríos urbanos-Ciudad de Panamá. *Prisma Tecnológico*, 13(1), 3-9.

- DGIAR. (2015). *Manual N°5 Medición de agua*. Lima: Ministerio de Agricultura y Riego.
- Gamalio-Chaine, P. (2021). Construcción de escenarios viables para la gestión eficiente del agua potable en Tecámac, un municipio conurbado de la zona metropolitana de la Ciudad de México (2001-2022). *Impluvium, Publicación Digital de la Red de Agua UNAM*, 33-42.
- García, J., L., R. D., Morató, J., Lesage, E., Matamoros, V., . . . M., J. (2010). *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 40: 561-661.
- Gobierno de Cuautitlán Izcalli, Estado de México. (2019). *Plan de Desarrollo Municipal 2019-2021 Cuautitlán Izcalli*. Cuautitlán Izcalli.
- Gobierno de Estado de México. (2003). *Declaratoria del Ejecutivo del Estado por el que se establece el ANP con la categoría de Parque Estatal denominado "Parque Estatal para la Protección y Fomento del Santuario del Agua Laguna de Zumpango"*. Decreto Gubernamental. Estado de México.
- González-Alvarado, J. (2013). *Evaluación de impactos y externalidades ambientales causados por un humedal artificial en un área natural protegida. Tesis de Maestría en Ingeniería*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hoffmann, H., Platzer, C., Winker, Martina, & von Muench, E. (2011). *Revisión Técnica de Humedales Artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas*. Alemania: Agencia de Cooperación de Alemania, GIZ, Programa de Saneamiento Sostenible ECOSAN.

- INEGI. (2015). *Encuesta Intercensal*. Obtenido de <https://coespo.edomex.gob.mx/>
- INEGI. (2020). Obtenido de Censo de población y vivienda: www.inegi.org.mx
- INEGI. (2022). *Índice Nacional de Precios al Consumidor (INPC)*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/temas/inpc/>
- INEGI. (2022). *Mapa Digital de México*. Obtenido de <http://gaia.inegi.org.mx/>
- Instituto Nacional De Salud Pública, México , INSP. (19 de MARZO de 2021). *#Water2me*. Obtenido de [insp.mx: https://www.insp.mx/avisos/water2me](https://www.insp.mx/avisos/water2me)
- Ji, Z., Tang, W., Pei, & Y. (2022). Constructed wetland substrates: A review on development, function mechanisms, and application in contaminants removal. *Chemosphere*, 286: 131564.
- Kataki, S., Chatterjee, S. V., Dwivedi, S. K., & Gupta, D. K. (2021). Constructed wetland, an eco-technology for wastewater treatment: A review on types of wastewater treated and components of the technology (macrophyte, biofilm and substrate). *Journal of environmental Management*, 283: 111986.
- Lu, L., Guest, J., Peters, C., Zhu, X., & Rau, G. &. (2018). Wastewater treatment for carbon capture and utilization. *Nature Sustainability*, 1, 750–758.
- Luna-Pabello, V. M., & Aburto-Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. *TIP*, 17(1), 32-55.
- Luna-Pabello, V. M., & Morales Ferrero, I. (2018). Depuración con humedales artificiales en ciudades. *H2O Gestión del agua*(19), 34-40.

- Martínez Macedo, J. (2017). *Factores socioeconómicos y ambientales relacionados con el tratamiento de agua residual a través de la implementación de humedales artificiales acoplados a un sistema de lodos activados. Tesis de Maestría en Ciencias de la Sostenibilidad.* México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mena-Sanz, J., Rodríguez-Mayor, L., Nuñez-Martín, J., Camacho, V., & J. (2009). *Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos.* España: Congreso Nacional del Medio Ambiente.
- Méndez-Mendoza, A., Bello-Mendoza, R., Herrera-López, D., Mejía-González, G., & Calixto-Romo, A. (2015). wetlands A. Performance of constructed with ornamental plants in the treatment of domestic wastewater under the tropical climate of South Mexico. *Water Pract. Technol*, 10: 110-123.
- Meng, P., Pei, H, Hu, W., Shao, Y., & Li, Z. (2014). How to increase microbial degradation in constructed wetlands: Influencing factors and improvement measures. *Bioresource Technology*, 157: 316-326.
- Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse. 4 edition.* New York: Mc Graw Hill.
- Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. 5th Edition.* New York: McGraw-Hill.
- Miranda-Alcibar, L. A. (2018). *valuación 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: Universidad Nacional Autónoma de México.

Moreno Franco, D. P., Quintero Manzano, J., & Lopez, C. A. (2010). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *ContactoS*, 78:25--33.

ONU-HABITAT. (2008). *Manual de humedales artificiales*. Nepal: Programa para las ciudades asiáticas de ONU-HABITAT.

Pérez, L., Velázquez, A., & Buratti, S. (2018). *Agenda Ambiental 2018 Diagnóstico y propuesta*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Quispe-Arellano, J. (2016). *Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales para el poblado de Pucará (Huancayo-Perú) [Trabajo de Fin de Máster]*. España: Universidad Politécnica de Valencia.

Rabat, J. (2016). *Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración [Trabajo de Fin de Máster]*. España: Universidad de Alicante.

Rajadel, N. O. (2017). *Estudio de los Humedales Artificiales de Flujo Superficial del Tancat de la Pipa como instrumentos para la restauración ambiental del lago de l'Albufera de València. [Tesis Doctoral]*. España: Universidad Politécnica de Valencia.

Rojas, R. (2002). *Gestión Integral de Tratamiento de Aguas Residuales*. 1(1),8-15.

Rojas, R. (2002). *RESIDUALES”, Curso Internacional “GESTIÓN INTEGRAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria

y Ciencias del Ambiente División de Salud y Ambiente, Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud.

Saggai, M., Ainouche, A., Nelson, M., Cattin, F., El Amrani, A., & Sagga, M. (2017). Long-term investigation of constructed wetland wastewater treatment and reuse: Selection of adapted plant species for metaremediation. *J. Environ. Manag.*, 120-128.

Salas, D., Zapata, M., & Guerrero, J. (2007). MODELO DE COSTOS PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LA REGIÓN. *Scientia et Technica Año XIII*, 591-596.

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, SEMARNAT. (23 de abril de 2003). *ORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT-1996, QUE ESTABLECE LOS LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS RESIDUALES EN AGUAS Y BIENES NACIONALES.* Obtenido de <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3290/1/nom-001-semarnat-1996.pdf>

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, SEMARNAT. (2012). *Agua Calidad de agua.* Obtenido de SEMARNAT Medio Ambiente en México 2013-2014: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/06_agua/6_2_1.html

- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, SEMARNAT. (2015). Agua. En *Informe de la Situación Del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Ciudad de México (México): Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales* (págs. 363-399). México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- Segura-Miranda, J. B. (2014). *Desarrollo de un humedal artificial experimental conformado por estratos verticales. Tesis de Maestría en Ingeniería (Ambiental)*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Stefanakis, & A. (2016). Constructed Wetlands: Description and Benefits of an Eco-Tech Water Treatment System. *Impact of Water Pollution on Human Health and Environmental Sustainability*, 281-303.
- Stefanakis, A. I. (2019). The Role of Constructed Wetlands as Green Infrastructure for Sustainable Urban Water Management. *Sustainability*, 11(24): 6981.
- Troche Arias GA, D. G. (2021). Reutilización del efluente de un humedal construido de flujo subsuperficial vertical en un cultivo hidropónico tipo NFT de Lactuca sativa. *Rev. Soc. cient. Parag*, 26(1):35-48.
- United States Environmental Protection Agency ,EPA. (2000). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo libre superficial*. Estados Unidos: Office of Water.

- Vidal-Álvarez, M. (2018). Tratamiento de aguas residuales en México: problemáticas de salud pública y oportunidad de uso de ecotecnologías sustentables. *RINDERESU*, 3(1-2); 41-58.
- Villena-Chavez, J. A. (2018). Calidad de agua y desarrollo sostenible. *Rev Peru Med Exp Salud Publica*, 38(2):304-8.
- Viloria-Torres, D. S. (2020). *Desarrollo de un sistema experimental para tratamiento de orina humana Tesis de Licenciatura*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Vymazal, J. (2002). The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experienc. *Ecological Engineering*, 18: 633.
- Vymazal, J. (2005). Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 25: 478.
- Vymazal, J. (2011). Plant used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review. *Hydrobiologia*, 674:133-156.
- Wang, Z., Dong, J., Liu, L., Zhu, G., & Liu, C. (2013). Screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetlands treating swine wastewater. *Ecological Engineering*, 54: 57-65.
- Zhang, C., Wen, L., Wang, Y., Lui, C., Zhou, Y., & Lei, G. (2020). Can Constructed Wetlands be Wildlife Refuges? A Review of Their Potential Biodiversity Conservation Value. *Sustainability*, 12(4):1442.

Zitácuaro-Contreras, I., Vidal-Álvarez, M., Hernández y Orduña, M., Zamora-Castro Orduña, S., Betanzo-Torres, E., Marín-Muñíz, J., & Sandoval-Herazo, L. (2021). Environmental, Economic, and Social Potentialities of Ornamental Vegetation Cultivated in Constructed Wetlands of Mexico. *Sustainability*, 13: 6267.

Zurita, F., & White, J. (2014). Comparative study of three two-stage hybrid ecological wastewater treatment systems for producing high nutrient, reclaimed water for irrigation reuse in developing countries. *Water*, 6: 213-228.

Anexo I. Declaratoria de Propiedad Nacional

FORMA 110-1

VALLE DE MEXICO
JEFATURA DEL PROGRAMA HIDRAULICO
RESIDENCIA DE APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS
Oficina de Aguas Superficiales y
Pozos Agropecuarios (545)A.

SECRETARIA DE AGRICULTURA
Y RECURSOS HIDRAULICOS
201/44933

OFICIO NUM. R15.JPH.RAH/ 6877
reg. 2939

ASUNTO: En relación a las aguas que se almacenan en la Presa "LA PIEDAD".
72656 (417)

San Juan de Aragón, D.F., julio 10 de 1980.

C. ING. FELIPE PEREZ Y PEREZ
DIRECTOR GENERAL DE APROVECHAMIENTOS
HIDRAULICOS
PASEO DE LA REFORMA 69, PISO 6.
C I U D A D

Archivado
Exp 201/44933/225.2/44933

En atención a oficio 204.2.1.7.-10297 fechado el 5 de junio último, en el que solicita información para declarar de Propiedad Nacional las aguas de las Presas denominadas - La Piedad y Guadalupe, localizadas en el Municipio de Cuautitlán Izcalli, Estado de México; comunico a usted que con fecha 15 de septiembre de 1978, se remitió información relativa a la Presa - "La Piedad". En cuanto a la Presa de Guadalupe, por encontrarse ésta, dentro de la Cuenca del Valle de México, quedó incluida en la Declaratoria de Propiedad Nacional Núm. 6062 fechada el 19 de Mayo de 1922.

Por otra parte, en relación a la propiedad del Rancho San Antonio Cuamatla, anexo al presente, fotocopia del -- Testimonio Núm. 20 457 de fecha 8 de agosto de 1967, que en el inciso "B", estipula los derechos de Propiedad del Vaso denominado "La Piedad", así como copia de plano del citado Rancho.

ATENTAMENTE
SUFRAGIO EFECTIVO. NO REELECCION
REPRESENTANTE GENERAL EN
EL ESTADO Y VALLE DE MEXICO

ING. SALVADOR SANCHEZ COLIN

CON ANEXOS

C.c.p. C. Ing. Raúl Alcauter Esquivel, Jefe del Programa Hidráulico en el Valle de México.

REC. GRAL DE APROVS. 180
ABR. 29 1981
OFICINA DE ARCHIVO

RECIBIDO
23 JUL 1980 copias a la vuelta

Figura 32. Declaración Propiedad Nacional de la laguna La Piedad. Fuente: SARH

1980

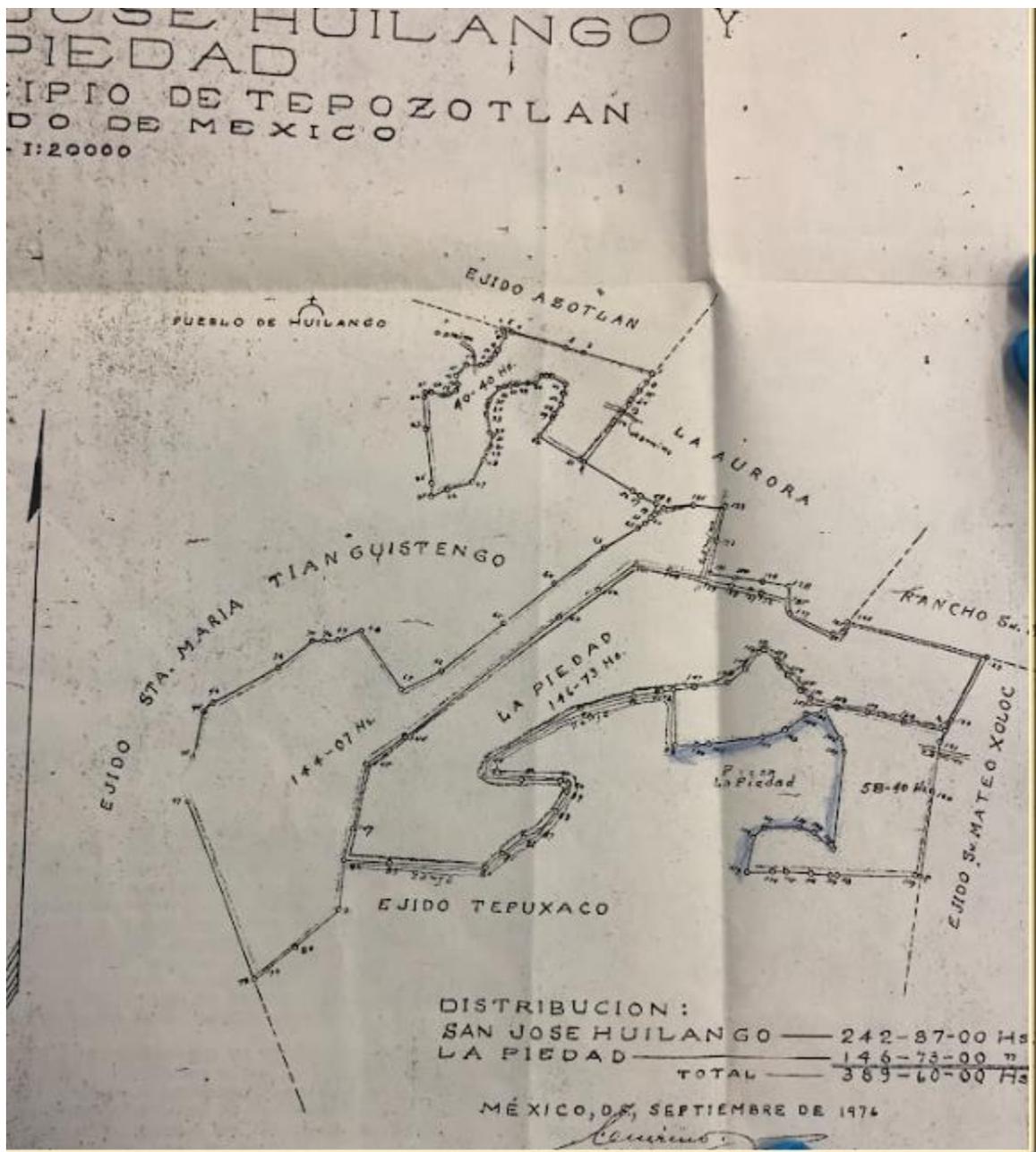


Figura 33. Fragmento de plano de referencia considerado para la declaratoria de Propiedad Nacional de la laguna La Piedad Fuente: SARH,1980.

Anexo II Datos hídricos laguna la Piedad.

Tabla 32 Valores climáticos I Cuautitlán Izcalli entre 1991-2021

Nombre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Temperatura media (°C)	11.8	13.6	15.2	17.1	17.6	16.6
Temperatura min. (°C)	5.3	6.3	7.6	9.6	10.8	11.9
Temperatura max. (°C)	19.6	21.7	23.6	25.1	24.8	22.7
Precipitación mm.	8	5	12	26	58	1115
Humedad %	0.53	0.47	0.41	0.42	0.5	0.64
Días lluviosos	1.8	2.6	3	6.4	10.9	14.8

Elaborado con base en: Plan de desarrollo Cuautitlán Izcalli 2019-2021, Estación Meteorológica San Martin Obispo (CONAGUAb, 2017)

Tabla 33 Valores climáticos II Cuautitlán Izcalli entre 1991-2021

Nombre	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	15.5	15.7	15.1	14.1	12.9	12.3
Temperatura min. (°C)	11.5	11.8	11.6	9.9	7.5	6
Temperatura max. (°C)	21	21.4	20.3	19.9	19.7	19.8
Precipitación mm.	132	127	106	48	10	6
Humedad %	0.73	0.72	0.75	0.7	0.62	0.55
Días lluviosos	19.5	19	15.4	8.9	2.6	2.1

Elaborado con base en: Plan de desarrollo Cuautitlán Izcalli 2019-2021, Estación Meteorológica San Martin Obispo (CONAGUA, 2017)

Anexo III Valores considerados para el balance hídrico la Piedad

Tabla 34 Valores de entrada en la laguna La Piedad

Mes	Descarga Compuerta Tepojaco (L/s)	Descarga Lomas de Cuautitlán (L/s)	Entrada Fluvial Laguna (L/s)	Entrada Total a Laguna La Piedad (L/s)
Enero	53.61	18	0	71.61
Febrero	46.63	18	0	64.63
Marzo	22	18	0	40
Estiaje II	324	20	0	344
Abril	22	20	0	42
Mayo	22	20	0	42
Junio	78	25	20	123
Julio	95	25	80	200
Agosto	68	25	83	176
Septiembre	35	18	25	78
Octubre	28	18	0	46
Noviembre	22	18	0	40
Diciembre	22	18	0	40

Tabla 35 Valores de salida de la laguna La Piedad.

Mes	Salida I (L/s)	Salida II (L/s)	Acumulación (L/s)	Salida Total de la Piedad (L/s)
Enero	0	0	71.61	71.61
Febrero	0	38	26.63	64.63
Marzo	0	14.7	25.3	40
Estiaje II	301.6	14.7	27.7	344
Abril	120	14.7	27	161.7
Mayo	100	0	27	127

Tabla 35. Continuación

Mes	Salida I (L/s)	Salida II (L/s)	Acumulación (L/s)	Salida Total de la Piedad (L/s)
Junio	20	70.4	32.6	123
Julio	98	25	77	200
Agosto	79.44	20	76.56	176
Septiembre	49	15	14	78
Octubre	35.48	5.52	5	46
Noviembre	30.2	4.8	5	40
Diciembre	35.2	0	4.8	40

Tabla 36 Valores de entrada debido a precipitación

Mes	Precipitación mensual (mm/m ³ mes)	Volumen de entrada mensual laguna (m ³ /mes)	Número de días con lluvia	Precipitación diaria (m ³ /día)
Enero	8.00	2,560	1.80	1422.2
Febrero	5.00	1,600	2.60	615.4
Marzo	12.00	3,840	3.00	1280.0
Abril	26.00	8,320	6.40	1300.0
Mayo	58.00	18,560	10.90	1702.8
Junio	115.00	36,800	14.80	2486.5
Julio	132.00	42,240	19.50	2166.2
Agosto	127.00	40,640	19.00	2138.9
Septiembre	106.00	33,920	15.40	2202.6
Octubre	48.00	15,360	8.90	1725.8
Noviembre	10.00	3,200	2.60	1230.8
Diciembre	6.00	1,920	2.10	914.3

Anexo IV Memoria de cálculo humedal artificial

Para estimar el caudal es necesario conocerlo en m³/día Con ello el ejemplo de cálculo para un flujo de 20 L/s es:

$$20 \frac{L}{s} * \left(\frac{60 s}{1 min} \right) * \left(\frac{60 min}{1 hr} \right) * \left(\frac{24 hr}{1 dia} \right) * \left(\frac{1 m^3}{1000 L} \right) = 1728 \frac{m^3}{dia}$$

Ecuación 2

Tabla 37 valores de flujos de entrada en L/s y m³/d

Q	Q
L/s	m³/día
1	86.4
2	172.8
3	259.2
4	345.6
5	432
6	518.4
7	604.8
8	691.2
9	777.6
10	864

El área superficial del humedal artificial de flujo subsuperficial se estimó de acuerdo al método descrito por Kadlec y Wallance, la cual contempla el diseño de los humedales teniendo en cuenta un modelo de reactores en serie de mezcla completa (Asprilla et al.,2020). La ecuación 3 es usada para determinar el área superficial de un humedal artificial:

$$A_s = \frac{Q * 365}{K_A} \ln \left(\frac{C_0 - C^*}{C_E - C^*} \right)$$

Ecuación 3

Donde

$$Q = \text{Flujo a través del humedal}, \frac{m^3}{d}$$

$$K_A = \text{Constante de primer orden}, m/año$$

$$C_o = \text{Concentración en la entrada } mg/L$$

$$C_E = \text{Concentración en la salida}, mg/L$$

$$C^* = \text{Concentración de fondo}, mg/L$$

Para determinar K_A a la temperatura de $21^\circ C$, se puede estimar de acuerdo a la ecuación, la cual muestra el efecto de la temperatura en la constante, los valores de K_{20} , para los distintos parámetros de calidad son los mostrados en la tabla 38

$$K_A = K_{20}(\theta)^{T-20}$$

Ecuación 4

Tabla 38 Valores de constante cinética para distintos parámetros

Parámetro	K_{20} (m/año)	θ	K_A (m/año)
DBO	34	1	34
SST	1000	1.065	1065
NT	22	1.05	23
FT	12	1	12

La C^* corresponde al aporte de biomasa por parte de las plantas que interactúan con los microorganismos presentes en el medio. Este se determina de acuerdo a lo mostrado en la tabla 39

Tabla 39 Valores para determinar C*

Parámetro	C* (mg/L)
DBO	$3.5+0.053C_o$
SST	$7.8+0.063C_o$
NT	1.5
FT	0.02

Con ello los resultados preliminares del área requerida para tratar el agua de entrada de acuerdo a los valores de parámetro de DBO en la descarga Tepojaco los cuales eran de 340 mg/L y llevaros a que cumplieran con la normativa aplicable.

Tabla 40 Área requerida para construcción de humedal artificial de flujo subsuperficial

Flujo de entrada	Área superficial requerida para HAFSS
L/s	m ²
1	1354.4
2	2708.8
3	4063.2
4	5417.5
5	6771.9
6	8126.3
7	9480.7
8	10835.1
9	12189.5
10	13543.9

Se elaboraron diseños conceptuales de acuerdo a la distribución conceptual planteada, donde se tomará en cuenta como limitante el área requerida para la construcción del humedal artificial, con ello el volumen a tratar sería de 5 L/s.