



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE
REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN UN
PROTOTIPO DE HUMEDAL PROFUNDO PARA
EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN
EL MUNICIPIO DE TEHUITZINGO, PUEBLA”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
LICENCIADO EN INGENIERÍA EN ENERGÍAS
RENOVABLES**

**PRESENTA
DAGOBERTO RUIZ ROSAS**

**Matricula
201509019**

**ASESORES DE TESIS
DRA. LAURA ALICIA PANIAGUA SOLAR
MTRO. ENRIQUE DE LA FUENTE MORALES**

DICIEMBRE 2023

Índice

I. Introducción	8
II. Problema de investigación	11
III. Justificación	12
IV. Objetivos e hipótesis	15
Objetivo general.....	15
Objetivos específicos	15
Hipótesis general.....	16
Aportes.....	16
V. Marco teórico	17
V.I. Tratamiento de aguas residuales.....	17
V.II. Tratamiento de aguas residuales en México.....	18
V.III. Humedales naturales	20
V.IV. Humedales artificiales.....	21
V.V. Vegetación de los humedales artificiales.....	23
V.VI. Variables de diseño de humedales artificiales.....	24
V.VII. Análisis fisicoquímicos.....	25
V.VIII. Eficiencia energética en el tratamiento de aguas residuales	26
V.IX. Humedales artificiales y producción de energía	28
V.X. Producción y aprovechamiento de biomasa en humedales artificiales.....	29
V.XI. Metodologías de diseño de humedales artificiales.....	32
VI. Metodología	38
VI.I. Muestreo del agua residual	38
VI.II. Análisis fisicoquímicos.....	39
VI.II.I Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO ₅)	40
VI.II.II Nitrógeno total, fosforo, Demanda Química de Oxígeno (DQO) y turbidez.....	41
VI.II.III pH, conductividad eléctrica y solidos disueltos totales	42
VI.II.IV Oxígeno disuelto.....	43
VII. Resultados	44
VII.I Caracterización inicial del agua residual	44
VII.II Diseño y construcción del prototipo de humedal artificial.....	46
VII.III Resumen del funcionamiento del prototipo.....	55
VII.IV Medición de caudal en efluente y afluente	64
VIII. Diseño de sistema de tratamiento de humedal artificial	66

VIII.I Desarenador y rejas de filtrado.....	67
VIII.II Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA).....	70
VIII.III Humedal artificial.....	75
IX. Producción de biomasa para su uso en un biodigestor.....	79
X. Conclusiones.....	83
XI. Recomendaciones.....	85
XII. Bibliografía.....	87
Anexos	91
Anexo 1 Resultados de caracterización fisicoquímica de agua residual proveniente del municipio de Tehuiztingo, Puebla	91
Anexo 2 Certificados de calidad de equipos de laboratorio.....	95

Índice de figuras

Figura 1 Tipos de vegetación usada en humedales artificiales. Fuente: Pérez L, E. Selección de plantas acuáticas para establecer humedales en el estado de Durango.2009.....	24
Figura 2 Ejemplo de una planta de tratamiento usando paneles fotovoltaicos, Connecticut, USA. Fuente: Greenskies Renewable Energy.	29
Figura 3 Arundo donax. Fuente: Wikimedia Commons.	30
Figura 4 Estado actual de la planta de tratamiento del municipio de Tehuiztingo. Fuente: Autoría propia.....	38
Figura 5 Descarga de aguas residuales debido a una tubería rota. Fuente: Autoría propia.	39
Figura 6 Corriente de aguas residuales formada por la descarga de estas. Fuente: Autoría propia.....	39
Figura 7 Caja de incubación para DBO ₅ . Fuente: Autoría propia.	40
Figura 8 Sensor para medición de DBO ₅ . Fuente: Autoría propia.	41
Figura 9 Fotómetro Spectroquant Nova 60 para medición de concentración de contaminantes. Fuente: Autoría propia.....	41
Figura 10 Kit de análisis de nitrógeno total, con los reactivos necesarios para su medición en el fotómetro. Fuente: Autoría propia.....	42

Figura 11 Equipo Oakton pH/CON 510 para medición de pH, conductividad eléctrica y solidos disueltos totales. Fuente: Autoría propia.	43
Figura 12 Corte transversal del prototipo de humedal artificial profundo. Fuente: Autoría propia.	51
Figura 13 Vista superior del prototipo de humedal artificial profundo. Fuente: Autoría propia.	52
Figura 14 Colocación de sustrato en la caja de plástico, con la división entre área de tratamiento y zonas de entrada y salida. Fuente: Autoría propia.	53
Figura 15 Sistema de goteo para garantizar un caudal constante al humedal. Fuente: Autoría propia.	53
Figura 16 Humedal terminado. Fuente: Autoría propia.	54
Figura 17 Diseño final de prototipo de humedal profundo. Fuente: Autoría propia.	54
Figura 18 a) Concentración de DBO_5 en afluente, efluente y la concentración máxima permitida por la NOM-001-SEMARNAT 2021 b) Porcentaje de remoción de DBO_5 respecto al tiempo de funcionamiento del prototipo. Fuente: Autoría propia.	55
Figura 19 a) Concentración de DQO en efluente, afluente y la concentración máxima permitida por la NOM-001-SEMARNAT-2021 b) Porcentaje de remoción de DQO durante el periodo de funcionamiento del prototipo. Fuente: Autoría propia.	57
Figura 20 a) Grafica de concentración de nitrógeno total en $mg \cdot l^{-1}$ en el afluente, efluente y concentración máxima permitida b) Grafica de porcentaje de remoción de nitrógeno total en el periodo de funcionamiento del prototipo. Fuente: Autoría propia.	58
Figura 21 a) concentración de fosfatos en $mg \cdot l^{-1}$ en el efluente, afluente y la concentración máxima permitida por la normatividad b) porcentaje de remoción de fosfatos durante el periodo de funcionamiento del prototipo. Fuente: Autoría propia.	59
Figura 22 a) Concentración de SST en $mg \cdot l^{-1}$ en el afluente, efluente y la concentración máxima permitida por la NOM-011-SEMARNAT-2021 b) Porcentaje de remoción de SST durante el periodo de funcionamiento del prototipo. Fuente: Autoría propia.	61

Figura 23 Evolución en el agua tratada en comparación con el agua residual. Fuente: Autoría propia.....	63
Figura 24 Vista lateral y vista de base del desarenador. Fuente: Autoría propia..	69
Figura 25 Vista de base y lateral de las rejillas de filtrado. Fuente: Autoría propia.	70
Figura 26 Vista lateral del reactor anaerobio de flujo ascendente, se muestra la entrada, la salida, la salida de lodos y los respiraderos. Fuente: Autoría propia...	73
Figura 27 Vista de sección del reactor anaerobio, mostrando el ancho y la altura, así como el canal recolector de lodos. Fuente: Autoría propia.	74
Figura 28 Vista superior del reactor anaerobio, mostrando el canal recolector de lodos, la entrada del afluente, la salida del efluente y los respiraderos. Fuente: Autoría propia.....	74
Figura 29 Dimensiones de las celdas del humedal. Fuente: Autoría propia.....	75
Figura 30 Disposición en el sitio de la planta de tratamiento abandonada de los componentes del humedal artificial. Fuente: Autoría propia.	76
Figura 31 Vista de las celdas del humedal con el RAFA al fondo. Fuente: Autoría propia.	77
Figura 32 Vista del sistema de humedal artificial donde se puede apreciar el sistema de desarenador y rejas de filtrado antes del RAFA. Fuente: Autoría propia.....	78
Figura 33 Dimensiones de la laguna y de la membrana del biodigestor. Fuente: Autoría propia.....	81
Figura 34 Vista superior del biodigestor: Fuente: Autoría propia.....	82

Índice de tablas

Tabla 1 Límites permisibles de contaminantes de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-2021. Fuente: NOM-001-SEMARNAT-2021	19
Tabla 2 Consumo energético por m ³ de agua tratada y por kilogramo de DQO removido de varias tecnologías de tratamiento. Fuente: Huella energética en el ciclo integral del agua. 2016.....	27

Tabla 3 Valores de K_{20} , θ y C *para distintos contaminantes en HAFSS. Fuente: Rabat, Blázquez J. Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración. 2016.....	37
Tabla 4 Equipos usados en los análisis fisicoquímicos. Fuente: Autoría propia. ...	40
Tabla 5 Comparación con la Norma NOM 001 SEMARNAT 2021 y los indicadores de calidad de agua de la CONAGUA. Fuente: Autoría propia.	46
Tabla 6 Valores de K_{20} , θ y C *para distintos contaminantes en HAFSS. Fuente: Rabat, Blázquez J. Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración. 2016.....	47
Tabla 7 Área de tratamiento por contaminante. Fuente: Autoría propia.	48
Tabla 8 Dimensiones del humedal por contaminante. Fuente: Autoría propia.....	49
Tabla 9 Escalas aplicadas en el caudal de entrada y su relación con el área de tratamiento. Fuente: Autoría propia.	49
Tabla 10 Dimensiones teóricas del prototipo de humedal artificial. Fuente: Autoría propia.	50
Tabla 11 Características del prototipo del prototipo de humedal artificial profundo. Fuente: Autoría propia.....	51
Tabla 12 Caracterización del efluente y afluente. Fuente: Autoría propia.....	63
Tabla 13 Mediciones del caudal en el prototipo durante 20 días. Fuente: Autoría propia	65
Tabla 14 Área de tratamiento por contaminante. Autoría: Fuente propia	66
Tabla 15 Datos necesarios para el cálculo de desarenadores y sedimentadores. Fuente: Autoría propia.....	67
Tabla 16 Dimensiones del humedal en función del contaminante a remover. Fuente: Autoría propia.....	75
Tabla 17 Características del sistema de tratamiento por humedal artificial en Tehuizingo, Puebla. Fuente: Autoría propia.....	77
Tabla 18 Parámetros estimados de producción de biogás de la propuesta de humedal artificial a partir de biomasa cosechada.....	80
Tabla 19 Parámetros de diseño de biodigestor tipo laguna cerrada. Autoría: Fuente propia.	80

Agradecimientos

Esta tesis ha sido posible gracias a la ayuda, apoyo y colaboración de varias instituciones y personas, quienes tienen mi agradecimiento por lo que hicieron para este trabajo. Principalmente a mis asesores, la doctora Laura Alicia Paniagua Solar y el maestro Enrique de la Fuente Morales, por su apoyo, paciencia y dedicación hacia mi persona y este trabajo.

Quiero agradecer a la doctora Teresa Zayas, por su apoyo al permitirme utilizar las instalaciones y equipos del Laboratorio de Química Ambiental, así como sus consejos y comentarios.

Al gobierno municipal de Tehuiztingo, Puebla, por facilitarme documentación necesaria para esta investigación, así como el apoyo en la toma de muestras.

A la Vicerrectoría de Estudios de Posgrado, por la beca otorgada, que fue de gran ayuda para la compra de material.

A amigos y familiares que me mantuvieron enfocado en mis objetivos, aun en momentos difíciles.

Finalmente, a mis padres y hermanas por todo el apoyo para afrontar los retos que surgieron, creyendo siempre en mí y dándome la confianza necesaria para terminar este proyecto.

*Cuando un sueño muere es porque se
ha hecho real*

I. Introducción

Actualmente los efectos del cambio climático en nuestras vidas diarias se han vuelto más tangibles, sufrimos de olas de calor, tormentas invernales, inundaciones y sequías. Entre los aspectos que son más afectados está la disponibilidad de agua dulce para el consumo humano, debido a los fenómenos naturales causados por el calentamiento global, así como a un uso irresponsable y mala planeación del manejo del recurso hídrico, que ha conllevado a la sobreexplotación y contaminación de cuerpos de agua, acuíferos y reservorios de agua como presas o embalses.

En nuestro país el panorama a futuro luce complicado, datos de la Conagua [1] indican que el 70% del país se encuentra bajo cierto grado de sequía, siendo los estados del norte los más afectados. Mientras que el 64% de los cuerpos de agua superficiales están contaminados en cierto grado [2], debido principalmente a las descargas de aguas residuales provenientes de la industria y de los sistemas de drenaje de las ciudades y municipios del país. Si bien es cierto que el 70% de las aguas provenientes del drenaje en el país reciben algún tipo de tratamiento, en muchos casos las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) no operan con la eficiencia debida [3]. El principal problema que las afecta son la falta de recursos para su correcta operación, debido a los altos costes energéticos que estas plantas requieren para su funcionamiento, razón por la cual su operación es pausada, a veces de manera permanente, lo cual conlleva a su abandono y deterioro. Esto genera una situación donde el agua proveniente del drenaje es vertida directamente en arroyos, barrancas, ríos y lagos, con la subsecuente contaminación de estos, lo cual genera un impacto negativo en el medio ambiente, así como en las comunidades cercanas a estos.

Una solución a esta problemática es el empleo de humedales artificiales. Un humedal artificial es un sistema que simula los procesos físicos, biológicos y químicos que suceden en los humedales naturales presentes en ríos, lagos y océanos. Los humedales son ecosistemas de transición entre un medio terrestre y uno acuático, son considerados como los filtros de la naturaleza ya que se encargan de limpiar de desechos y sedimentos a los ríos, lagos y mares en la naturaleza [4].

Estos ecosistemas dependen de un balance entre periodos húmedos y periodos secos. Así pues, un humedal artificial imita estos ecosistemas mediante el uso de vegetación y sustratos para limpiar el agua de contaminantes, bacterias, malos olores y partículas fecales, permitiendo su reutilización en otras actividades o su descarga en cuerpos de agua, puesto que el agua tratada cumple con las normas de contaminación que exige la Conagua [5].

El municipio de Tehuizingo se ubica al sur del estado de Puebla, limita con los municipios de Izúcar de Matamoros, Ahuatlán, Cuayuca de Andrade, Santa Inés Ahuatempan, Acatlán de Osorio, Ahuehuetitla, Chinantla, Axutla, Chiautla y Piaxtla [6]. Pertenece a la cuenca hidrográfica del río Atoyac y los climas presentes en el municipio varían del tipo cálido subhúmedo con lluvias en verano al semiseco muy cálido, mientras que la vegetación presente está representada por la selva baja caducifolia mezclada con cactáceas [7]. De acuerdo con el último censo realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) la población total del municipio es de 12,672 personas, siendo la cabecera municipal la localidad con mayor población, con 6,644 personas [8], así mismo, en este mismo censo se indica que el 94.2% de esta población cuenta con algún tipo de drenaje, ya sea mediante la recolección de aguas residuales en tuberías, como el uso de fosas sépticas. Si bien es de destacar la cobertura de drenaje en el municipio, la principal problemática del municipio en el tema del drenaje es la falta de una planta de tratamiento de aguas residuales funcional, puesto que la planta que existe actualmente no está en funcionamiento debido a la falta de recurso económico para su funcionamiento, un dimensionamiento deficiente, así como decisiones de diseño que influyeron negativamente en su funcionamiento a largo plazo. Esto ha causado la contaminación del medio ambiente cercano, debido a la descarga de aguas residuales directamente en una barranca, lo cual también impacta de manera negativa en la salud de las personas que viven cerca.

Con base en lo anterior, el propósito de este trabajo de investigación es diseñar un humedal artificial para tratar las aguas residuales generadas en la cabecera municipal de Tehuizingo, Puebla, mejorando de esta forma el medio ambiente del lugar, generando empleos, concientizando a las personas acerca del cuidado del

agua, y sobre todo ayudando a la reutilización de este vital líquido que cada día se vuelve más importante y difícil de conseguir.

II. Problema de investigación

El acceso a agua potable es un servicio básico para el ser humano debido a su impacto en su calidad de vida, mejorando la salud y el bienestar de la población. De acuerdo con la ONU y sus objetivos de desarrollo sustentable, 3 de cada 10 personas carecen de acceso a servicios de agua potable [9]. En nuestro país la cobertura a nivel nacional de agua entubada al 2015 era de un 94.4%, un aumento del 20% con respecto al año 1990. Esta evolución en la cobertura tiene que ver con el crecimiento poblacional y la concentración de la población en centros urbanos ocurrida en las últimas décadas [10].

Así como el acceso al agua potable es básico para una mejor calidad de vida, el acceso al drenaje y alcantarillado es fundamental. Estos sistemas de alcantarillado son los encargados de recolectar y transportar el agua residual generada por los núcleos de población hacia las plantas de tratamiento de aguas residuales. A nivel nacional solo el 73% del agua residual generada es tratada [10], el resto es vertido en diversos cuerpos de agua superficiales, con la correspondiente contaminación que esto provoca.

Por otro lado, la explotación de mantos acuíferos y de cuerpos de agua superficiales para el abastecimiento de agua potable, así como la contaminación generada por la descarga de aguas residuales no tratadas a puesto bajo presión el suministro de agua en algunas regiones del país.

Los humedales artificiales resultan una excelente opción para el tratamiento de aguas residuales, puesto que entre sus ventajas están el bajo costo de construcción y mantenimiento, comparado con una planta tratadora de agua convencional, su alta eficiencia aun con caudales variables, una estética más agradable que se puede combinar con el ambiente circundante y ofrece un hábitat para diferentes especies animales y vegetales.

III. Justificación

En el presente trabajo de investigación se plantea el diseño de un prototipo para un humedal artificial subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales en el municipio de Tehuizingo, Puebla, aplicando la todos los aspectos que afectan el diseño de un humedal artificial, como lo son cantidad y tipo de contaminantes, caudal de entrada, ubicación geográfica, disponibilidad de espacio y especies vegetales presentes en la región. El diseño final deberá cumplir con la norma NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación [11], y deberá de contar con todos los datos, mediciones y cálculos para su correcto funcionamiento. También se hará una estimación de la producción de biomasa para generar biogás para la generación eléctrica. Así mismo, se construirá un prototipo, con el propósito de comprobar que las especies elegidas y los cálculos realizados sean los correctos para el tratamiento del agua residual del sitio de estudio, para esto se trabajará con una escala que nos permita tener comportamientos lo más cercanos posibles a un modelo a escala real. Estudios acerca del tema han demostrado la utilidad de los prototipos a escala a la hora de identificar posibles mejoras en el diseño del humedal, como por ejemplo combinar distintos tipos de especies de plantas en un mismo humedal, añadir arcillas u metales para absorber mejor contaminantes, cambiar el tipo de sustrato, [12] etc. Por otra parte, los modelos a escala de los humedales artificiales nos ofrecen resultados que se apegan a una escala real, puesto que, sin importar el tamaño del humedal, este contara con todos los elementos que le permiten llevar a cabo su función, como pueden ser sustratos, plantas y tamaño del humedal. Así se pueden obtener resultados positivos en el tratamiento del agua residual sin importar el tamaño del humedal [13].

Los humedales artificiales son una tecnología probada, con décadas funcionando en Europa, Estados Unidos y Asia [14], donde han demostrado ser eficientes, económicos y amigables con el medio ambiente, sobre todo en zonas rurales alejadas de grandes centros urbanos, donde la construcción de una planta de tratamiento es demasiado costosa. En Europa se han construido humedales

artificiales desde la década de los 60 cuando se empezaron a realizar las primeras investigaciones para conocer su eficiencia removiendo contaminantes, a partir de ese momento su construcción se ha extendido en ese continente, mejorando su diseño cada vez más para poder cumplir con los requisitos que piden las normas de contaminación de los países europeos, que son bastante estrictas [15]. En los Estados Unidos la aprobación del Acta de Agua Limpia en 1972, que prohíbe la descarga de contaminantes en aguas navegables, promovió la construcción de los primeros humedales artificiales siguiendo el ejemplo de los países europeos. Si bien en un primer momento se usaron humedales naturales para llevar a cabo el tratamiento de las aguas residuales de las comunidades norteamericanas, con el tiempo se fueron llevando a cabo diseños de humedales artificiales que tuvieron éxito, comprobando que los humedales artificiales pueden ser adaptados para todo tipo de climas, desde los desiertos de Arizona y California hasta los bosques del norte de Michigan [16]. La implementación de humedales artificiales en nuestro país es extensa, según datos de la CONAGUA, a nivel nacional existen 230 humedales artificiales repartidos en los 32 estados de la república [3], los cuales funcionan ya sea de manera independiente o como tratamiento secundario a algún otro proceso más convencional. En nuestro país este tipo de tratamiento está más enfocado en comunidades pequeñas, teniendo además del beneficio primario de tratar el agua residual para evitar la contaminación del medio ambiente, el beneficio de poder utilizar las plantas del humedal para producir plantas de ornato [17]. Un caso exitoso en el país es el humedal artificial construido en el lago del Bosque de San Juan de Aragón en Ciudad de México, donde se trata el agua procedente de una PTAR cercana para mejorar aún más su calidad luego del tratamiento [18]. El municipio de Tehuiztzingo actualmente cuenta con 1 planta de tratamiento de aguas residuales, se trata de una planta con capacidad de tratamiento de 3 l*s^{-1} que solo logra tratar 1 l*s^{-1} , siendo el río Atoyac el cuerpo de agua receptor del caudal tratado [19]. Tras hacer una visita presencial al sitio de la planta se comprobó que esta no funciona y que se encuentra en un estado de abandono. La implementación de un humedal artificial para el tratamiento de agua residual en el municipio de Tehuiztzingo tendría un impacto favorable tanto en el medio ambiente como en la creación de empleos y en la mejora en la vida de las personas que habitan, al evitar la descarga de agua

residual al aire libre, evitando así la contaminación de las aguas subterráneas y la presencia de malos olores.

IV. Objetivos e hipótesis

Objetivo general

Evaluación de la eficiencia de remoción de contaminantes en un prototipo de humedal profundo adaptado a las condiciones particulares en el municipio de Tehuizingo, Puebla, que cumpla con la normatividad NOM-001-SEMARNAT-2021, sustentando el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales basada en un humedal artificial.

Objetivos específicos

- Analizar a partir de la metodología establecida por la CONAGUA las variables de construcción de un humedal (Largo, ancho y tiempo de residencia hidráulica) y los parámetros de remoción (Demanda Bioquímica de Oxígeno).
- Analizar a partir de la metodología establecida por Kadlec y Knight las variables de construcción de un humedal (Área de tratamiento) y los parámetros de remoción (Nitrógeno total, Fosfatos y Sólidos Suspendidos Totales)
- Adaptar una metodología para las variables de construcción (Área de tratamiento, largo, ancho y tiempo de residencia hidráulica) y los parámetros de remoción (Nitrógeno total, Fosfatos, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno y Sólidos Suspendidos Totales), para evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes del prototipo.
- Identificar a partir de análisis fisicoquímicos la cantidad de los principales contaminantes permitidos por la normatividad presentes en el agua residual en el municipio de Tehuizingo.
- Estimar la producción de biogás a partir de la biomasa vegetal producida en el humedal para la generación de energía eléctrica.

Hipótesis general

Es posible diseñar un prototipo de un humedal artificial eficiente y apto para las características particulares de temperatura, calidad de agua a tratar y especies de plantas disponibles del municipio de Tehuizingo, Puebla.

Aportes

El aporte práctico de esta investigación será la construcción de un prototipo de humedal profundo a escala, el cual fundamentará con datos reales el diseño de un humedal artificial a escala real. Por otra parte, el aporte teórico será la revisión de las diferentes metodologías de diseño de humedales artificiales que existen, para encontrar aquella que mejor se ajuste a las condiciones específicas del lugar de estudio.

V. Marco teórico

V.I. Tratamiento de aguas residuales

Las aguas residuales se dividen en:

- Aguas residuales domésticas. Aquellas procedentes de viviendas y servicios, generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas
- Aguas residuales industriales. Todas las aguas residuales vertidas desde locales utilizados para efectuar cualquier actividad comercial o industrial, que no sean aguas residuales domésticas ni aguas de escorrentía pluvial.
- Aguas residuales urbanas. Las aguas residuales urbanas o la mezcla de estas con las aguas residuales industriales y/o aguas de escorrentía pluvial [20].

La descarga de las aguas residuales sin tratar tiene un impacto negativo tanto en la salud de las personas como en el ambiente, debido a la composición química de estas aguas.

El tratamiento de aguas residuales es relativamente reciente, siendo que los primeros sistemas se construyeron en el siglo XIX, en Inglaterra, debido sobre todo a los brotes de colera y otras enfermedades que afectaron a las poblaciones, causadas por la contaminación que se producía en el agua potable gracias a la descarga de drenajes en ríos y lagos. Las primeras investigaciones para el desarrollo de sistemas de tratamiento se centraron en precipitación química, digestión de lodos, filtración física y aeración [21].

Los mecanismos para el tratamiento de aguas residuales se dividen en: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario. El pretratamiento o tratamiento preliminar tiene como objetivo la retención de sólidos como arenas y gravas gruesas por medio de rejillas, canales con desarenadores, con el fin de evitar el taponamiento de tuberías en los procesos siguientes [22]. El tratamiento primario elimina los sólidos más finos, así como materiales flotantes y turbidez, mediante procesos mecánicos como cribas y unidades de centrifugación.

El tratamiento secundario remueve sólidos no sedimentables, materia orgánica, nutrientes y patógenos mediante mecanismos biológicos o bioquímicos como biofiltros, lodos activados y lagunas de estabilización. El tratamiento terciario tiene como objetivo la remoción de contaminantes específicos, así como nutrientes y materia orgánica fina, esto se logra mediante procesos fisicoquímicos como precipitación, filtración, cloración y luz ultravioleta, siendo este tratamiento bastante caro en términos energéticos.

Por último, los humedales artificiales entran en la categoría de tratamientos extensivos o naturales que engloban aquellos procedimientos en los que el tratamiento principal es proporcionado por componentes del medio natural [21]. Estos pueden ser construidos como un postratamiento en una planta de tratamiento convencional, o como un tratamiento secundario en sitios con las características adecuadas para su construcción.

V.II. Tratamiento de aguas residuales en México

De acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales, el agua residual es la composición de las descargas de usos público urbano, doméstico, industrial, comercial, de plantas de tratamiento en general de cualquier uso, así como la mezcla de ellas [23]. Las aguas residuales al ser una mezcla de los desechos provenientes de las actividades humanas traen consigo una enorme variedad de contaminantes los cuales tienen un enorme impacto negativo en el medio ambiente y en las personas, en el caso en el que estas aguas residuales sean descargadas sin el tratamiento adecuado para remover los contaminantes presentes en ella. La norma NOM-001-SEMARNAT-2021, así como los indicadores de calidad de agua de la Semarnat son las principales normas que nos guían para poder determinar qué tan contaminada está el agua en el país. La norma NOM-001 nos proporciona los límites permisibles en descargas de aguas residuales en cuerpos de agua superficiales, algunos contaminantes que toma en cuenta se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 Límites permisibles de contaminantes de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-2021. Fuente: NOM-001-SEMARNAT-2021

Parámetro	Límite permisible en ríos, arroyos y canales
Sólidos Suspendidos Totales	84 mg*l ⁻¹
Demanda Química de Oxígeno	210 mg*l ⁻¹
Nitrógeno total	35 mg*l ⁻¹
Fosforo total	21 mg*l ⁻¹
pH	6 - 9

Mientras que los indicadores de calidad de agua de la SEMARNAT son usados para el monitoreo de cuerpos de agua superficiales a lo largo del país. Se consideran 8 indicadores: Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Coliformes Fecales (CF), *Escherichia coli* (E_coli), Enterococos (ENTEROC), Porcentaje de Saturación de Oxígeno (OD%) y Toxicidad (TOX) [24]. De acuerdo con estos indicadores, la SEMARNAT clasifica la contaminación desde aguas no contaminadas hasta aguas fuertemente contaminadas.

De acuerdo con la CONAGUA, existen en el país 2786 plantas de tratamiento de aguas residuales en operación, con una capacidad instalada de 196 749.51 l*s⁻¹, que dan un tratamiento a 144 710 l*s⁻¹, equivalente al 67.2% del agua residual generada y colectada en el país [19]. México, al igual que la mayoría de los países de América Latina, hace grandes esfuerzos para la construcción y mantenimiento de plantas de tratamientos de aguas residuales. Sin embargo, muchas veces las plantas construidas no cuentan con los recursos económicos para su funcionamiento, y terminan siendo abandonadas. En el mejor de los casos las aguas residuales dejan de ser tratadas y son usadas directamente para riego agrícola, lo que implica riesgos para el medio ambiente, la salud de la población y una disminución de la calidad de vida de las personas [25]. En un entorno donde el cambio climático ha puesto bajo presión el suministro de agua potable, es verdaderamente indispensable pensar en la reutilización del agua residual para su uso en actividades como agricultura, metalurgia, construcción y actividades

industriales [26]. Por tanto, es necesario la inversión en sistemas de tratamiento de aguas residuales, tanto convencionales, como en alternativos, como los humedales artificiales.

V.III. Humedales naturales

Los humedales son un tipo de ecosistema de transición entre el agua y la tierra, teniendo de esta forma características tanto de un medio acuático como de un medio terrestre. Estos humedales varían en su forma y función dependiendo de diferencias locales en suelo, topografía, clima, tipo de agua, vegetación y otros factores [27]. De acuerdo con la Convención de Ramsar para la protección de los humedales alrededor del mundo, existen 3 categorías de humedales artificiales: humedales marinos y costeros, humedales continentales y humedales artificiales. Esta Convención de Ramsar fue creada para la protección de los humedales debido a la importancia ecológica y servicios ambientales que estos proveen tanto al ser humano como también a diferentes especies animales y vegetales [28]. Entre los beneficios que nos dan los humedales esta proporcionar refugio y alimento a diferentes especies de peces, crustáceos, aves, mamíferos e insectos; servir de barrera protectora contra inundaciones ya sea en regiones costeras o zonas lacustres, evitando daños a las poblaciones cercanas y por ultimo actuar como filtros naturales, evitando un exceso de contaminantes al absorber estos mismos en el sustrato y en las raíces de las plantas, mejorando la calidad de agua de los cuerpos de agua cercanos [29]. A pesar de estos beneficios, se han perdido una buena parte de humedales en el mundo, al cambiar la topografía y el uso del suelo de estos humedales para ampliar zonas urbanas, campos de cultivo y actividades industriales. Esto ha tenido un impacto negativo tanto en la biodiversidad de estos ecosistemas como en el propio ser humano al tener problemas con inundaciones y contaminación. En la actualidad la labor de organizaciones para la protección del medio ambiente, así como una mejor comprensión del valor de los humedales ha logrado que estos se conviertan en áreas protegidas [29].

V.IV. Humedales artificiales

Como se comentó anteriormente, uno de los beneficios de los humedales es la absorción de contaminantes, un hecho que no pasó desapercibido para el hombre, puesto que desde hace siglos los humedales fueron usados como zona de descarga de desechos humanos y animales. Fue en la década de 1950 en Alemania cuando se empezaron a realizar estudios acerca de la viabilidad de diseñar y construir humedales, de tal forma de que se tuviera una mejor eficiencia en el tratamiento de los contaminantes que los humedales naturales [30]. Esta tecnología tenía varias ventajas al compararla con una planta de tratamiento convencional al ser más barata de construir y mantener, ser más simple en mantenimiento y operación, tener un aspecto visual más agradable y servir como hábitat para plantas y animales. Estas ventajas significaron que, para ciudades y pueblos pequeños, que no contaban con los recursos económicos para construir un sistema de tratamiento convencional o para conectarse a una planta de tratamiento más grande, podían construir un humedal artificial y poder así cumplir con la normatividad ambiental de tratamiento de agua residual [15]. Otra ventaja es que se pueden diseñar humedales dependiendo del volumen a tratar, teniendo tanto humedales que funcionen en ciudades como humedales que puedan dar servicio a una casa familiar [31].

Los humedales artificiales se pueden clasificar en 2 tipos de acuerdo con el flujo con el que el agua circula en ellos, humedales artificiales de flujo superficial (HAFS) y humedales artificiales de flujo subsuperficial o profundos (HAFSS). Los primeros son aquellos donde el agua circula expuesta a la atmósfera a través de los tallos de las plantas, tienen una profundidad de hasta 0.6 m y pueden albergar distintas especies de peces, anfibios e insectos. Este tipo de humedales suelen ser usados como un postratamiento tanto de plantas convencionales como de otros humedales, debido a su capacidad para remover nutrientes, en específico el fósforo [5]. Por su parte los humedales artificiales de flujo subsuperficial se caracterizan por que la circulación del agua ocurre a través de un medio granular (sustrato), con una profundidad de aproximadamente 0.6 m, la vegetación se planta en este medio granular y el agua está en contacto con las raíces de las plantas. Los humedales artificiales de flujo subsuperficial a su vez se dividen en dos categorías en función

de la aplicación de agua al sistema, pudiendo ser de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) o de flujo subsuperficial vertical (HAFSSV) [32]. Los HAFSSH son los sistemas más usados alrededor del mundo y consisten en un sustrato, ya sea de tierra o arena y grava, plantado con plantas, por lo general carrizo. El agua ingresa de manera constante por la parte superior de un extremo y fluye lentamente de manera horizontal hasta salir por un tubo de drenaje en el extremo inferior opuesto. La profundidad de este sustrato varía entre 0.45 m a 1 m, con una pendiente de entre 0.5% a 1%. El diámetro del material del sustrato varía, siendo más grueso en la entrada y salida del humedal y más fino en la zona donde está plantada la vegetación. Por otra parte, los HAFSSV reciben las aguas residuales de manera intermitente de arriba hacia abajo, generando condiciones de saturación de agua seguidas de condiciones de insaturación, estimulando el suministro de oxígeno. La aplicación del agua se realiza por medio de tuberías situadas por encima del sustrato, para luego ser recogida por un sistema de drenaje situado en el fondo del humedal. El sustrato en este tipo de humedales está constituido por varias capas siendo más finas en la parte superior, aumentando de diámetro conforme se va bajando, y al igual que los HAFSSH, la vegetación se planta en este sustrato [5].

El tratamiento del agua dentro de un humedal natural ocurre por la interacción entre los elementos del humedal y de los fenómenos físicos, químicos y biológicos dentro del humedal, con la intervención del sol como principal fuente de energía. Los fenómenos físicos incluyen procesos de filtración y sedimentación de materia orgánica suspendida en el agua y de metales pesados mediante las raíces de la vegetación y la porosidad del sustrato. Los fenómenos químicos incluyen procesos como descomposición por oxidación, que ayuda a la destrucción de virus y bacterias patógenas, así como por precipitación y absorción en el sustrato de metales pesados, nitrógeno y fósforo, siendo este último particularmente difícil de eliminar en los humedales de flujo subsuperficial, por lo que se ha propuesto el empleo de sustratos específicos que potencien la retención del fósforo. Por último, la parte biológica del humedal está representada por la vegetación y microorganismos presentes en el sustrato del humedal, estos elementos son capaces de depurar nitrógeno, fósforo, metales pesados y materia orgánica [33]. Los microorganismos en particular son responsables del proceso de nitrificación, en el cual el nitrógeno

amoniaco es transformado en nitrógeno nítrico. Este proceso está influenciado por otros factores, que pueden ralentizar o acelerar el crecimiento de bacterias nitrificantes, entre estos factores se encuentran: un pH de entre 7.5 y 8.6, una concentración de oxígeno disuelto por encima de $1 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ y una temperatura adecuada que permita el crecimiento bacteriano. Para que la eliminación del nitrógeno sea completa, al proceso de nitrificación debe seguir un proceso de desnitrificación, donde, en condiciones de falta de oxígeno, bacterias convierten nitratos en nitritos para que a continuación este pase a forma gaseosa y pueda escapar a la atmósfera [12]. La desnitrificación es especialmente potenciada en los HAFSSV, debido a que la intermitencia del flujo del agua permite condiciones donde se tengan zonas con una mayor concentración de oxígeno y zonas donde existan condiciones anaerobias.

V.V. Vegetación de los humedales artificiales

La vegetación en un humedal ya sea natural o artificial es un componente vital para que se logre su función de filtro, siendo además especies únicas debido a su capacidad de sobrevivir tanto en ambientes terrestres y acuáticos. Como se explicó anteriormente, los humedales artificiales se clasifican en dos tipos principales, de flujo superficial y de flujo subsuperficial. La vegetación usada en cada tipo de humedal cambiará de acuerdo con la hidráulica del sistema donde se usará. Los humedales de flujo subsuperficial ocupan vegetación emergente, la cual se caracteriza por tener raíces que se anclan al sustrato, ya sea en sustratos anegados total o parcialmente, y que además tienen una alta tasa de crecimiento [34]. Algunas de las especies emergentes más usadas en humedales artificiales de flujo subsuperficial son diferentes especies de carrizos, juncos y tules como *Arundo donax*, *Cyperus papyrus* y *Phragmites australis* [5]. Para el caso de los humedales artificiales de flujo superficial, la vegetación que mejor se adecua a ese ambiente totalmente acuático son las especies flotantes y sumergidas. Las especies flotantes como su nombre indica son especies que se desarrollan en la superficie del agua donde sus raíces cuelgan debajo de la estructura de la propia planta, proporcionando un área superficial donde ocurren procesos bioquímicos que le dan a la planta los nutrientes necesarios para su desarrollo [35]. Por último, las especies

sumergidas se desarrollan exclusivamente dentro del agua y muestran menor velocidad de crecimiento que los otros dos tipos de vegetación. Algunas especies de plantas sumergidas son *Myriophyllum aquaticum*, *Elodea canadenses*, y *Potamogeton crispus*. La Figura 1 muestra las diversas especies de plantas adaptadas para un humedal profundo y humedal superficial.

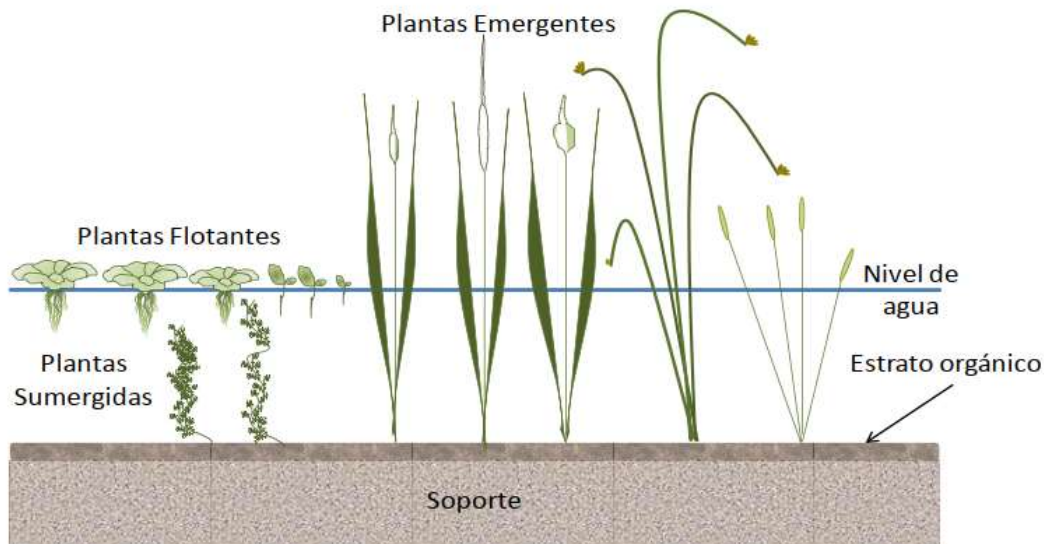


Figura 1 Tipos de vegetación usada en humedales artificiales. Fuente: Pérez L, E. Selección de plantas acuáticas para establecer humedales en el estado de Durango.2009.

V.VI. Variables de diseño de humedales artificiales

Para el diseño de un humedal artificial se necesita conocer: caudales de entrada y salida, tanto en sus máximos, su media y sus mínimos; concentración de contaminantes en el agua a tratar, así como la concentración esperada en el caudal de salida y finalmente la temperatura de operación, tomándose la temperatura del mes más frío para el diseño, puesto que se toma el peor escenario para el crecimiento de plantas y bacterias. Por otra parte, los principales componentes de un diseño de humedal artificial profundo son:

- Tiempo de retención hidráulico, que es el tiempo que el agua estará dentro del humedal para poder alcanzar la calidad deseada
- Profundidad del sustrato,
- Geometría de la zona de tratamiento, es decir la longitud y la anchura [36].

Por último, a la hora de diseñar un humedal artificial hay que tener en cuenta ciertas consideraciones para que el sistema tenga el funcionamiento esperado. Se debe mantener un diseño simple, evitando en la medida de lo posible sistemas complejos de bombeo y circulación, se deberá usar la fuerza de gravedad como principal medio para la circulación del agua; el diseño del humedal deberá tomar en cuenta el paisaje, adaptando el humedal a este, se diseñará tomando en cuenta los extremos en temperaturas y climas, como sequías, inundaciones y tormentas [37].

V.VII. Análisis fisicoquímicos

Para poder llevar a cabo un buen diseño de un humedal artificial es necesario hacer análisis fisicoquímicos del agua residual, de manera que se pueda conocer con exactitud la cantidad y el tipo de contaminantes presentes. Como se comentó en la revisión de las metodologías de diseño de humedales artificiales, los contaminantes presentes en el agua a tratar son importantes, puesto que de ellos depende que área de tratamiento será necesario tener para removerlos. Así mismo en lo revisado anteriormente se encontró que los contaminantes más importantes a la hora de diseñar un humedal artificial son: demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nitratos (N-NO_3), amonio (N-NH_4), nitrógeno total (Nt) y fosforo total (Pt).

La demanda bioquímica de oxígeno o DBO_5 se define como el oxígeno utilizado, durante un tiempo de incubación especificado, para la degradación bioquímica de materia orgánica, así como para la oxidación de sulfuros y el ion ferroso. Puede medir también el oxígeno utilizado para oxidar las formas reducidas del nitrógeno, a menos que se impida esta oxidación mediante un inhibidor [38]. Su importancia radica en que un aumento de la DBO_5 en un cuerpo de agua provoca la disminución del contenido de oxígeno disuelto en el mismo, creando condiciones de falta de oxígeno que pueden dañar a las comunidades biológicas de los ecosistemas acuáticos.

El nitrógeno, junto con el fosforo son elementos benéficos para el medio ambiente puesto que constituyen una fuente de nutrientes para las plantas. Sin embargo, estos elementos se encuentran en gran cantidad en el agua residual y en caso de

que esta agua residual no reciba un tratamiento adecuado, estos nutrientes en exceso pueden provocar un enorme daño en los ecosistemas acuáticos, al crear un proceso de eutrofización. Este proceso es el crecimiento desmedido de vegetación acuática, que priva de luz solar a los organismos que dependen de esta, también disminuye la cantidad de oxígeno disuelto en el agua y aumenta la retención de sedimentos. Es por esto por lo que la remoción de nitrógeno y fósforo es de importancia en el tratamiento de agua residual. En los humedales artificiales la cantidad de nitrógeno y fósforo es una variable que influye en el diseño de estos. Por esta razón es necesario un análisis fisicoquímico previo al diseño, puesto que el área de tratamiento cambiará de acuerdo con el tipo de contaminante principal que será removido.

V.VIII. Eficiencia energética en el tratamiento de aguas residuales

Dentro de una planta de tratamiento de aguas residuales se tienen varios procesos que necesitan de energía eléctrica para funcionar. Estos procesos pueden ser sistemas de bombeo, recirculación, aireación y mezclado del agua residual para poder ser tratada. La demanda de energía para el tratamiento de agua residual está en aumento, se estima que para el año 2060 habrá un aumento de hasta el 60% de demanda de energía debido al aumento en la cantidad de agua contaminada que necesitará tratamiento [39]. En México se usa un aproximado del 5.4% de la energía consumida en el país para el sector público, que incluye el bombeo de agua potable y el tratamiento de agua residual, lo cual equivale a 8.03 TWh. Este consumo es menor comparado con otros países como Estados Unidos, que gasta un aproximado de 24 TWh, o China, con 21.58 TWh. Sin embargo, estos datos de consumo no toman en cuenta que muchas plantas de tratamiento a lo largo del país no se encuentran operando debido principalmente a la falta de mantenimiento y a los altos costos de operación, los cuales son principalmente el pago de la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de la planta de tratamiento [40].

Dentro de una planta de tratamiento convencional el sistema que consume la mayor cantidad de energía son los sistemas de aireación con un aproximado del 60-70%, seguido de los sistemas de bombeo con un 8%, sistemas de iluminación con un 8% y finalmente los digestores con un 8% [41]. Estos consumos podrían variar de

acuerdo con el tipo de sistema utilizado, pero es una guía acerca del consumo energético en las plantas de tratamiento. La cantidad de energía que utiliza una planta de tratamiento será afectada por varios factores como el caudal tratado, el grado de contaminación del agua, la antigüedad de la planta y el manejo de esta. La Tabla 2 muestra una comparación entre diversos tipos de tratamiento y su consumo energético por m³ de agua tratada y por kilogramo de DQO removido.

Tabla 2 Consumo energético por m³ de agua tratada y por kilogramo de DQO removido de varias tecnologías de tratamiento. Fuente: Huella energética en el ciclo integral del agua. 2016

Tecnología	Consumo energético kWh*m³	Consumo energético kWh*kgDQO
Oxidación total	0.23	0.81
Lodos activados con digestión anaerobia	0.73	1.51
Lodos activados con digestión aerobia	0.55	2.14
Humedales artificiales	0	0

Cabe destacar que estos consumos energéticos solo se refieren al tratamiento del agua residual, sin tener en cuenta el tratamiento de los desechos generados en este tipo de sistemas, que tienen que llevar un tratamiento especial.

Se han llevado a cabo estudios donde proponen el uso de cogeneración energética usando los gases producidos en el tratamiento para poder tener una autosuficiencia energética de las plantas, lo cual soluciona el problema del gasto energético, sin embargo, aplicar este tipo de tecnologías requiere de una inversión mayor en el diseño y construcción de la planta, así como una operación más compleja que requiere de personal capacitado.

En nuestro país solo las ciudades más grandes, así como inversores privados, tienen los recursos necesarios para un proyecto de esta magnitud. En comunidades más pequeñas se requiere de soluciones de bajo costo, bajo consumo energético y fácil operación. Es por esto que los humedales artificiales son la opción más viable para solucionar la problemática de la falta de tratamiento del agua residual. Un

humedal diseñado correctamente no utiliza energía eléctrica más que para los sistemas de iluminación, puesto que se confía en la gravedad para poder mover el agua residual de un lado a otro. En caso de ser necesario se puede utilizar sistemas de bombeo, los cuales podrán ser alimentados con fuentes renovables de energía, como sistemas fotovoltaicos. Por estas razones los humedales artificiales son una opción energéticamente viable, al no tener un consumo eléctrico en su funcionamiento.

V.IX. Humedales artificiales y producción de energía

Como se ha mencionado anteriormente, los humedales artificiales son un ecosistema, en donde la principal fuente de energía para que este funcione es el sol, el cual, además de permitir el crecimiento de vegetación y de bacterias, también influye en la temperatura del agua. Por lo tanto, se puede decir que un humedal, ya sea artificial o natural, utiliza energía renovable. La utilización de energía renovable en los sistemas de tratamiento incluye tanto la energía usada en los propios sistemas de tratamiento, así como la energía que puede extraerse de estos sistemas. Uno de los elementos más importantes en una planta de tratamiento de aguas residuales, ya sea convencional o en un humedal natural, es el pretratamiento del efluente, donde uno de los sistemas usados son los biodigestores, mediante los cuales se permite que los lodos presentes en el efluente sean sedimentados y gracias a un proceso de digestión anaerobia, se genera metano [31]. Los biodigestores al ser un sistema que no requiere de mucha energía para funcionar se convierten en un excelente generador de energía, puesto que el metano generado, al ser usado para generar energía eléctrica mediante generadores eléctricos puede disminuir hasta en un 60% el consumo de energía eléctrica proveniente de la red. Por otra parte, el uso de paneles fotovoltaicos para generar electricidad es también bastante común, puesto que son relativamente baratos y fáciles de instalar, como se muestra en la Figura 2. En México hay 11 PTAR con paneles fotovoltaicos instalados, con una capacidad instalada de 2.93 MWh, disminuyendo el consumo energético de la red entre un 15 y 100% [42].



Figura 2 Ejemplo de una planta de tratamiento usando paneles fotovoltaicos, Connecticut, USA. Fuente: Greenskies Renewable Energy.

Así mismo existen otras formas de aprovechar el agua residual con fines energéticos, algunos ejemplos son:

- Intercambiadores de calor: aprovechando la temperatura constante de las aguas residuales en una planta de tratamiento se puede usar una bomba de calor, que mediante una transferencia de energía térmica puede intercambiar calor de forma que enfríe o caliente el ambiente.
- Energía hidráulica: aprovechando el caudal constante de salida de las plantas de tratamiento es posible instalar pequeñas centrales hidroeléctricas para generar electricidad que puede ser usada en la propia planta de tratamiento o ser inyectada en la red eléctrica [43].

V.X. Producción y aprovechamiento de biomasa en humedales artificiales

Una planta de tratamiento de aguas residuales puede usar la composición química del agua tratada para obtener productos que tengan utilidad energética, principalmente biogás obtenido a partir de los sistemas anaerobios usados en los

tratamientos secundarios. La cantidad de biogás producido varía dependiendo de factores como temperatura, cantidad de materia orgánica disponible en el caudal tratado, caudal de entrada al sistema, etc. Este biogás puede ser usado en la propia planta de tratamiento para suplir su demanda energética, para la distribución del gas para su venta y para su uso en la generación de energía eléctrica para inyectar a la red [43].

Los humedales artificiales, a parte de su función de remoción de contaminantes del agua residual, son sistemas integrales que pueden ser usados para otros fines. Uno de sus beneficios adicionales es la producción de biomasa, producto de la vegetación plantada en el mismo. Las especies vegetales usadas en los humedales artificiales pueden ser usadas para otros fines alternativos a la remoción de contaminantes, como su uso como vegetación ornamental para mejorar el aspecto visual, para la producción de plantas florales para su venta y finalmente como cultivos energéticos para la producción de biomasa destinada para biocombustible. Entre las especies que pueden ser usadas para la producción de biomasa y para su uso en humedales artificiales, está la especie *Arundo donax* (Figura 3). Esta especie, originaria del este de Asia, tiene un alto crecimiento anual, una alta adaptabilidad a variedad de climas, una alta resistencia a condiciones adversas, un bajo coste de producción y en el caso de su uso en humedales artificiales, tiene una alta eficiencia de remoción de contaminantes [44].



Figura 3 *Arundo donax*. Fuente: Wikimedia Commons.

Estudios realizados muestran que la combinación del uso de *Arundo donax* en el tratamiento del agua residual y su posterior cosecha para la producción de biomasa es viable. Se ha encontrado que su cultivo usando agua residual en lugar de agua no contaminada como principal fuente de riego, mejora la cantidad de biomasa producida [45].

Si comparamos esta especie con cultivos energéticos tradicionales como maíz, sorgo y centeno, se observa que tiene ventajas en cuanto a la cantidad de biomasa producida por hectárea, sobre todo en climas templados y cálidos donde puede crecer sin restricciones de cambios de temperatura bruscos. Entre los principales usos como biomasa se encuentran:

- **Biogás:** *A. donax* puede ser usado eficientemente para la producción de biogás en sustitución o integración con los cultivos energéticos tradicionales. Si bien tiene un menor potencial de biogasificación anaeróbica, su productividad por hectárea determina que su producción de biogás es mayor a los cultivos energéticos tradicionales.
- **Bioetanol:** La segunda generación de bioetanol es obtenida a partir de materiales lignocelulocicos, los cuales son abundantes en *A. donax* debido a su composición a partir de fibras duras. Se ha reportado que la especie puede producir alrededor de 11,000 lts de bioetanol por hectárea.
- **Biocombustible:** *A. donax* puede ser usado para combustión, aunque en este aspecto presenta algunos problemas como una elevada producción de cenizas, la liberación de algunos compuestos químicos tóxicos y un alto nivel de humedad. Sin embargo, se ha propuesto su procesamiento en pellets para una mejor combustión [46]

Así mismo cabe mencionar que los residuos generados por el aprovechamiento de la biomasa pueden ser aprovechados a su vez para la producción de fertilizantes orgánicos.

En general la especie *A. donax* tiene enormes ventajas como cultivo energético, lo cual ayuda a la idea de usar a los humedales artificiales como sistemas integrales que incluyan diversos procesos interconectados entre sí para poder resolver diversas problemáticas. Un diseño que pueda incluir el tratamiento de agua residual,

la producción de biomasa, la generación de energía, la reforestación y la creación de zonas verdes y áreas de esparcimiento.

V.XI. Metodologías de diseño de humedales artificiales

Existen varias metodologías para el diseño de humedales artificiales, que nos ayudan a diseñar de acuerdo las condiciones específicas del sitio de construcción. Gracias a esto podemos obtener datos valiosos como: largo, ancho, profundidad, área de tratamiento y tiempo de residencia. Estos datos son necesarios para poder tener un diseño que cumpla con los requisitos deseados de calidad de agua en la salida del humedal.

Una de las metodologías que se usaran es la que propone la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) que está basada a su vez en la metodología de la Agencia para la Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos (EPA), así como la propuesta por los investigadores Kadlec y Knight. La metodología propuesta por la CONAGUA se basa en una ecuación derivada del modelo de cinética de primer orden y considera a los humedales como reactores biológicos cuyo rendimiento se puede aproximar al descrito en un reactor de flujo a pistón. La CONAGUA se propone con esta metodología a reducir los sólidos suspendidos totales (SST) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) principalmente, sin contemplar la eliminación del nitrógeno total ni los fosfatos. Sin embargo, nos ofrece a cambio un diseño muy completo del humedal que incluye largo, ancho, profundidad del medio, profundidad del agua, inclinación, cantidad de plantas por m² y tiempo de residencia. Es por tanto una metodología muy completa, cuya única desventaja es que no contempla la remoción de muchos contaminantes.

La principal ecuación de este modelo es la siguiente:

$$A_S = \frac{Q(\ln C_0 - \ln C_e)}{K_{v,T} D_M n} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde

- A_S = Área superficial del humedal m²

- Q = Caudal de entrada, $m^3 \cdot d^{-1}$
- C_0 = Concentración de DBO en afluente $mg \cdot l^{-1}$
- C_e = Concentración de DBO en efluente $mg \cdot l^{-1}$
- $K_{v,T}$ = Constante cinética de primer orden, d^{-1}
- D_m = Propuesta de profundidad del lecho, m
- n = Porosidad del medio

La constante cinética de primer orden se corrige de acuerdo con la temperatura promedio del agua, mediante la ecuación de Arrhenius de la siguiente forma:

$$K_{vT} = K_{v,20} \theta^{T-20} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

- $K_{v,20}$ = Constante de temperatura a 20°, este valor es de 1.104 d^{-1}
- θ = Coeficiente de Arrhenius, para HFSS el valor es de 1.06
- T = Temperatura promedio del agua °C

Estas dos ecuaciones son las que nos van a permitir obtener un diseño detallado de un humedal artificial, con el área obtenida podemos calcular el largo y el ancho del humedal, así como la profundidad de este. La metodología de la CONAGUA divide el humedal en diferentes zonas dependiendo de su funcionamiento en el tratamiento del agua, estas son: zona de entrada, zona inicial de tratamiento que equivale al 30% del total de la zona de tratamiento, zona final de tratamiento que corresponde al 70% del total de la zona de tratamiento y la zona de salida. Así mismo, dependiendo la zona, la elevación del fondo del humedal va a variar, así como la profundidad del agua. Para poder empezar a calcular estos datos se debe empezar por calcular la conductividad hidráulica, que define con que facilidad el sustrato dejara pasar el agua.

$$K_S = 12600 D_g^{1.9} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde D_g es el diámetro de la grava multiplicada por 10% que es la cantidad de la grava que es de menor tamaño. Con la conductividad hidráulica se procede a calcular el ancho mínimo del humedal con la siguiente ecuación:

$$w = \left(\frac{QA_1}{K_{s,1\%}d_{hi}D_{w,0}} \right)^{0.5} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

- w = ancho mínimo del humedal, m
- Q = caudal de entrada del humedal, $m^3 \cdot d^{-1}$
- A_1 = Área inicial de tratamiento, m^2
- $K_{s,1\%}$ = Conductividad hidráulica, multiplicada por 1%, $\frac{m^3}{m^2 d}$
- d_{hi} = Pérdida de carga máxima en zona inicial, equivalente al 10% de la profundidad propuesta del sustrato, m
- $D_{w,0}$ = Propuesta de profundidad del agua en la zona inicial, m

Una vez que se obtiene el ancho del humedal, se puede calcular la longitud de este, la cual estará dividida en dos, la longitud de la zona inicial de tratamiento y la longitud de la zona final de tratamiento. Las ecuaciones necesarias son las siguientes:

$$L_i = \frac{A_i}{w} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$L_f = \frac{A_2}{w} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

- L_i = Longitud de la zona inicial de tratamiento, m
- L_f = Longitud de la zona final de tratamiento, m
- A_1 = Área de la zona inicial de tratamiento, m^2
- A_2 = Área de la zona final de tratamiento, m^2
- w = Ancho mínimo del humedal, m

La suma de estas dos longitudes será la longitud total de humedal. La CONAGUA recomienda una relación largo-ancho de 2:1 para un funcionamiento eficiente del humedal y propone que, en caso de ser necesario, se divida el ancho del humedal de tal forma que se obtengan celdas con la relación deseada. Finalmente, se tiene

que hacer la observación que la zona de entrada del humedal deberá tener un mínimo de 2 m, mientras que la zona de salida del humedal deberá tener un mínimo de 1 m, esto es para evitar problemas de sedimentación, taponamiento de tubería, así como una mayor facilidad en el mantenimiento.

Por otra parte, como se comentó anteriormente, esta metodología también nos provee de varias fórmulas para poder calcular las diferentes elevaciones, profundidades del agua y profundidades del medio, las cuales no serán de relevancia para el prototipo a escala que será construido, debido al tamaño de este, por lo que no serán tomadas en cuenta.

El último dato que nos proporciona esta metodología es el tiempo de residencia hidráulica, que es el tiempo necesario para que el agua pueda tener un tratamiento adecuado que cumpla con lo establecido en el diseño.

$$TRH_{nominal} = \frac{nD_{WF}}{\left(\frac{Q}{A}\right)} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

- $TRH_{nominal}$ = Tiempo de residencia hidráulico, días
- n = Porosidad del medio
- D_{WF} = Propuesta de profundidad del agua, m
- Q = Caudal de entrada, $m^3 \cdot d^{-1}$
- A = Área superficial del humedal, m^2

Como se ha visto, esta metodología es bastante completa, y como se mencionó anteriormente, su único defecto es no contemplar en su diseño la remoción de otros contaminantes. Es por esto por lo que se complementara con la metodología de la CONAGUA con la propuesta por Kadlec y Knight. Esta metodología considera a los humedales como un sistema biológico donde la proliferación de microorganismos da lugar a la producción de materia orgánica nueva, parte de la cual quedara retenida en el propio humedal, empeorando su rendimiento con el tiempo. Esta materia orgánica se define como concentración residual o concentración de fondo y al contrario de la metodología de la EPA, la temperatura no influye en el diseño. Por

otra parte, esta metodología da lugar a mayores necesidades de área superficial para el tratamiento del agua, esta área dependerá del tipo de contaminante.

La fórmula general de este modelo es la siguiente:

$$\ln \left(\frac{C_e - C^*}{C_0 - C^*} \right) = \frac{-K_T}{HLR_A} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

- C_e = Concentración del efluente deseada, $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$
- C_0 = Concentración del afluente, $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$
- C^* = Concentración de fondos, $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$
- K_T = Constante de primer orden dependiente de la temperatura, $\text{m} \cdot \text{año}^{-1}$
- HLR_A = Carga hidráulica, $\text{m} \cdot \text{año}^{-1}$

A partir de esta ecuación se puede obtener una expresión para obtener el área requerida para un contaminante en particular. Para ello se tiene que reordenar la Ecuación 8 de la siguiente forma:

$$\ln \left(\frac{C_e - C^*}{C_0 - C^*} \right) = \frac{-K_T}{HLR_A} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde $HLR_A = \frac{Q_d \cdot 365}{A_S}$, por lo que sustituyendo en la Ecuación 9 se tiene:

$$\ln \left(\frac{C_e - C^*}{C_0 - C^*} \right) = \frac{-K_T}{\left(\frac{Q_d \cdot 365}{A_S} \right)} \quad \text{Ecuación 10}$$

Despejando A se obtiene:

$$A_S = \frac{365 \cdot Q}{K_T} * \ln \left(\frac{C_0 - C^*}{C_e - C^*} \right) \quad \text{Ecuación 11}$$

Con esta ecuación se puede calcular el área necesaria para el tratamiento de un contaminante en particular. En cuanto a la constante K_T , esta puede ser corregida con respecto a la temperatura de la siguiente forma:

$$K_T = K_{20} \theta^{T-20} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

- K_T = Constante de primer orden dependiente de la temperatura, $m \cdot \text{año}^{-1}$
- K_{20} = Constante de primer orden a 20 °C, $m \cdot \text{año}^{-1}$
- θ = Factor de corrección de temperatura
- T = Temperatura promedio del agua, °C

Siendo esta constante la encargada de la variación del área superficial del humedal dependiendo del contaminante a tratar, puesto que K_{20} y θ varían dependiendo el contaminante. Para el calculo de esta constante se usa la Tabla 3 la cual recopila estos parámetros.

Tabla 3 Valores de K_{20} , θ y C^* para distintos contaminantes en HAFSS. Fuente: Rabat, Blázquez J. Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración. 2016.

	SST	DBO ₅	NO _{RG}	N-NH ₄	N-NO ₃	N _T	P _T
K_{20}	1000	180	35	34	50	27	12
θ	1.065	1	1.05	1.04	1.09	1.05	1
C^*	$7.8 + 0.063C_0$	$3.5 + 0.053C_0$	1.5	0	0	1.5	0.02

Gracias a este modelo, ahora es posible diseñar un humedal artificial que pueda remover varios contaminantes de manera efectiva, al contrario que la metodología de la CONAGUA, donde se enfocaba principalmente en la remoción de DBO y SST. Así mismo, se pueden ocupar las ecuaciones del modelo de la CONAGUA para obtener las medidas del humedal y el tiempo de residencia hidráulica, teniendo de esta forma un modelo completo tanto en la parte de remoción de contaminantes como en la parte de diseño de las dimensiones.

Para finalizar y como se mencionó anteriormente, esta metodología arroja áreas de tratamiento mayores que las arrojadas por la CONAGUA, siendo el N_T el contaminante que tiende a requerir la mayor cantidad de área para su remoción, por lo que es un dato para tener en cuenta por si no se cuenta con el suficiente espacio para su construcción. Por otra parte, el P_T tiende a requerir un área aun mayor que el N_T, por lo que se recomienda usar otro tratamiento alternativo o en conjunto para poder remover de manera eficiente el fosforo.

VI. Metodología

La investigación se dividió en un muestreo y análisis fisicoquímico del agua residual a tratar en la construcción y puesta en marcha del prototipo de humedal artificial usando la información recopilada en la revisión bibliográfica.

VI.I. Muestreo del agua residual

El muestreo del agua residual se llevó a cabo en las inmediaciones de la planta de tratamiento de agua del municipio de Tehuiztzingo. Debido a las condiciones de abandono en las que se encuentra dicha planta (Figura 4), la tubería que conduce las aguas residuales recolectadas por el sistema de drenaje se encuentra rota, como se muestra en la Figura 5. Esto provoca que el agua residual sea descargada directamente en una barranca, donde forma una corriente de agua que nunca se seca, como se ve en la Figura 6, lo que afecta a la población que vive cerca con su olor y proliferación de fauna nociva.



Figura 4 Estado actual de la planta de tratamiento del municipio de Tehuiztzingo. Fuente: Autoría propia.

La toma de muestras se realizó en la corriente formada por el agua residual que sale de la tubería rota (Figura 5). Se ocuparon 2 recipientes de plástico con tapa hermética y capacidad de 1 litro cada uno, se usaron guantes de látex y cubrebocas como medidas de seguridad a la hora de tomar las muestras. Estas se mantuvieron

a una temperatura de 20 °C durante su traslado del municipio de Tehuizingo hasta el laboratorio de Química Ambiental del ICUAP en Ciudad Universitaria, Puebla.



Figura 5 Descarga de aguas residuales debido a una tubería rota. Fuente: Autoría propia.



Figura 6 Corriente de aguas residuales formada por la descarga de estas. Fuente: Autoría propia.

VI.II. Análisis fisicoquímicos

Una vez que las muestras se llevaron al laboratorio, se procedió a realizar un análisis fisicoquímico para obtener una caracterización del agua a tratar. Los equipos usados para este fin se encuentran en la Tabla 4, donde se puede observar el nombre del equipo, el parámetro que mide, el rango de medición de este y las unidades de medición que utiliza.

Tabla 4 Equipos usados en los análisis fisicoquímicos. Fuente: Autoría propia.

Parámetro	Equipo	Rango de medición
DBO ₅	OxiTop	0-2000 mg*l ⁻¹
Nitrógeno total	Spectroquant Nova 60	10-150 mg*l ⁻¹
Fosforo		3-100 mg*l ⁻¹
DQO		25-1500 mg*l ⁻¹
Turbidez	Fotómetro SQ118	10-400 UNF
pH	Oakton pH/CON 510 series	-2 a 16 pH
Conductividad		0-1999 μS
Solidos Disueltos Totales		0-999 ppm
Oxígeno Disuelto	HANNA HI9146	0.0-45 ppm

VI.II.I Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO₅)

El equipo OxiTop para la medición de DBO₅, consta de 2 equipos importantes, el sensor de medición y la caja incubadora como se muestran en la Figura 7 y Figura 8, los cuales en conjunto logran medir la DBO₅. El sensor se encarga de medir las variaciones de presión dentro de las botellas con muestra, mientras que la caja incubadora se encarga de mantener una temperatura estable durante el tiempo que dure la medición.



Figura 7 Caja de incubación para DBO₅. Fuente: Autoría propia.



Figura 8 Sensor para medición de DBO₅. Fuente: Autoría propia.

VI.II.II Nitrógeno total, fósforo, Demanda Química de Oxígeno (DQO) y turbidez

Para los siguientes parámetros se utilizó el equipo Spectroquant Nova 60 (Figura 9), el cual es un fotómetro que mide la longitud de onda de la luz que pasa a través de un tubo de ensayo con la muestra y diferentes reactivos. Estos reactivos vienen preparados y listos para usarse en kits como el que se muestra en la Figura 10, los cuales contienen los reactivos necesarios para medir determinado elemento en una determinada concentración, haciendo más fácil y rápido su medición.

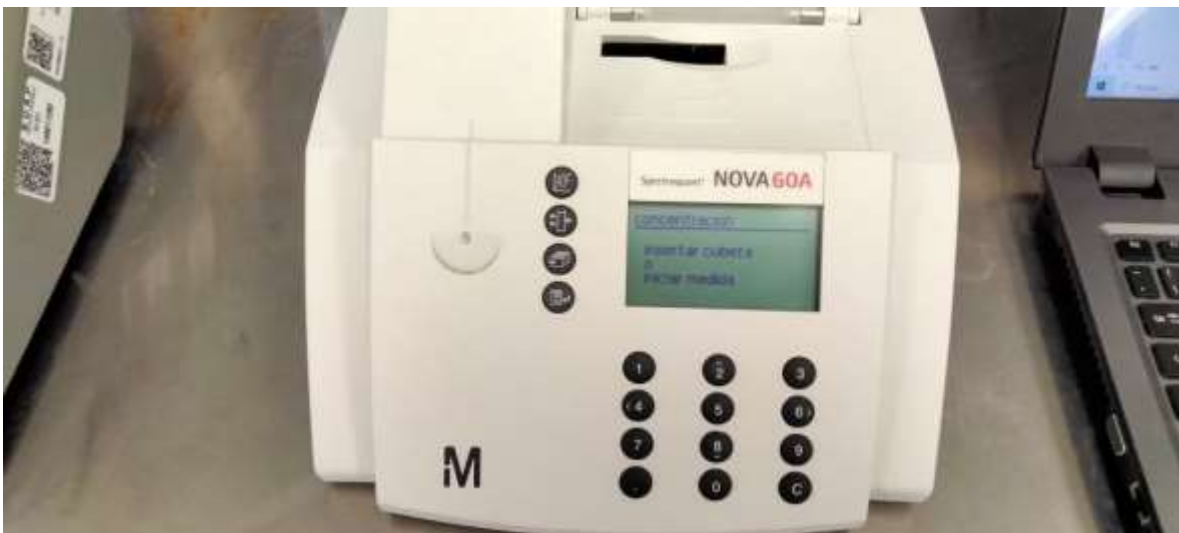


Figura 9 Fotómetro Spectroquant Nova 60 para medición de concentración de contaminantes. Fuente: Autoría propia.



Figura 10 Kit de análisis de nitrógeno total, con los reactivos necesarios para su medición en el fotómetro. Fuente: Autoría propia.

VI.II.III pH, conductividad eléctrica y solidos disueltos totales

Para la medición de estos parámetros se utilizó el equipo de medición Oakton pH/CON 510 (Figura 11), el cual nos permite medir pH, conductividad eléctrica y solidos disueltos totales. El equipo usa un electrodo y un sensor de temperatura para tomar la medición, y puede usarse el mismo electrodo para medir pH, conductividad eléctrica, solidos disueltos totales y temperatura.



Figura 11 Equipo Oakton pH/CON 510 para medición de pH, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales. Fuente: Autoría propia.

VI.II.IV Oxígeno disuelto

El equipo usado para la medición del oxígeno disuelto en la muestra de agua residual fue el HANNA HI9146, el cual es un medidor portátil de oxígeno disuelto con un electrodo que debe sumergirse en la muestra.

VII. Resultados

VII.1 Caracterización inicial del agua residual

Se decidió realizar 2 mediciones a diferentes rangos de concentración de DBO_5 , de 0 a $800 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ y de 0 a $2000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ de DBO_5 , debido a que no se conocía con exactitud la concentración de DBO_5 de la muestra. Cada frasco de muestra contaba con un sensor, el cual guardaba el valor de concentración medido diariamente por 5 días. Durante el proceso se notó que la muestra del rango de 0 a $800 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ tuvo un comportamiento inusual, al presentar un valor constante durante los 5 días, por lo que se descartó esos resultados. En cuanto a la muestra con el rango de concentración de 0 a $2000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ se observó una variación del valor a lo largo de los 5 días que duro la prueba, teniendo como resultado final el valor de $750 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$.

Para el caso del nitrógeno total, se usaron 2 kits diferentes, uno con un rango de 10 a $150 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ y el otro con un rango de 0.5 a $15 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$, esto debido a que no se cuenta con un precedente del rango de concentración del agua a analizar. Se siguieron las instrucciones de los kits para poder llevar a cabo la medición en el fotómetro, sin embargo, para el kit con el rango de 0.5 a $15 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ el fotómetro mostro un valor bastante pequeño para la calidad del agua que se estaba analizando, por lo que se concluyó que no era el rango correcto y por tanto ese kit se dejó de usar. Por otra parte, el kit con el rango de 10 a $150 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ mostro valores más acordes con la calidad del agua y se siguió adelante con el procedimiento. Se realizaron varias mediciones a lo largo de 1 hora, para poder obtener un dato más exacto de la concentración de nitrógeno total. El promedio de las mediciones fue de $127.3 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ de nitrógeno total

Para el fosforo, se utilizó el kit con la concentración de 3 a $100 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$, y al igual que con el nitrógeno total, se siguieron las instrucciones para la preparación de la muestra a medir en el fotómetro para posteriormente llevar a cabo una serie de mediciones a lo largo de 30 minutos, que es el tiempo que el kit recomienda antes de que la reacción se desestabilice, la Tabla 5 recoge esos resultados. Se obtuvo un resultado promedio de $56.9 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$.

En el caso de la demanda química de oxígeno (DQO), se utilizó el kit con el rango de 25 a 1500 mg·l⁻¹ y al igual que con los anteriores análisis en el fotómetro, se siguieron las instrucciones correspondientes con ese kit, se realizaron mediciones a lo largo de 1 hora para obtener un resultado constante y se obtuvo como resultado una concentración promedio de 1054.75 mg·l⁻¹.

Para la medición de la turbidez del agua, no se necesitó del uso de un kit especial, solamente fue necesario introducir en el fotómetro la configuración correcta. Se realizó una única medición, que arrojó un resultado de 238 unidades nefelométricas (UNF).

Los últimos parámetros medidos fueron pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y oxígeno disuelto. Para el pH se obtuvo un resultado de 6.89, para la conductividad eléctrica se obtuvo un resultado de 1411 µS, para sólidos disueltos totales se obtuvo un resultado de 700 ppm y para la cantidad de oxígeno disuelto se obtuvo un resultado de 0.00 ppm resultado que tuvo que ser comprobado varias veces debido a que es una cantidad extremadamente baja y que indica un agua en extremo contaminada. En el Anexo 1 se encuentran una lista más detallada de los resultados obtenidos en esta caracterización inicial.

Si se compara los resultados obtenidos en esta caracterización inicial con los parámetros usados para medir la contaminación de cuerpos de agua superficiales de la SEMARNAT y los parámetros máximos permisibles de la CONAGUA se puede observar que el agua a tratar está fuertemente contaminada.

Tabla 5 Comparación con la Norma NOM 001 SEMARNAT 2021 y los indicadores de calidad de agua de la CONAGUA. Fuente: Autoría propia.

Parámetro	Concentración agua residual	Concentración máxima permitida	Clasificación
DQO	1055 mg*l ⁻¹	210 mg*l ⁻¹	Fuertemente contaminada
SST	474 mg*l ⁻¹	84 mg*l ⁻¹	Fuertemente contaminada
N _T	127 mg*l ⁻¹	35 mg*l ⁻¹	Fuertemente contaminada
Fosforo	57.3 mg*l ⁻¹	21 mg*l ⁻¹	Fuertemente contaminada
pH	6.9	6-9	Dentro del rango
DBO	750 mg*l ⁻¹	DBO<3	Fuertemente contaminada
Oxígeno Disuelto	0.0 ppm / 0%	OD>70% y OD<110%	Fuertemente contaminada

VII.II Diseño y construcción del prototipo de humedal artificial

Para diseñar el prototipo de humedal artificial usando la metodología de la CONAGUA complementada por la metodología de Kadlec y Knight, se necesita conocer caudal de entrada, temperatura media, profundidad del medio propuesta, porosidad del medio y concentración de contaminantes.

Para conocer el caudal de entrada, o lo que es lo mismo, el caudal de descarga del agua residual se puso en contacto con el gobierno municipal de Tehuiztzingo, Puebla, para hacer una petición de acceso a la información correspondiente con el sistema de drenaje público. Tras hacer la petición, se tuvo como respuesta la entrega de una copia del título de concesión para la descarga de aguas residuales en el sitio conocido como barranca Tehuiztzingo del año 2008. Este permiso indica un caudal de 715 m³*d⁻¹. La temperatura media se obtuvo de las Normales Climatológica por Estado [47], que es una lista de estaciones meteorológicas por estado manejadas por la CONAGUA. La estación meteorológica de la comunidad de Tejalpa perteneciente a Tehuiztzingo indica una temperatura media de 23.8 °C.

Una vez conocidos estos datos, y conociendo los resultados de los análisis fisicoquímicos se comenzó el diseño del prototipo de humedal artificial, comenzando

por calcular a una escala 1:1. Para empezar, se calculó la constante de primer orden dependiente de la temperatura K_T mediante la Ecuación 12:

$$K_T = K_{20} \theta^{T-20} \quad \text{Ecuación 12}$$

Esta ecuación requiere conocer la constante de primer orden a 20 °C K_{20} y el factor de corrección de temperatura θ , las cuales varían de acuerdo con el tipo de contaminante a remover en el humedal y para calcularlas se utiliza la Tabla 6.

Tabla 6 Valores de K_{20} , θ y C^* para distintos contaminantes en HAFSS. Fuente: Rabat, Blázquez J. Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración. 2016.

	SST	DBO ₅	N _{ORG}	N-NH ₄	N-NO ₃	N _T	P _T
K_{20}	1000	180	35	34	50	27	12
θ	1.065	1	1.05	1.04	1.09	1.05	1
C^*	$7.8 + 0.063C_0$	$3.5 + 0.053C_0$	1.5	0	0	1.5	0.02

Con ayuda de esta Tabla se calcularon las diferentes constantes para nitrógeno total, fosforo total y DBO₅, que son los contaminantes más importantes en el diseño de humedales artificiales de acuerdo con la bibliografía consultada y se obtuvieron los siguientes resultados:

- $K_T N_t = 32.5$
- $K_T P_t = 12$
- $K_T DBO_5 = 180$

Una vez que se ha calculado la constante K_T , se utiliza la Ecuación 11 para calcular el área necesaria para la remoción de los contaminantes antes mencionados.

$$A_s = \frac{365 * Q}{K_T} * \ln \left(\frac{C_0 - C^*}{C_e - C^*} \right) \quad \text{Ecuación 11}$$

Para poder calcular el área, se necesita conocer el caudal de entrada, la constante K_T , la concentración de entrada, la concentración deseada en la salida y la concentración de fondo, que puede calcularse con ayuda de la Tabla 6. Una vez conocidos estos datos, se procedió a calcular el área de tratamiento para cada contaminante. La Tabla 7 muestra los resultados.

Tabla 7 Área de tratamiento por contaminante. Fuente: Autoría propia.

Contaminante	Concentración inicial	Concentración final deseada	Área de tratamiento necesaria
Nitrógeno total	127.3 mg*l ⁻¹	25 mg*l ⁻¹	13,471 m ²
Fosforo total	57.2 mg*l ⁻¹	15 mg*l ⁻¹	30,823 m ²
DBO ₅	750 mg*l ⁻¹	30 mg*l ⁻¹	4,738 m ²

A continuación, se calcularon las dimensiones del humedal artificial con las ecuaciones 4, 5 y 6.

$$w = \left(\frac{QA_1}{K_{s,1\%}d_{hi}D_{w,0}} \right)^{0.5} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$L_i = \frac{A_i}{w} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$L_f = \frac{A_2}{w} \quad \text{Ecuación 6}$$

Estas ecuaciones nos ayudan a calcular el ancho mínimo, y el largo en la zona inicial y zona final, respectivamente. Podemos notar que el ancho es la medida que nos ayudara a calcular el largo, por lo que empezamos por calcular el ancho mínimo, para lo cual necesitamos conocer el caudal de entrada, el área inicial, la conductividad hidráulica K_s al 1%, la perdida de carga máxima en zona inicial d_{hi} que equivale al 10% de la profundidad del humedal $D_{w,0}$. Para calcular la conductividad hidráulica se utiliza la ecuación 3.

$$K_s = 12600D_{g10}^{1.9} \quad \text{Ecuación 3}$$

El resultado tras aplicar estas ecuaciones se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8 Dimensiones del humedal por contaminante. Fuente: Autoría propia.

Contaminante	Ancho mínimo	Largo en zona inicial	Largo en zona final	Largo total
Nitrógeno total	610 m	15.4 m	6.62 m	22.02m
Fosforo total	923 m	23.37 m	10.01 m	33.38 m
DBO ₅	362 m	9.16 m	3.92 m	13.08 m

Una vez obtenidas el área de tratamiento y las dimensiones del humedal a escala para cada contaminante, se eligió el área para el nitrógeno como el principal contaminante a remover, debido a que el fosforo ofrece un área demasiado grande mientras que el DBO₅ ofrece un área más pequeña. Sin embargo, se debe notar que el uso de las ecuaciones para encontrar las dimensiones del humedal dio como resultado dimensiones bastante dispares, que pueden ser arregladas mediante un arreglo de celdas, dividiendo el ancho de tal forma que se obtenga una relación 2:1 entre ancho y largo.

Ahora se aplicará una escala en los resultados anteriores para poder construir el prototipo a escala. Para esto se modificará el caudal de entrada en función de la escala elegida, para el caso del área de tratamiento y para las dimensiones se modificará la profundidad del medio a la profundidad presente en el recipiente que se usará para el humedal. De esta forma se tienen los siguientes resultados (Tabla 9):

Tabla 9 Escalas aplicadas en el caudal de entrada y su relación con el área de tratamiento. Fuente: Autoría propia.

Escala	Caudal de entrada	Área de tratamiento
1:1	715 m ³ *d ⁻¹ o 715000 lt*d ⁻¹	13,471 m ²
1:100	7.15 m ³ *d ⁻¹ o 7150 lt*d ⁻¹	134.71 m ²
1:1000	0.715 m ³ *d ⁻¹ o 715 lt*d ⁻¹	13.47 m ²
1:10000	0.0715 m ³ *d ⁻¹ o 71.5 lt*d ⁻¹	1.3472 m ²
1:100000	0.00715 m ³ *d ⁻¹ o 7.15 lt*d ⁻¹	0.1347 m ²

Se eligió la escala más pequeña, debido al caudal de entrada, que al ser de solo $7.15 \text{ l} \cdot \text{d}^{-1}$, es manejable para el transporte del agua residual del sitio de muestreo al sitio de construcción del humedal.

Las dimensiones del prototipo del humedal se presentan en la Tabla 10:

Tabla 10 Dimensiones teóricas del prototipo de humedal artificial. Fuente: Autoría propia.

Área	Ancho mínimo	Largo en zona inicial	Largo en zona final	Largo total
0.1347 m ²	4.63 m	0.008 m	0.02 m	0.028 m

Se aprecia que la metodología de la CONAGUA, al aplicarla a una escala pequeña, da como resultado dimensiones difíciles de aplicar, es poco viable armar un prototipo con esas dimensiones. Se decidió encontrar dimensiones que dieran el área necesaria al mismo tiempo que cumplieran con la relación 2:1 necesaria que nos indica la metodología. Estas dimensiones son 38 cm de largo, por 36 de ancho, con estas dimensiones se pueden hacer 2 celdas de 38 cm de largo por 18 cm de ancho, lo cual cumple con la relación 2:1 que nos indica la metodología.

Con estos datos se eligió una caja de plástico que cumple con las medidas y que además deja espacio para las zonas de entrada y salida, que no están contempladas en el cálculo anterior. Estas zonas tendrán una longitud de 12 cm cada una. Para la profundidad del humedal, se tomó una profundidad de 25 cm, la cual es suficiente para un prototipo a esta escala de acuerdo con otros trabajos similares.

Para alimentar el humedal se colocó un recipiente de plástico de 50 litros junto con un sistema de riego por goteo que garantizara el caudal deseado, además de instalar llaves de paso para la toma de muestras del agua residual que entra. El caudal calculado para cada celda es de 3.5 litros por día, para un total de 7 litros día para el sistema completo. Para calcular el tiempo de residencia hidráulica, el cual es el tiempo que pasara el agua en el humedal artificial para poder obtener el resultado calculado, se utilizó la ecuación 7, tras sustituir las variables indicadas, el resultado es 1.88 días, o lo que es lo mismo, aproximadamente 45 horas.

$$TRH_{nominal} = \frac{nD_{wF}}{\left(\frac{Q}{A}\right)} \quad \text{Ecuación 7}$$

Tabla 11 Características del prototipo del prototipo de humedal artificial profundo. Fuente: Autoría propia.

Parámetros	Valor
Área total	0.1347 m ²
Ancho total	36 cm
Largo total	38 cm
Ancho de cada celda	18 cm
Área de cada celda	0.684 m ²
Profundidad	25 cm
Caudal de entrada	7.15 l*d ⁻¹
Tiempo de residencia hidráulico	45 horas

A continuación, se muestran los planos del prototipo.

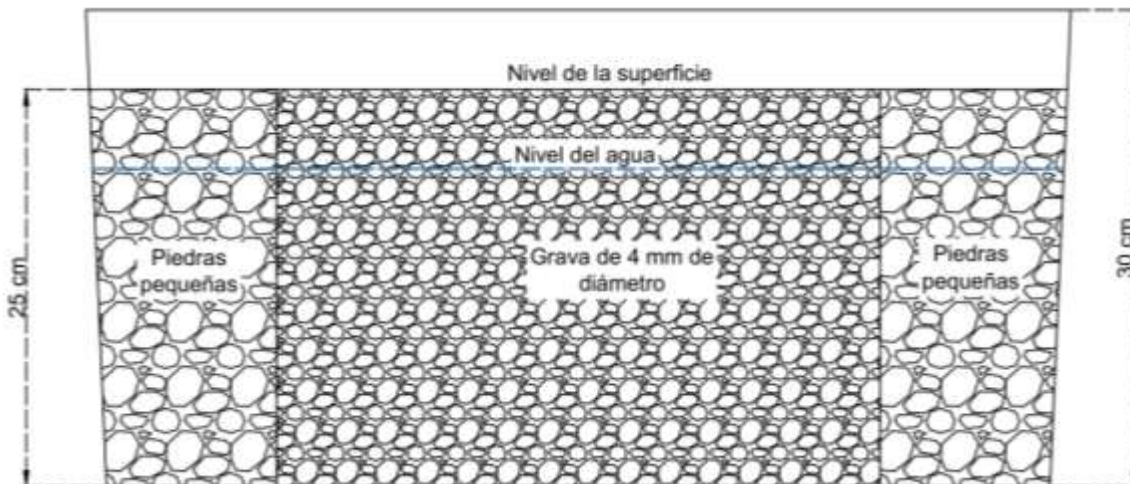


Figura 12 Corte transversal del prototipo de humedal artificial profundo. Fuente: Autoría propia.

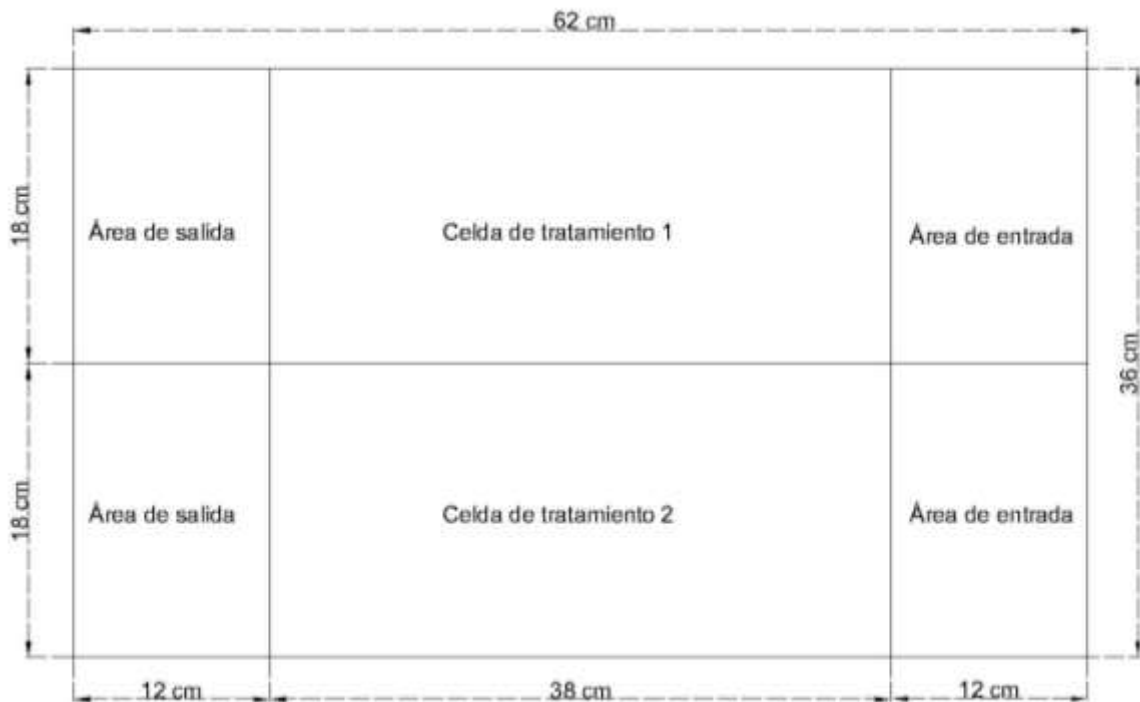


Figura 13 Vista superior del prototipo de humedal artificial profundo. Fuente: Autoría propia.

La construcción del humedal empezó con la colocación de una división estanca que dividiera ambas celdas, esto se realizó con una pieza de policarbonato cortada a la medida. El sustrato elegido fue grava gruesa de 4 mm de diámetro, mezclada con arena fina para un mejor desarrollo de la vegetación, mientras que para las zonas de entrada y de salida del humedal, se colocaron piedras de mayor tamaño, para evitar el taponamiento de tuberías.

La vegetación elegida para el humedal fue la especie *Arundo donax*, conocida en la región como carrizo, la cual ha demostrado estar adaptada al clima de la región, así como ser una planta de rápido crecimiento y que ha sido probada en humedales artificiales en México. Los ejemplares usados fueron recolectados en el municipio, y tras ser sembradas en macetas para el desarrollo de raíces, fueron trasplantados al humedal. Por último, se colocó una caja de plástico a la salida del humedal, para poder recolectar el agua ya tratada.



Figura 14 Colocación de sustrato en la caja de plástico, con la división entre área de tratamiento y zonas de entrada y salida. Fuente: Autoría propia.



Figura 15 Sistema de goteo para garantizar un caudal constante al humedal. Fuente: Autoría propia.

Los primeros días el humedal fue alimentado con agua de lluvia, para que las plantas tuviesen tiempo de adaptarse y desarrollar un sistema de raíces dentro del sustrato. Luego de una semana y tras comprobar que nuevos brotes comenzaban a aparecer, se empezó a alimentar el agua residual.



Figura 16 Humedal terminado. Fuente: Autoría propia.

Durante las primeras semanas se notó que el nivel de agua dentro del humedal no se mantenía a un nivel adecuado. Tras analizar el diseño, se llegó a la conclusión que las mangueras de salida del humedal se encuentran en una posición baja, con lo que el nivel del agua no puede subir por encima de estas. Para resolver esta situación se instaló un recipiente con el fin de crear un sistema de vasos comunicantes, con el cual se logró elevar el nivel de agua del humedal al nivel deseado. De esta forma el sistema quedó como se muestra en la Figura 17.

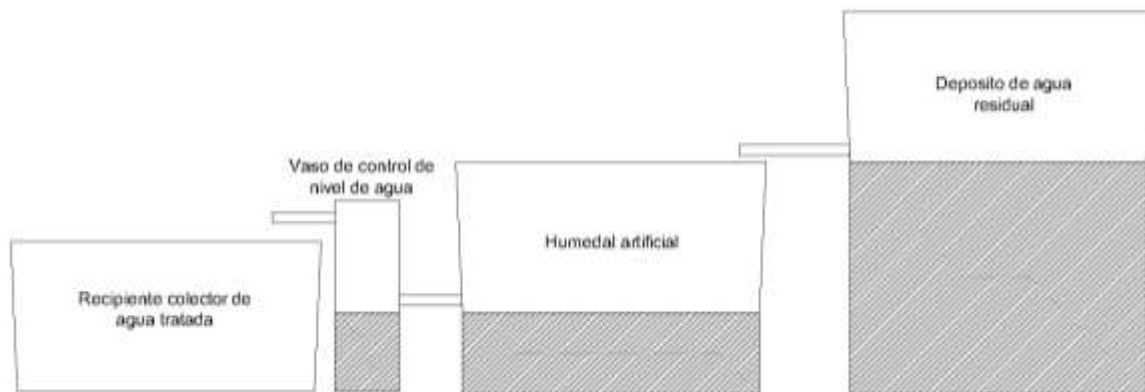


Figura 17 Diseño final de prototipo de humedal profundo. Fuente: Autoría propia.

VII.III Resumen del funcionamiento del prototipo

A continuación, se describe el comportamiento en la remoción de contaminantes del prototipo de humedal profundo.

- **DBO₅**

La Figura 18 muestra el comportamiento que tuvo la remoción de DBO₅ durante el periodo de funcionamiento del prototipo, en términos de concentración y porcentaje de remoción. Podemos observar en la Figura 18.a) que la concentración en el afluente vario con el tiempo, teniendo un máximo de 500 mg·l⁻¹ y un mínimo de 320 mg·l⁻¹. El efluente, por su parte, tuvo un decrecimiento exponencial con el tiempo, empezando con un valor de 390 mg·l⁻¹ para luego mantenerse en alrededor de 20 mg·l⁻¹, siendo este valor de 20 mg·l⁻¹ el valor de la concentración máxima permitida por la normatividad. En la Figura 18.b) podemos observar un crecimiento en el porcentaje de remoción, teniendo un mínimo de 22% hasta alcanzar un máximo de 95.22%, para luego mantenerse estable en 94%.

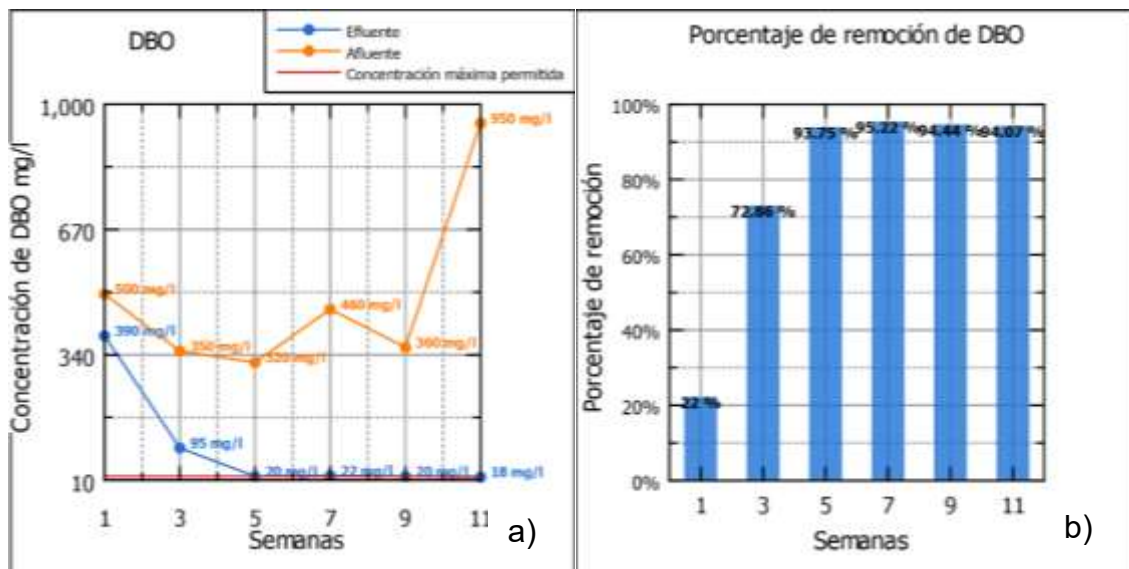


Figura 18 a) Concentración de DBO₅ en afluente, efluente y la concentración máxima permitida por la NOM-001-SEMARNAT 2021 b) Porcentaje de remoción de DBO₅ respecto al tiempo de funcionamiento del prototipo. Fuente: Autoría propia.

El comportamiento en la remoción de DBO_5 en humedales profundos, como explica Silva, 2021 [48], es atribuido a la oxigenación provista por la capa microbiana que crece en las raíces de la vegetación y en el sustrato, donde la expansión de las raíces expande las zonas aerobias. Es por esta razón que mantener el nivel del agua por debajo de la superficie y en contacto con las raíces y el sustrato es vital para una buena remoción de este contaminante. Esto puede verse claramente en las gráficas anteriores, durante las primeras 3 semanas el nivel de remoción no fue tan eficaz debido a que la vegetación seguía creciendo y penetrando en el sustrato con sus raíces, siendo que una vez que las raíces se expandieron lo suficiente, se incrementó el nivel de remoción hasta mantenerse constante. Por otra parte, EPA, 2000 [49], menciona que el límite de remoción de DBO_5 es de $10 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$, debido a los propios residuos orgánicos del sistema. Los resultados son positivos, aunque se encuentran en el límite máximo permitido por la normatividad, por lo que es recomendable un pretratamiento como un reactor anaerobio de flujo ascendente para lograr un nivel menor en la concentración de este contaminante.

- **DQO**

La Figura 19 muestra el comportamiento de remoción de DQO en términos de concentración en $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ y en porcentaje. En la Figura 19.a) podemos observar que la concentración en el afluente tuvo un comportamiento muy variable, teniendo un mínimo de $527 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ y un máximo de $1597.9 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$. El efluente por otra parte tuvo un comportamiento más estable con un máximo de $619.8 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ y un mínimo de $175.4 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$, mientras que el límite máximo permitido por la normatividad es de $210 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$. La Figura 19.b) muestra un crecimiento en el porcentaje de remoción a lo largo del periodo de funcionamiento del prototipo, teniendo una repentina disminución de remoción durante la semana 9 para luego volver a aumentar durante la semana 11.

El comportamiento variable en el afluente es debido a la ausencia o presencia de lluvias durante la toma de muestra, debido a que el agua de lluvia diluye en cierto grado los contaminantes presentes en el agua del afluente y también afecta en el

efluente. Durante la mayor parte del periodo de funcionamiento las lluvias fueron más o menos constantes, teniendo por lo menos una lluvia por semana, sin embargo, desde la semana 7 a la 11, solo llovió 1 vez, antes de tomar la muestra en la semana 9, por tanto, la concentración en el afluente subió de manera drástica. Los mecanismos de remoción de DQO en los humedales profundos son similares a los que afectan en la DBO₅, es decir, la presencia de capas microbianas en raíces y en el sustrato, así que la remoción de este contaminante está ligada al crecimiento de la vegetación. El pico observado durante la semana 9 puede relacionarse con una liberación de la materia orgánica propia del humedal debido a la lluvia caída esa semana. Si bien la semana 9 no tuvo una buena eficiencia de remoción, el porcentaje de remoción tiende a seguir aumentando y posiblemente estabilizarse en 90%, lo que resultaría en una concentración por debajo del límite máximo permitido por la norma. Para poder obtener un nivel aún más aceptable, es recomendable un pretratamiento para disminuir la concentración de DQO en el afluente.

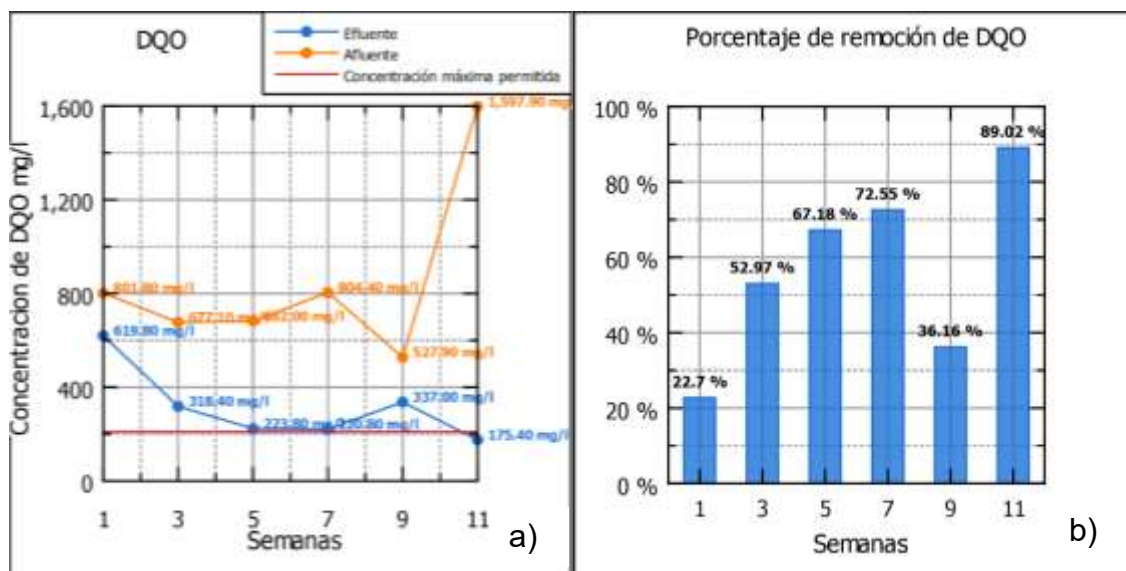


Figura 19 a) Concentración de DQO en efluente, afluente y la concentración máxima permitida por la NOM-001-SEMARNAT-2021 b) Porcentaje de remoción de DQO durante el periodo de funcionamiento del prototipo. Fuente: Autoría propia.

- **Nitrógeno total**

En la Figura 20.a) se muestra el comportamiento en la concentración de nitrógeno total en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ durante el periodo de funcionamiento del prototipo de humedal a escala. En el afluente se observa un comportamiento variable teniendo un mínimo de $37 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ y un máximo de $169 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. En el caso del efluente se observa un comportamiento estable a lo largo del periodo de funcionamiento, teniendo un promedio de $8.67 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, una concentración que se encuentra por debajo del límite máximo permitido por la NOM-001-SEMARNAT-2021 que es de $35 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. La Figura 20.b) muestra el porcentaje de remoción a lo largo del periodo de funcionamiento del prototipo de humedal artificial, teniendo desde un principio un porcentaje alto que fue variando con el tiempo pero que se mantuvo por encima del 75%.

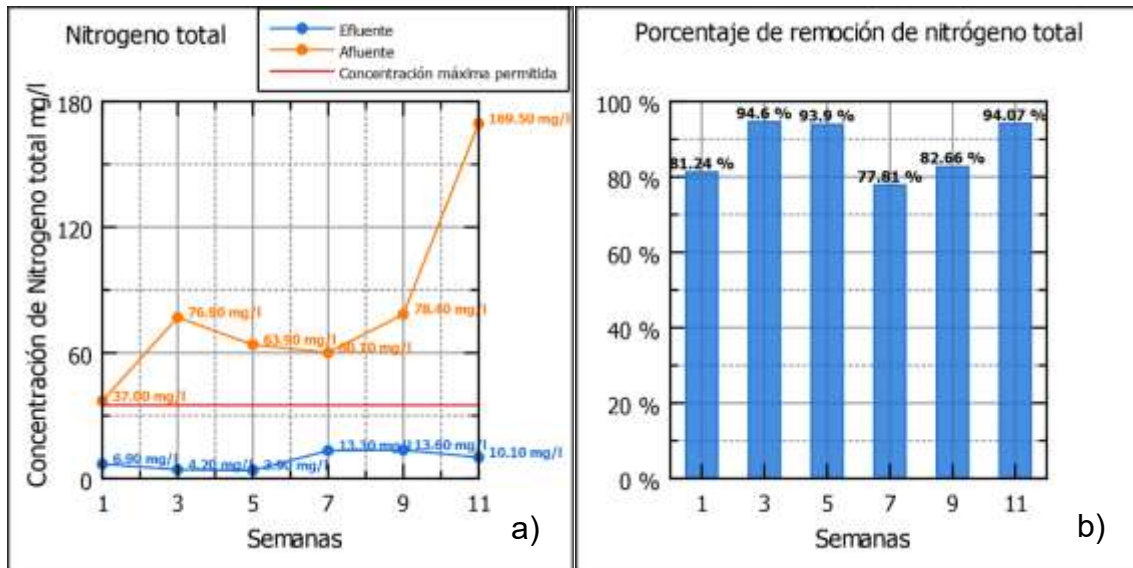


Figura 20 a) Grafica de concentración de nitrógeno total en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ en el afluente, efluente y concentración máxima permitida b) Grafica de porcentaje de remoción de nitrógeno total en el periodo de funcionamiento del prototipo. Fuente: Autoría propia.

La Figura 20.a) muestra que el afluente fue muy variable en su concentración debido a la presencia, siendo que las semanas que llovía tuvieron una concentración más baja que las semanas que no llovía. En el caso del efluente, la concentración se mantuvo constante, aunque se observó que a partir de la semana 7 hubo un aumento en la concentración, probablemente debido a la saturación del sustrato,

algo que el modelo de Kadlec y Knight llaman concentración de fondo, que es una cierta cantidad de contaminante que no es eliminada por el sistema. En cuanto a la Figura 20.b) se observa que el porcentaje de remoción se mantuvo por encima del 75% con un máximo de 94.6%, lo cual es congruente con las características de los humedales profundos, los cuales son muy eficientes para la remoción de nitrógeno. Los niveles de nitrógeno en el efluente se encuentran por debajo del límite máximo permitido por la normatividad, por lo que se demuestra la eficiencia de remoción del prototipo.

- **Fosfatos**

La Figura 21.a) muestra la gráfica de concentración de fosfatos en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ durante el periodo de funcionamiento del prototipo. El afluente muestra un comportamiento variable con un mínimo de $11.76 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ y un máximo de $61.50 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. El efluente tiene un comportamiento similar, con un mínimo de $2.92 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ y un máximo de $36.67 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, mientras que la concentración máxima permitida por la NOM-001-SEMARNAT-2021 es de $35 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. La Figura 21.b) muestra el porcentaje de remoción de fosfatos, el cual varío con el tiempo, con un máximo de 84.09% y un mínimo de 39.85% teniendo un comportamiento variable en el tiempo.

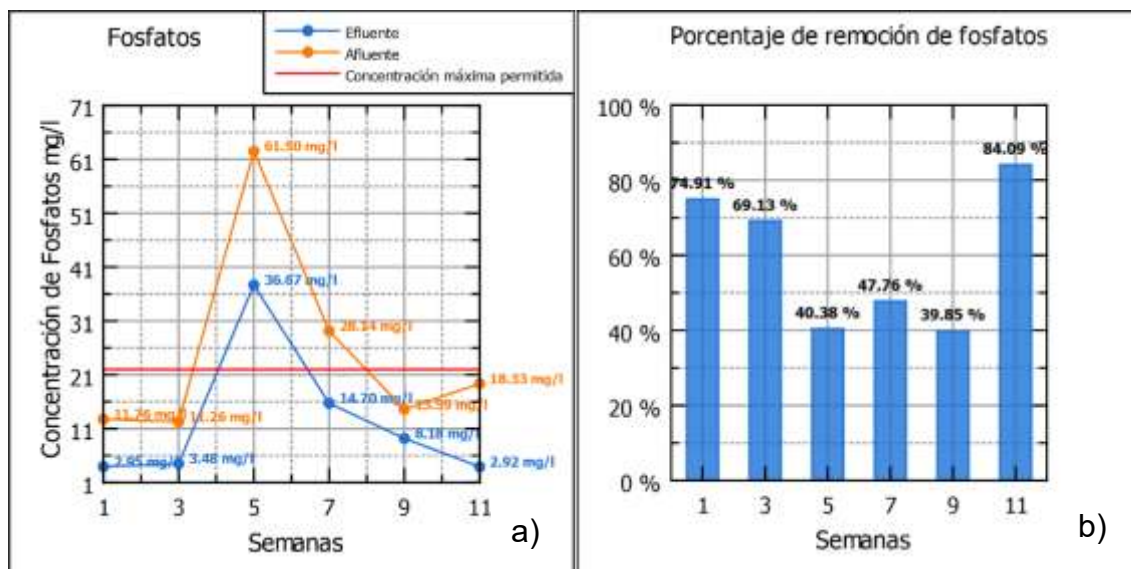


Figura 21 a) concentración de fosfatos en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ en el efluente, afluente y la concentración máxima permitida por la normatividad b) porcentaje de remoción de fosfatos durante el periodo de funcionamiento del prototipo. Fuente: Autoría propia.

La variabilidad en la concentración que hay en el afluente no parece estar relacionada con la presencia de lluvias, puesto que durante las semanas 3, 5 y 7 hubo presencia de estas, mientras que durante la semana 11 no hubo lluvias. Es probable que sean fluctuaciones propias del agua residual. En cuanto al afluente, se observó que durante las semanas 1 y 3 hubo un mínimo en la concentración, debido a la presencia de algas en el vaso controlador de nivel de agua, las cuales pudieron ocupar este nutriente para su crecimiento. Sin embargo, al eliminar las algas se observa un aumento repentino en la concentración, que vuelve a bajar con el tiempo. Los humedales profundos no son recomendables para la remoción de fosfatos debido a que requiere de un área de tratamiento bastante alta debido a que los mecanismos de remoción de este contaminante necesitan de mucho sustrato para ser sedimentado y a que la vegetación no logra absorber este contaminante con facilidad [36]. Es por esto que, en comparación con otros parámetros, los fosfatos no tienen un buen porcentaje de remoción. Sin embargo, se lograron niveles de concentración por debajo del límite máximo permitido por la normatividad.

- **Sólidos Suspendidos Totales**

La Figura 22 muestra las gráficas de concentración en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ y de remoción en porcentaje de los sólidos suspendidos totales (SST). La concentración de SST en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ en el afluente tiene un máximo de $490 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ y un mínimo de $170 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. La concentración en el efluente tiene un mínimo de $22 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ y un máximo de $279 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ siendo que después de este valor la concentración se estabiliza en alrededor de $20 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, mientras que la concentración máxima permitida por la NOM-001-SEMARNAT-2021 es de $84 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. El porcentaje de remoción de SST en la Figura 22.b) muestra un crecimiento, que se ve interrumpido en la semana 3 para después volver a crecer y mantenerse estable en 93%.

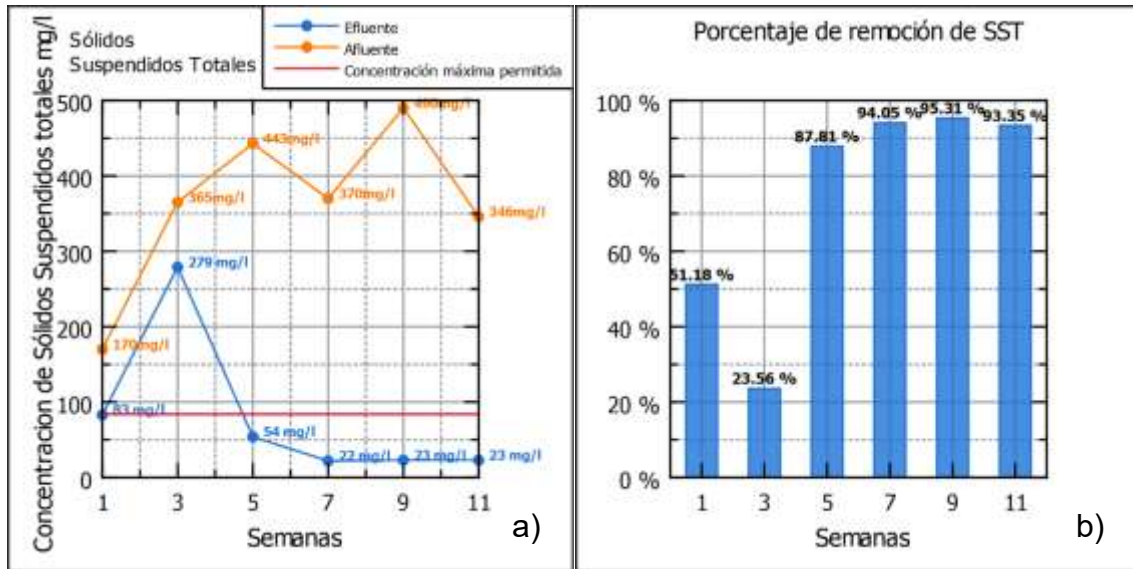


Figura 22 a) Concentración de SST en mg^{*l}⁻¹ en el afluente, efluente y la concentración máxima permitida por la NOM-011-SEMARNAT-2021 b) Porcentaje de remoción de SST durante el periodo de funcionamiento del prototipo. Fuente: Autoría propia.

La concentración en mg^{*l}⁻¹ vista en la Figura 22.a) muestra un aumento repentino en la semana 3, debido a la presencia de algas en el efluente, específicamente en el vaso controlador del nivel de agua, el cual al ser de un material semitransparente permitió el crecimiento de algas, que alteraron el nivel de SST. Sin embargo, al aplicar una capa de pintura que bloqueo la luz solar se logró detener el crecimiento de algas y por tanto el nivel de SST bajo y se mantuvo estable en 20 mg^{*l}⁻¹. Esto se ve reflejado también en la Figura 22.b) donde el porcentaje de remoción tuvo una disminución en la semana 3 para luego crecer y mantenerse estable. La Figura 23 muestra la evolución que tuvo el agua tratada. Los métodos de remoción de SST son sobre todo físicos como la sedimentación en el sustrato y por las raíces de la vegetación. La eficiencia de remoción en el prototipo es bastante alta y puede mejorarse mediante un pretratamiento como un sedimentador o un desarenador.

- **Caracterización del agua**

En la Tabla 12 se muestra la caracterización final del efluente y afluente, donde además de los parámetros antes vistos se añaden los siguientes:

- Turbidez: Pérdida de transparencia por la presencia de sólidos en suspensión.
- pH: Indica la presencia de iones hidrógeno indicando acidez o alcalinidad.
- OD: Oxígeno disuelto presente en el agua
- Conductividad eléctrica: Capacidad del agua de conducir electricidad, siendo dependiente de la cantidad de SST presentes
- Color: Causada por la cantidad de sólidos en suspensión

Esta caracterización se realizó 2 veces, al inicio del periodo de funcionamiento midiendo solo el afluente y al final midiendo el efluente. Esto para poder comparar la eficiencia del prototipo luego del periodo de funcionamiento. Cabe destacar que estos valores son mediciones puntuales, al contrario de los valores vistos anteriormente los cuales eran valores promedio.

Se observa que hay una disminución en el valor del parámetro medido en el efluente si se compara con el afluente, excepto en el valor de pH el cual paso de 6.9 a 7.92

Tabla 12 Caracterización del efluente y afluente. Fuente: Autoría propia.

	DBO ₅	DQO	N _T	P	SST	Turbidez	pH	OD	Conductividad eléctrica	Color
Afluente	750 mg*l ⁻¹	1055 mg*l ⁻¹	127 mg*l ⁻¹	57.3 mg*l ⁻¹	474 mg*l ⁻¹	340 UNF	6.9	0%	1411 μS	>50 m ⁻¹
Efluente	20 mg*l ⁻¹	175.4 mg*l ⁻¹	10.1 mg*l ⁻¹	2.92 mg*l ⁻¹	23 mg*l ⁻¹	31 UNF	7.92	36%	1200 μS	9.4 m ⁻¹

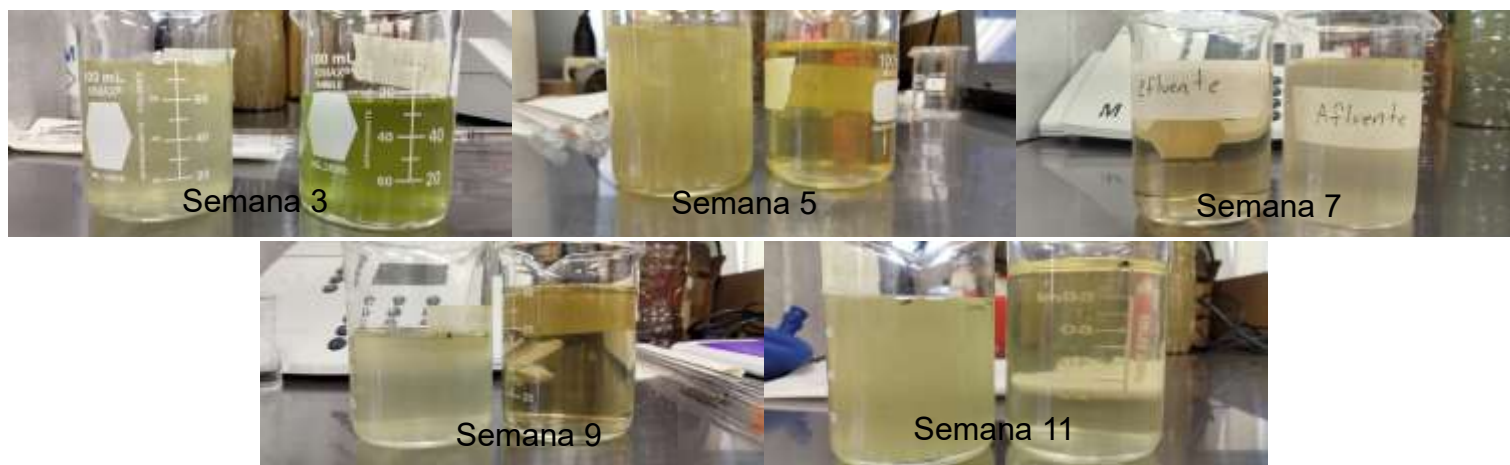


Figura 23 Evolución en el agua tratada en comparación con el agua residual. Fuente: Autoría propia

Todos los parámetros muestran una disminución significativa de contaminantes en el efluente, siendo el oxígeno disuelto uno de los parámetros donde más sorprende la mejoría, teniendo un nivel del 0% en el afluente al inicio del periodo de funcionamiento, mientras que en el efluente se logró un nivel del 36%.

En general la calidad del efluente logra satisfacer la normatividad vigente que permite su descarga en cuerpos de agua superficiales o su uso en actividades agrícolas, industriales o de no consumo.

VII.IV Medición de caudal en efluente y afluente

Otro parámetro que se monitoreo fue el caudal en el afluente y efluente, esto para poder garantizar que el funcionamiento del prototipo sea de acuerdo con lo diseñado. Para esto se calculó el volumen del depósito de agua residual, usando las dimensiones del recipiente. Luego se calculó la altura dentro del recipiente que equivale a un litro, para poder hacer marcas a esa distancia, lo que permite tener una escala de los litros dentro del recipiente.

Para poder medir el caudal se mide el volumen en litros del recipiente a una determinada hora, se anota el valor y se vuelve a medir el volumen al siguiente día a la misma hora, de esta forma la diferencia entre estos dos valores es el valor del caudal en $\text{lt} \cdot \text{d}^{-1}$. De forma similar se midió el caudal en el afluente. Así se tiene una medición del agua que entra y que sale del prototipo.

La Tabla 13 recoge los resultados obtenidos durante 20 días:

Tabla 13 Mediciones del caudal en el prototipo durante 20 días. Fuente: Autoría propia

Día	Caudal afluente l*d⁻¹	Caudal efluente l*d⁻¹
1	3	2
2	3	1
3	5	1
4	5	3
5	4	10*
6	2	2
7	2	2
8	2	4*
9	5	1
10	6	1
11	4	2
12	3	7*
13	1	2
14	2	1
15	4	1
16	6	3*
17	3	1
18	6	1
19	5	1
20	3	1

*Días con lluvia

De la Tabla anterior se observan los siguientes datos. En primer lugar, es que el caudal del afluente varía con el tiempo, esto es debido a que el sistema de goteo no funciona de manera constante debido a que los goteros se obstruían con sólidos presentes en el agua residual, teniendo que limpiar el sistema cada determinado tiempo. En segundo lugar, el caudal del efluente es significativamente menor al caudal de entrada, además de ser afectado por factores externos como la lluvia. Las pérdidas de agua que se observan entre el agua que entra y la que sale se atribuyen al consumo de agua por la propia vegetación, al investigar datos de la especie

utilizada se encontró que es una especie invasiva que consume hasta 3 lt*d⁻¹ por m² teniendo efectos negativos en los ecosistemas acuáticos donde esta especie se establece.

VIII. Diseño de sistema de tratamiento de humedal artificial

Con los resultados obtenidos, se revisó el diseño a escala real para un humedal artificial profundo en la localidad de Tehuiztingo, del municipio del mismo nombre. El área de tratamiento del humedal artificial se había calculado anteriormente, para diversos contaminantes.

Tabla 14 Área de tratamiento por contaminante. Autoría: Fuente propia

Contaminante	Concentración inicial	Concentración final deseada	Área de tratamiento necesaria
Nitrógeno total	127.3 mg*l ⁻¹	25 mg*l ⁻¹	13,471 m ²
Fosforo total	57.2 mg*l ⁻¹	15 mg*l ⁻¹	30,823 m ²
DBO ₅	750 mg*l ⁻¹	30 mg*l ⁻¹	4,738 m ²

Los componentes principales de un humedal artificial son similares a los de una planta de tratamiento convencional. Se tienen pretratamientos físicos que tienen como objetivo la remoción de sólidos y partículas que puedan dañar u obstruir las tuberías y otros sistemas del humedal. También se incluyen pretratamientos biológicos como son tanques Imhoff, biodigestores y lagunas de estabilización, que se encargan de remover materia orgánica.

Para el humedal artificial en Tehuiztingo se propone el diseño de un desarenador, rejillas de filtrado y un biodigestor, elementos que han sido utilizados en otros humedales de tamaño similar.

VIII.I Desarenador y rejas de filtrado

El desarenador es un elemento muy importante dentro de una planta de tratamiento de aguas residuales ya que se encarga de depositar gravas y arenas en el fondo de este. Existen desarenadores que ocupan métodos mecánicos para separar sólidos del agua entrante, sin embargo, se usará un diseño de desarenador longitudinal que no ocupa energía mecánica para su funcionamiento si no que se basa en la reducción de la velocidad del agua para remover los sólidos.

Para el diseñar el desarenador se utilizó la guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores [50]. Los datos necesarios se muestran en la Tabla 15:

Tabla 15 Datos necesarios para el cálculo de desarenadores y sedimentadores. Fuente: Autoría propia.

Caudal de entrada	$715 \text{ m}^3\text{d}^{-1} = 8.28 \text{ lt}\cdot\text{s}^{-1} = 0.00828 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Densidad relativa de la arena	2.65
Diámetro de partícula	0.02 cm
Temperatura media	24 °C
Densidad del agua	$0.99733 \text{ gr}\cdot\text{cm}^{-3}$
Viscosidad cinemática del agua	$0.9186 \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$

Los datos de densidad relativa, diámetro de partícula, densidad del agua y viscosidad cinemática del agua son tomados del manual anteriormente mencionado.

Se empieza el diseño calculando la velocidad de sedimentación de las partículas a remover con la siguiente formula:

$$V_s = [g(\rho_s - 1)\eta]^{1/3} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

- V_s = Velocidad de sedimentación, $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$
- g = Aceleración de la gravedad, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$

- ρ_s = Densidad relativa de la arena
- η = Viscosidad cinemática del agua, $\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$
- d = Diámetro de la partícula, cm

Se sustituyen los valores y se obtiene una velocidad de sedimentación de $2.41 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$

¹. Con este dato se calcula el número de Reynolds usando la siguiente fórmula:

$$Re = \frac{V_s d}{\eta} \quad \text{Ecuación 14}$$

Sustituyendo los valores se obtiene un número de Reynolds de 5.24. Una vez obtenidos estos resultados se calcula el coeficiente de arrastre con la siguiente fórmula:

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34 \quad \text{Ecuación 15}$$

Sustituyendo valores se obtiene un coeficiente de arrastre de 6.23. Con estos valores se puede calcular el área con la fórmula siguiente, tomando un coeficiente de seguridad del 75%:

$$A_s = \frac{Q(\text{coeficiente de seguridad})}{V_s} \quad \text{Ecuación 16}$$

Lo que nos arroja un resultado de un área superficial de 0.6 m^2 para la sección de sedimentación. Ahora se propone un ancho, largo y profundidad que cumpla con los criterios de diseño, se propone un largo de 4 m, un ancho de 2 m y una profundidad de 0.5 m, así el diseño final se muestra en la Figura 24.

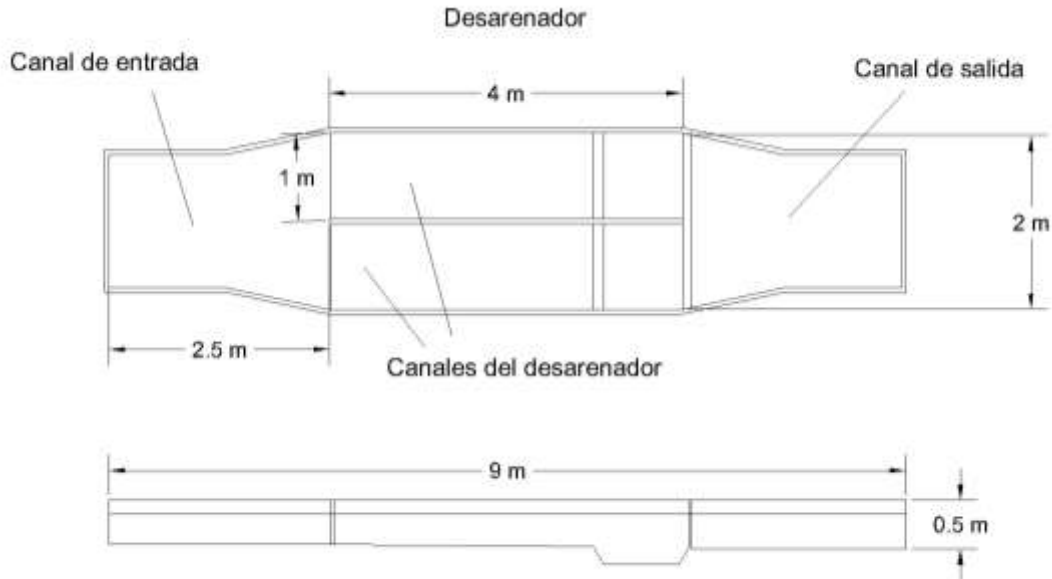


Figura 24 Vista lateral y vista de base del desarenador. Fuente: Autoría propia.

Para el diseño de las rejillas se utilizó el Manual de pretratamiento y tratamiento primario de la CONAGUA. Los datos necesarios son el ancho del canal de entrada, que es 1.5 m, así como la profundidad de este, de 0.5 m. Se calcula la longitud de la rejilla con la siguiente fórmula:

$$L = \frac{P}{\text{sen } \theta} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

- L = Longitud de la rejilla, m
- P = Profundidad del canal de entrada, m
- θ = Angulo de inclinación de la rejilla (se sugiere un ángulo de 45°)

Sustituyendo los valores se obtiene una longitud de 0.7 m con un ángulo de 45°. Se calculo el número de espacios y barras en la rejilla para partículas gruesas de un tamaño mayor a 4 cm para lo cual se usa la siguiente fórmula:

$$n = \frac{W-C}{C+d_b} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde:

- n = Número de espacios entre barras y $n+1$ es el número de barras
- W = Ancho del canal de entrada, m
- C = Distancia entre barras, m
- d_b = Espesor de la barra, m

Para la reja de partículas gruesas se usarán barras de 2 cm de espesor colocadas a una distancia de 4 cm una de otra, por lo que se tienen 24 espacios y 25 barras. En el caso de la reja para partículas medias la fórmula es la misma, cambiando la distancia entre barras, que es de 2 cm, por lo que se obtiene un total de 37 espacios y 38 barras. La Figura 25 muestra las dimensiones de las rejillas de filtrado.

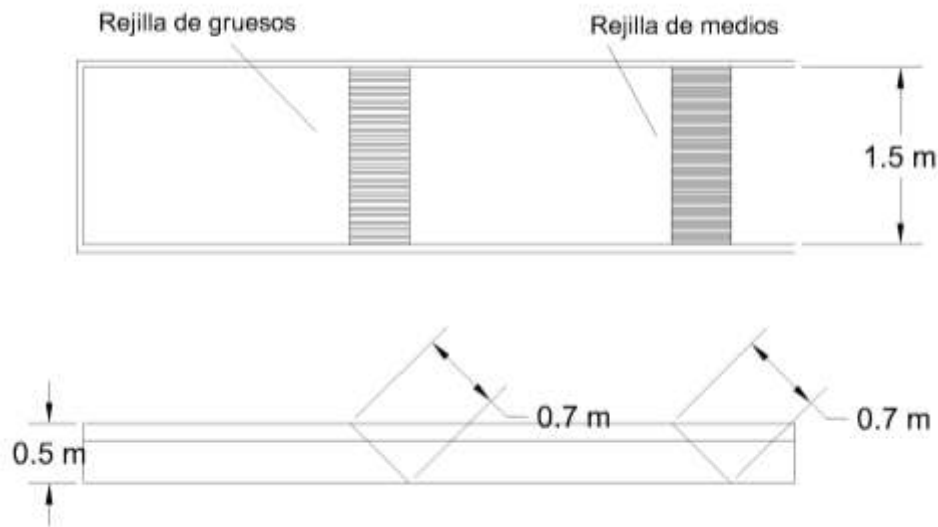


Figura 25 Vista de base y lateral de las rejillas de filtrado. Fuente: Autoría propia.

VIII.II Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA)

El Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente o RAFA por sus siglas es un tratamiento biológico usado en aguas residuales con el propósito de convertir compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales en metano, dióxido de carbono y otros compuestos volátiles. Sin embargo, estos reactores no son adecuados para la

eliminación de nutrientes como nitrógeno y fosforo. Para su diseño se necesita conocer el caudal de entrada y la concentración de DQO en $\text{kg}\cdot\text{m}^3^{-1}$ de entrada.

Se empieza conociendo la carga de DQO por día en el afluente, se usa la siguiente formula:

$$L_o = S_o Q \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

- L_o = Carga de DQO de afluente, $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$
- S_o = Concentración de DQO de afluente, $\text{kg}\cdot\text{m}^3^{-1}$. Se tiene una concentración de $1.055 \text{ kg}\cdot\text{m}^3^{-1}$
- Q = Caudal de entrada, $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$. Se tiene un caudal de $715 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$

Sustituyendo los valores se obtiene una carga de $754.33 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ de DQO. Se elije un tiempo de residencia hidráulico (TRH) de acuerdo con la temperatura media, que es 25° en la región de estudio, de acuerdo con el manual de diseño de reactores anaerobios de flujo ascendente [51], el valor de TRH es de 8 horas o 0.33 días. A continuación, se calcula el volumen total del reactor con la siguiente formula:

$$V = Qt \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde t es el tiempo de residencia hidráulica, en días, por lo que se obtiene un volumen total de 235.95 m^3 . Se propone una altura de 4 m, la recomendada para tener un funcionamiento adecuado, teniendo la altura se calcula el área del reactor:

$$A = \frac{235.95 \text{ m}^3}{4 \text{ m}} = 58.99 \text{ m}^2$$

Se aproxima a un valor de 60 m^2 y se propone un largo de 10 m, por lo que se obtiene un ancho de 6 m.

Se procede a calcular la eficiencia de remoción de DQO, usando la siguiente formula:

$$E_{DQO} = 100 \left(1 - \left(0.68 * (t^{-0.35}) \right) \right) \quad \text{Ecuación 21}$$

Sustituyendo los valores se obtiene una eficiencia de remoción del 67.1%

Para calcular la eficiencia de remoción de DBO se usa la siguiente formula:

$$E_{DQO} = 100 \left(1 - \left(0.7 * (t^{-0.5}) \right) \right) \quad \text{Ecuación 22}$$

Sustituyendo los valores se obtiene una eficiencia de remoción del 97.5%. Con estos datos de la eficiencia de remoción se calcula la concentración de DBO⁵ y DQO en efluente del reactor. Para esto se utiliza la Ecuación 23:

$$C_{DQO} = S_0 - \left(\frac{E_{DQO} * S_0}{100} \right) \quad \text{Ecuación 23}$$

Sustituyendo los valores se obtiene una concentración en el efluente de 0.348 kg*m³⁻¹ de DQO y 0.187 kg*m³⁻¹ de DBO⁵. Esto ayuda a mejorar la calidad del agua en estos parámetros, por lo que el humedal podrá mejorar aún más su eficiencia en la remoción de estos contaminantes.

Con esta información obtenida se puede calcular la producción teórica de metano en el reactor, para esto primero se calcula la carga de DQO convertida a metano con la siguiente ecuación:

$$DQO_{CH_4} = Q \left[(S_0 - C_{DQO}) - 0.21 * S_0 \right] \quad \text{Ecuación 24}$$

Sustituyendo los valores se obtiene un valor de carga de DQO convertida a metano de 347.09 kgDQO*d⁻¹. Con este resultado se procede a calcular la producción teórica de metano usando la Ecuación 25:

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)} \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde:

- Q_{CH_4} = Producción de metano, m³*d⁻¹

- $K(t)$ = Factor de corrección dependiente de la temperatura de operación del reactor ($\text{kgDQO} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)

El valor de $K(t)$ de acuerdo con el Manual de diseño de reactores anaerobios de flujo ascendente de la CONAGUA, es de $2.6 \text{ kgDQO} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, por lo que la producción de teórica de metano es de $129 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$.

Finalmente, y de acuerdo con el manual, se incluyeron en el diseño tubos para la salida de lodos en el fondo del reactor junto con un canal recolector de lodos, respiraderos para la salida del metano.

Las Figuras 26,27 y 28 muestran las dimensiones del reactor.

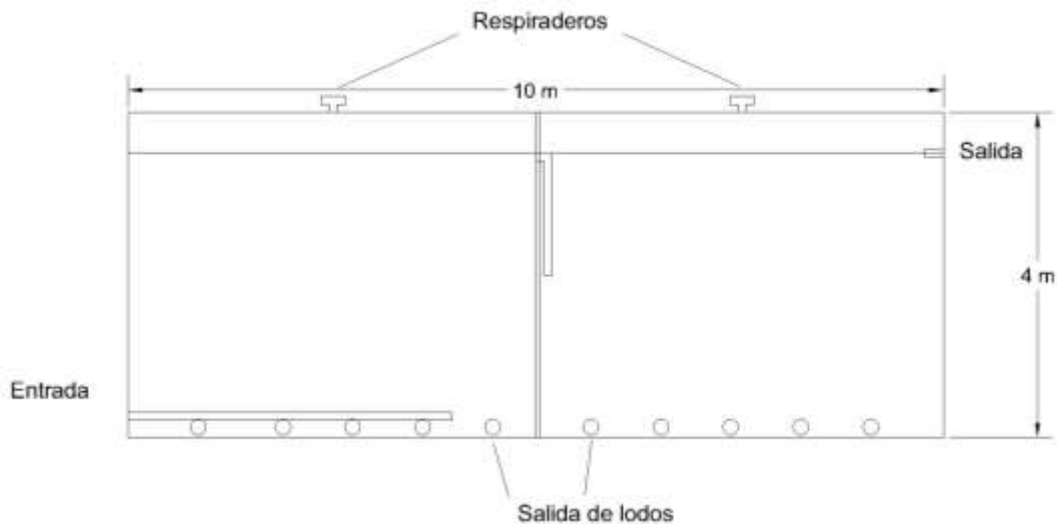


Figura 26 Vista lateral del reactor anaerobio de flujo ascendente, se muestra la entrada, la salida, la salida de lodos y los respiraderos. Fuente: Autoría propia.

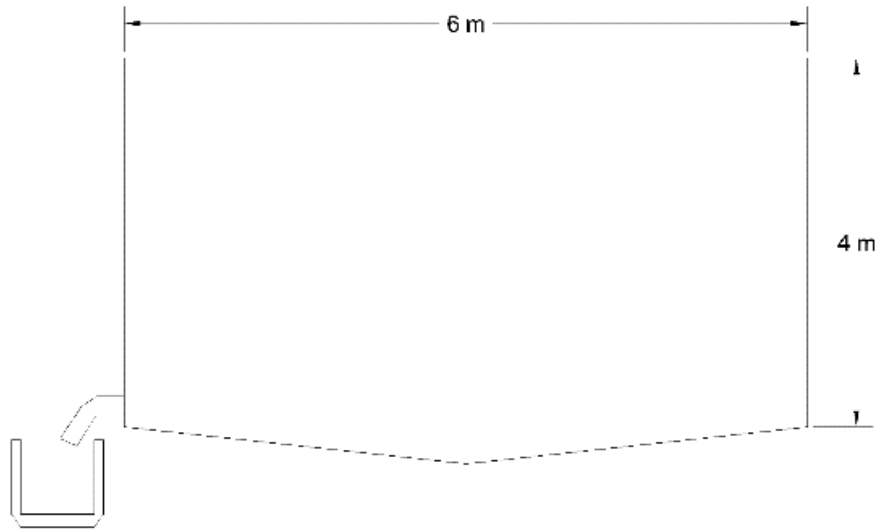


Figura 27 Vista de sección del reactor anaerobio, mostrando el ancho y la altura, así como el canal recolector de lodos. Fuente: Autoría propia.

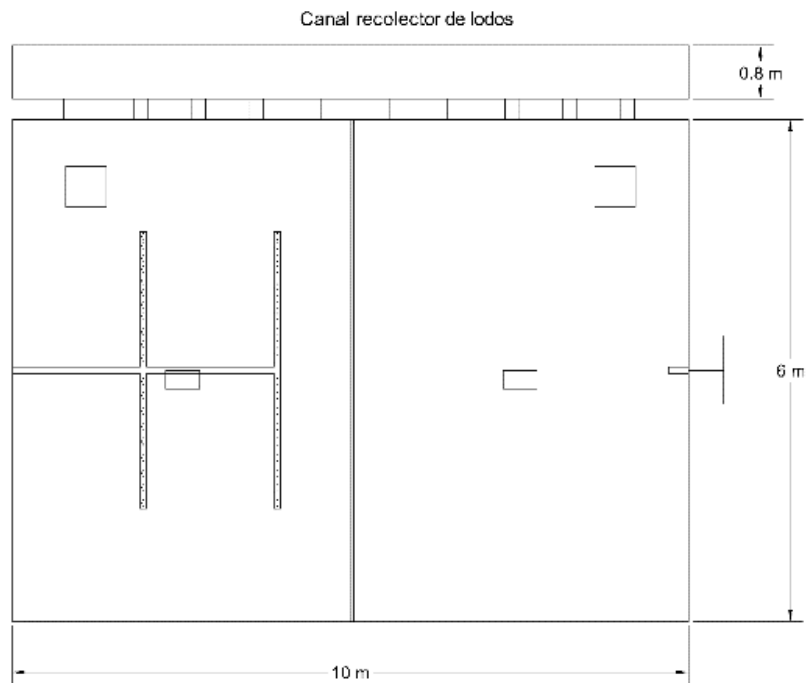


Figura 28 Vista superior del reactor anaerobio, mostrando el canal recolector de lodos, la entrada del afluente, la salida del efluente y los respiraderos. Fuente: Autoría propia.

VIII.III Humedal artificial

El diseño general del humedal artificial ya se obtuvo en el capítulo anterior y se muestra en la Tabla 16, donde se obtuvo un ancho mínimo de 610 m y un largo total de 22.02 m, con una profundidad del sustrato de 60 cm. De acuerdo con la metodología, se propone un número de celdas dividiendo el ancho de tal forma que

Tabla 16 Dimensiones del humedal en función del contaminante a remover. Fuente: Autoría propia

Contaminante	Ancho mínimo	Largo en zona inicial	Largo en zona final	Largo total
Nitrógeno total	610 m	15.4 m	6.62 m	22.02 m
Fosforo total	923 m	23.37 m	10.01 m	33.38 m
DBO ₅	362 m	9.16 m	3.92 m	13.08 m

se obtenga una relación de 2:1 o 4:1 con respecto al largo, en este caso se modifican las medidas para poder obtener esta relación, se conserva el ancho de 610 m y se modifica el largo total, teniendo ahora 25 m, de esta manera, proponiendo 6 celdas, se tiene un ancho de 101.6 m, con lo que se obtiene una relación de aproximadamente 4:1, suficiente para satisfacer este criterio. Así mismo se modifican el largo en las zonas de tratamiento, tanto en la zona inicial como en la final, teniendo un largo de zona de tratamiento inicial de 7.5 m y una zona de tratamiento final de 17.5 m. Se calcula el tiempo de residencia hidráulica con la Ecuación 7, obteniendo un resultado de 45.2 horas. La Figura 29 muestra las dimensiones de las celdas del humedal artificial profundo.

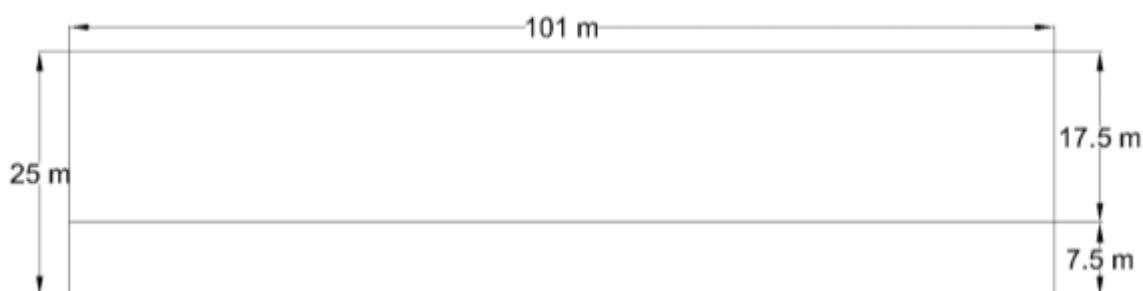


Figura 29 Dimensiones de las celdas del humedal. Fuente: Autoría propia.

Una vez obtenidas las dimensiones de todos los elementos del humedal artificial se procede a su posicionamiento en el sitio. Como se abordó en capítulos anteriores, se busca utilizar toda la infraestructura ya existente como sea posible, aunque debido al tamaño de las celdas del humedal esto no es posible, por lo que se tendrían que adquirir espacios aledaños. La Figura 30 muestra cómo se verían los componentes del humedal artificial en el sitio donde se encuentra la planta de tratamiento actual. Se observa que se han colocado los componentes del pretratamiento en el mismo lugar donde estaban colocados en la planta de tratamiento, cuya área esta resaltada con una línea roja. Luego de pasar por el reactor anaerobio de flujo ascendente, el agua es repartida a las 6 celdas del humedal, donde toma lugar la remoción de los contaminantes. Una vez que pasa por la celda, el efluente resultante es captado por tuberías y enviado a la salida.



Figura 30 Disposición en el sitio de la planta de tratamiento abandonada de los componentes del humedal artificial. Fuente: Autoría propia.

Se observa que la disposición de las celdas es debido al espacio con el que se cuenta, siendo que las celdas 1, 2 y 3 se encuentran dentro del espacio donde se construyó la planta de tratamiento convencional, mientras que las celdas 4, 5 y 6 están en un terreno adyacente, que tendría que ser comprado para acomodar estas celdas. Además de comprar estos espacios, sería de vital importancia la reparación

de la tubería que lleva el agua residual del sistema de drenaje al humedal, puesto que se encuentra rota en varias secciones de su recorrido.

En la Tabla 17 tenemos las principales características del sistema de tratamiento.

Tabla 17 Características del sistema de tratamiento por humedal artificial en Tehuiztingo, Puebla.
Fuente: Autoría propia

Parámetros	Valor
Área total (m ²)	15,150
Largo de cada celda (m)	25
Ancho de cada celda (m)	101
Área de cada celda (m ²)	2,525
Profundidad (m)	0.6
Caudal de entrada (l*d ⁻¹)	715
Tiempo de residencia hidráulico (horas)	45
Producción de biogás en reactor anaerobio (m ³ *d ⁻¹)	129

Finalmente, en las Figuras 31 y 32 tenemos una representación artística del aspecto del sistema ya construido.



Figura 31 Vista de las celdas del humedal con el RAFA al fondo. Fuente: Autoría propia.

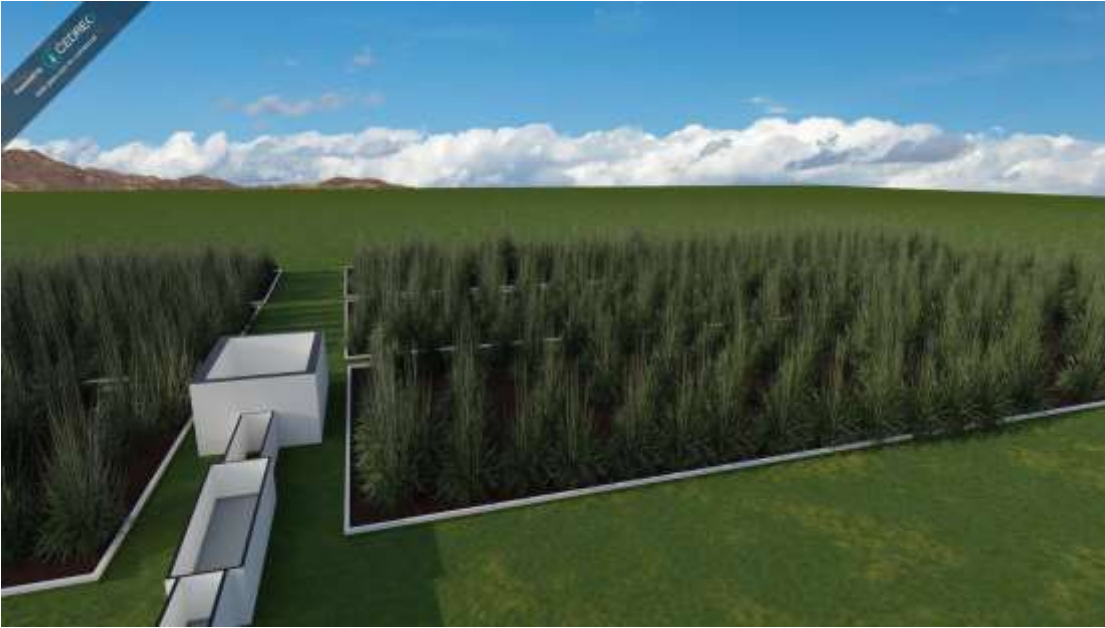


Figura 32 Vista del sistema de humedal artificial donde se puede apreciar el sistema de desarenador y rejas de filtrado antes del RAFA. Fuente: Autoría propia.

IX. Producción de biomasa para su uso en un biodigestor

La producción biomasa procedente del humedal también tendría un aporte energético importante, algunos estudios indican que la especie *Arundo donax* tiene el potencial de ser un cultivo energético importante dadas sus características en comparación con otros cultivos energéticos. La densidad de plantas para su uso en humedales artificiales es de 4 plantas por m², por lo que se necesitarían de cerca de 60,000 plantas en el diseño para poder tener la densidad necesaria.

Se han realizado investigaciones acerca de la producción de biomasa de esta especie, ya sea como un cultivo energético establecido o como un derivado de su función para remover de contaminantes en un humedal artificial. La gran mayoría de estos estudios fueron realizados en Italia, en un clima templado con una temperatura media de 22 °C, donde se obtuvieron producciones de 50 a 120 toneladas de biomasa seca por hectárea al año [44], sin embargo, un estudio realizado en Australia mostro una producción de hasta 150 toneladas de biomasa seca por hectárea con una temperatura media de 25 °C, por lo que se concluye que la producción de biomasa en *Arundo donax* depende en gran medida por la temperatura del sitio de estudio.

Para la producción de biogás, se han obtenido producciones de 9,000 a 20,000 m³ de CH₄ por hectárea al año en climas templados [52]. Por lo que una producción mayor es posible en climas más cálidos. Así mismo, la cantidad de energía eléctrica que es posible generar usando este biogás es de cerca de 2.8 kWh por m³ de biogás. En esta generación de energía se está capturando CO₂, por lo que se puede considerar una energía limpia y renovable, producto de un sistema que está removiendo contaminantes de agua contaminada. La Tabla 18 muestra los principales parámetros estimados de producción de biomasa del prototipo.

Tabla 18

Tabla 18 Parámetros estimados de producción de biogás de la propuesta de humedal artificial a partir de biomasa cosechada

Parámetro	Valor
Producción de biomasa seca (t*ha*año) [44]	225
Producción de biogás (m ³ CH ₄ *ha*año) [52]	30,000
Generación eléctrica anual (kWh) [53]	84,000
Toneladas de CO ₂ capturado (t*año) [53]	33,750

Existen diversos tipos de biodigestores, los cuales tienen ciertas ventajas frente a otros, para este proyecto se propone un biodigestor tipo laguna cubierta (BTLC) el cual tiene un diseño básico de una laguna excavada en el suelo, impermeabilizada y con una membrana plástica que selle la laguna y permita recolectar el biogás generado por la descomposición anaeróbica de la biomasa que se encuentra dentro [54].

Para diseñar un BLTC es necesario conocer algunos datos, mismos que ya se conocen en este proyecto, y que son los que se muestran en la Tabla 19:

Tabla 19 Parámetros de diseño de biodigestor tipo laguna cerrada. Autoría: Fuente propia.

Parámetro	Valor
Biomasa seca producida (m ³ *d)	1.19
Relación biomasa: agua	1:1
Volumen de biomasa alimentada al sistema (m ³ /d)	2.4
Tiempo de residencia hidráulica (días)	21
Volumen útil (m ³)	74.4
Volumen de la cámara (m ³)	18.6
Volumen total (m ³)	93

Una vez que se tienen los datos anteriores, se procede a calcular las dimensiones del BTLC [55], para lo cual se asume que el volumen en la laguna equivale al 90% del volumen total, mientras que el volumen de la cúpula de membrana es el 10% restante. De esta forma tenemos que el volumen de la laguna es $V_l = 84.63 \text{ m}^3$ y el volumen de la cúpula es de $V_c = 9.3 \text{ m}^3$.

A continuación, se calcula el ancho de la laguna, para lo cual se ocupa la siguiente ecuación:

$$r = \sqrt[3]{\left(\frac{3}{2\pi}\right) V_t} \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde:

- r = radio de la bóveda (m)
- V_l = Volumen de la laguna (m^3)

Aplicando los datos conocidos, se obtuvo un resultado de $r = 3.5 \text{ m}$, por lo que el diámetro o ancho es de 7 m . Se propone una altura de laguna de 0.7 m , con pendientes de 126° a los lados, así como un fondo de 6 m . Para poder tener el volumen deseado en la laguna, la longitud deberá ser de 22 m . La membrana tendrá una altura de 1 m , para poder almacenar el biogás producido. Las Figuras 33 y 34 muestran las dimensiones propuestas para el biodigestor.

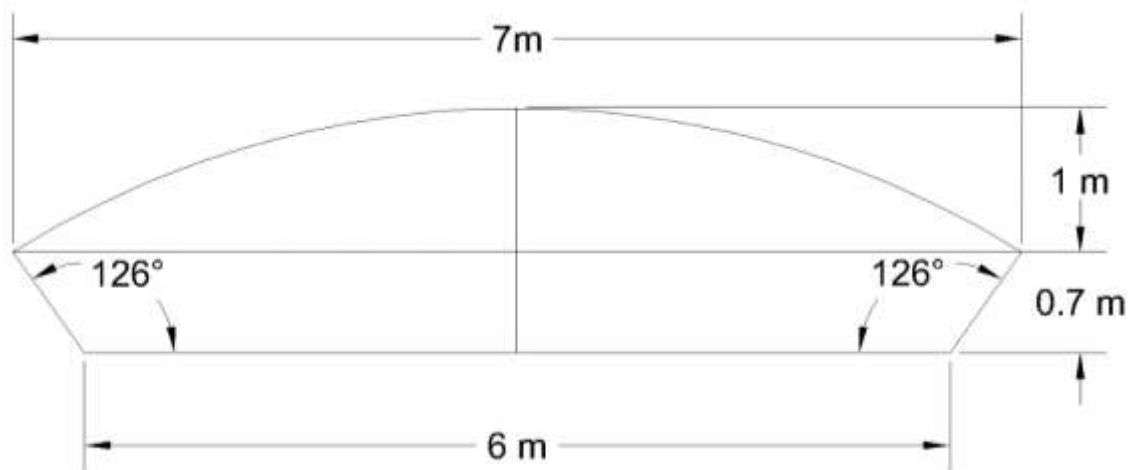


Figura 33 Dimensiones de la laguna y de la membrana del biodigestor. Fuente: Autoría propia.



Figura 34 Vista superior del biodigestor: Fuente: Autoría propia.

Finalmente, en la Figura 35 observamos una representación artística del biodigestor.



Figura 35 Representación del biodigestor. Fuente: Autoría propia.

X. Conclusiones

Las conclusiones de este trabajo de investigación son satisfactorias en el sentido de que el prototipo de humedal a escala tuvo un desempeño que supera a lo diseñado en todos los parámetros medidos. Por tanto, la complementación de las metodologías de diseño demostró ser eficaz para obtener las dimensiones del humedal. Sin embargo, hay que aclarar que cuando la metodología de diseño se aplicó a escala de prototipo, no tuvo un buen desempeño ya que arrojó dimensiones que eran irreales y que no podían ser construidas.

En cuanto al desempeño del prototipo, se tuvo un comportamiento mejor al esperado en el diseño en casi todos los parámetros de calidad de agua. El prototipo se diseñó específicamente para la remoción de nitrógeno, con una concentración esperada de $25 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, teniendo una concentración promedio de $8.67 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ en el afluente tras 11 semanas de funcionamiento, una concentración menor a la máxima permitida por la SEMARNAT. Esto aplica en casi todos los contaminantes medidos, puesto que se llegaron a niveles por debajo de lo permitido por la normatividad. Sin embargo, para el caso de la DQO y DBO_5 se observó que las concentraciones se mantuvieron ligeramente por encima de lo permitido, esto sugiere que se necesita un pretratamiento al agua residual antes de que entre en el humedal, con el fin de reducir estos parámetros.

El diseño a escala real se encontró que el área necesaria requiere más del doble de área superficial que la planta de tratamiento que existe, lo cual puede presentar dificultades para su construcción, debido a los costes en la adquisición de terrenos adyacentes, adecuamiento de tubería, nivelación de terreno, etc. Si bien se comprobó que es totalmente viable la remoción de contaminantes con un humedal artificial, la viabilidad en la construcción no lo es tanto.

Por otra parte, las estimaciones de biomasa generada en el humedal artificial, y en concreto con la especie *Arundo donax* indican que es una excelente opción para su uso en un biodigestor, teniendo una producción de hasta 225 toneladas de biomasa

al año, con una producción estimada de 30,000 m³ de biogás generado al año. Esto equivale a una producción eléctrica de 84 MWh anuales.

XI. Recomendaciones

Esta investigación puede ser mejorada y enriquecida con las siguientes recomendaciones propuestas.

Realizar pruebas con otras especies vegetales que puedan adaptarse a las condiciones de temperatura y humedad de la región del municipio de Tehuizingo.

Proponer un sistema de monitoreo de datos alimentado por energía solar, para conocer en tiempo el comportamiento del prototipo y poder realizar mejoras en el diseño.

Realizar un estudio para conocer el potencial de cultivo energético de *Arundo donax* en México, sabiendo de sus ventajas de alta productividad de biomasa, adaptabilidad a diversos climas y su uso en humedales artificiales.

Para el humedal artificial, se propondrían las siguientes opciones, que resolverían el problema de la cantidad de espacio necesario para su construcción:

- Descentralización del tratamiento: en esta opción se propondría dividir la cabecera municipal en secciones, de tal manera que se puedan construir humedales artificiales para cada sección, disminuyendo el caudal de entrada y por tanto el área necesaria para su tratamiento. Esto además podría beneficiar zonas de la cabecera municipal que no cuentan con red de agua potable ni alcantarillado actualmente.
- Construcción o reconstrucción de la PTAR como tratamiento principal: la construcción o reconstrucción de la PTAR para tratar el agua residual y bajar la concentración de los contaminantes sería de gran ayuda para que el humedal artificial funcione como un tratamiento que mejore la calidad del agua. Se diseñaría la PTAR para lograr una disminución de contaminantes, sin llegar a la concentración requerida por la normatividad, de tal manera que el humedal sea el encargado de cumplir con la norma.
- Traslado del humedal a otra comunidad: El municipio de Tehuizingo cuenta con 4 juntas auxiliares lo suficientemente grandes como para la

implementación de un sistema de drenaje, pero con poblaciones que no supera los 1000 habitantes, las cuales serían más aptas para la construcción de un humedal artificial. En este escenario, la cabecera municipal tendría que reconstruir su planta de tratamiento y utilizar la biomasa generada por los humedales para producir energía que ayude a reducir su consumo de energía eléctrica de red.

XII. Bibliografía

- [1] Comisión Nacional del Agua, “Monitor de Sequía de México”, Comisión Nacional del agua. Consultado: el 28 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- [2] Comisión Nacional del Agua, “Calidad del agua en México | Comisión Nacional del Agua | Gobierno | gov.mx”. Consultado: el 25 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>
- [3] CONAGUA, *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación, Diciembre 2021*. 2021.
- [4] W. Alberto, L. Chafloque, y E. Guadalupe Gómez, “A design of an artificial marsh for treating waste water in the UNMSM”, *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, vol. 15, núm. 17, pp. 1628–8097, 2006.
- [5] Comisión Nacional del Agua, *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales*. 2015. [En línea]. Disponible en: www.conagua.gob.mx
- [6] Gobierno Municipal de Tehuiztzingo, “Plan de desarrollo municipal Tehuiztzingo Puebla 2018-2021”, 2018.
- [7] M. Villegas-Soto, T. Reyna Trujillo, y A. Gómez-Tagle-Rojas, “Los suelos de la región de Tehuiztzingo, estado de Puebla”, *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología*, vol. Volumen 1, núm. Número 1, pp. 195–203, 1977.
- [8] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, *Panorama Sociodemográfico de México*. 2021.
- [9] ONU, “Agua y saneamiento - Desarrollo Sostenible”, Organización de las Naciones Unidas. Consultado: el 26 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- [10] Comisión Nacional del Agua, “Estadísticas del Agua en México”, Ciudad de México, 2019.
- [11] Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, “NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.”, *Diario Oficial de la Federación*, 2021.
- [12] M. Romero-Aguilar, A. Colín-Cruz, E. Sánchez-Salinas, y M. Laura Ortiz-Hernández, “Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica”, *Rev. Int. Contam. Ambient.*, 2009.

- [13] V. Maria Arteaga Cortez y E. DE México, “Propuesta metodológica para la construcción de humedales artificiales”, Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas, Texcoco, 2018.
- [14] A. E. Navarro-Frómata y M. del C. Durán-Domínguez, “El tratamiento descentralizado del agua residual de pequeñas localidades rurales y suburbanas: los humedales construidos, una tecnología a considerar”, 2019.
- [15] R. Haberl, R. Perfler, y H. Mayer, “CONSTRUCTED WETLANDS IN EUROPE”, 1995.
- [16] EPA, *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Wildlife Habitat*. 1993.
- [17] J. L. Marín-Muñiz, “Humedales construidos en México para el tratamiento de aguas residuales, producción de plantas ornamentales y reuso del agua”, *Revista Agro Productividad*, vol. 10, núm. 5, pp. 90–95, 2017.
- [18] M. Luna-Pabello y S. Aburto-Castañeda, “Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón”, 2014.
- [19] Comisión Nacional del Agua, *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación Diciembre 2020*. Ciudad de México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020.
- [20] R. Merino, “Tratamiento del agua”, Uruapan, Michoacán, 2019.
- [21] CONAGUA, *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales*. 2018. [En línea]. Disponible en: www.conagua.gob.mx
- [22] Ministerio del Ambiente, *Manual para municipios ecoeficientes*. Lima, 2009.
- [23] Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, *Ley de Aguas Nacionales*. México, 1992.
- [24] Comisión Nacional del Agua, “Calidad de agua en México”. Consultado: el 29 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>
- [25] J. De Anda Sánchez, “Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México”, 2017.
- [26] O. Cisneros y H. Saucedo Rojas, *Reúso de aguas residuales en la agricultura*. Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2016. [En línea]. Disponible en: www.gob.mx/imta
- [27] Lancaster County Conservation District, “What is a Wetland?”
- [28] UNESCO, “Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas”, 1971.
- [29] Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria, “CONSERVACIÓN DE LOS HUMEDALES”, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/conanp/prensa/mexico-comprometido-con-la-convencion-de->

- [30] R. H. Kadlec y S. D. Wallace, *Treatment wetlands*. CRC Press, 2009.
- [31] R. M. Fiorela Núñez Burga, “Tratamiento de aguas residuales domésticas a nivel familiar, con Humedales Artificiales de flujo subsuperficial Horizontal, mediante la especie macrófita emergente *Cyperus Papyrus* (Papiro)”, Universidad Peruana Unión, Lima, 2016.
- [32] O. Delgadillo, A. Camacho, • Luis, F. Pérez, y M. Andrade, *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*, 1a ed. Cochabamba, Bolivia, 2010.
- [33] I. Arias, A. Carlos, y H. Brix, “Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales”, *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, Bogotá, 2003.
- [34] M. Pérez Lopéz, “Selección de plantas acuáticas para establecer humedales en el estado de Durango”, Centro de Investigación de Materiales Avanzados, Chihuahua, 2009.
- [35] G. Dotro, G. Langergraber, y et al., *Tratamiento biológico de aguas residuales*, vol. 7. IWA Publishing, 2017.
- [36] A. T. Jaume y J. Rabat Blázquez, “Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración”, 2016.
- [37] EPA, “A HANDBOOK OF CONSTRUCTED WETLANDS”.
- [38] APHA, AWWA, y WPCF, *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Diaz de Santos, 1992.
- [39] M. R. di Cicco, A. Spagnuolo, A. Masiello, C. Vetromile, M. Nappa, y C. Lubritto, “Energetic and environmental analysis of a wastewater treatment plant through static and dynamic monitoring activities”, *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 17, núm. 10, pp. 4299–4312, oct. 2020, doi: 10.1007/s13762-020-02775-0.
- [40] J. Ferrer, D. Aguado, y R. Barat, *Huella energética en el ciclo integral del agua*. 2016.
- [41] J. Loaiza N., F. Vázquez A., K. Aguilar L., y V. Villagrana R., “Consumo de energía en plantas de tratamiento - Benchmarking”, *Aqua-LAC*, vol. 13, núm. 1, pp. 45–57, mar. 2021, doi: 10.29104/phi-aqualac/2021-v13-1-04.
- [42] N. A. Rubalcava Llamas, “Estudio de la eficiencia energética en una planta de tratamiento de aguas residuales comercial, en Meridia Yucatan”, Centro de Investigación Científica de Yucatan, Merida, Yucatan, 2020.
- [43] Roberto D y Elmar, “Energía a partir de las aguas residuales”, 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.edutecne.utn.edu.ar>
- [44] C. Leto, T. Tuttolomondo, S. La Bella, R. Leone, y M. Licata, “Growth of *Arundo donax* L. and *Cyperus alternifolius* L. in a horizontal subsurface flow constructed wetland using pre-treated urban wastewater-a case study in Sicily (Italy)”, *Desalination Water Treat*, vol. 51, núm. 40–42, pp. 7447–7459, 2013, doi: 10.1080/19443994.2013.792134.
- [45] M. Borin, A. C. Barbera, M. Milani, G. Molari, S. M. Zimbone, y A. Toscano, “Biomass production and N balance of giant reed (*Arundo donax* L.) under high water and N input in

- Mediterranean environments”, *European Journal of Agronomy*, vol. 51, pp. 117–119, nov. 2013, doi: 10.1016/j.eja.2013.07.005.
- [46] L. Corno, R. Pilu, y F. Adani, “Arundo donax L.: A non-food crop for bioenergy and bio-compound production”, *Biotechnology Advances*, vol. 32, núm. 8. Elsevier Inc., pp. 1535–1549, el 1 de diciembre de 2014. doi: 10.1016/j.biotechadv.2014.10.006.
- [47] “Normales Climatológica por Estado”. Consultado: el 30 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=pue>
- [48] A. S. Silva R y H. D. Zamora Z, “Humedales Artificiales”, Universidad Nacional de Colombia, 2005.
- [49] EPA, “GUIDING PRINCIPLES FOR CONSTRUCTED TREATMENT WETLANDS: Providing for Water Quality and Wildlife”, 2000.
- [50] Organización Panamericana de la Salud, *Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores*. Lima, 2005.
- [51] Comisión Nacional del Agua, *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Reactores anaerobios de flujo ascendente*. 2015. [En línea]. Disponible en: www.conagua.gob.mx
- [52] C. Luca, R. Pilu, F. Tambone, B. Scaglia, y F. Adani, “New energy crop giant cane (Arundo donax L.) can substitute traditional energy crops increasing biogas yield and reducing costs”, *Bioresour Technol*, vol. 191, pp. 197–204, sep. 2015, doi: 10.1016/j.biortech.2015.05.015.
- [53] G. Allesina *et al.*, “Energy production and carbon sequestration in wet areas of Emilia Romagna region, the role of Arundo Donax”, *Advances in Modelling and Analysis A*, vol. 55, núm. 3, pp. 108–113, sep. 2018, doi: 10.18280/ama_a.550302.
- [54] L. M. Safley y P. W. Westerman, “Performance of a Low Digester* Temperature Lagoon”, 1992.
- [55] M. Á. Barrena Gurbillón, P. Salazar Salazar, W. Gosgot Ángeles, C. M. Ordinola Ramírez, y M. Huanes Mariños, “Diseño del biodigestor tipo laguna cubierta para el Establo de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza, Chachapoyas, Amazonas”, *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, vol. 3, núm. 2, p. 63, oct. 2019, doi: 10.25127/aps.20192.491.

Anexos

Anexo 1 Resultados de caracterización fisicoquímica de agua residual proveniente del municipio de Tehuiztingo, Puebla

Equipos y métodos de caracterización

Parámetro	Equipo	Método	Rango de concentración
DBO ₅	OxiTop	N/A	0-800 mg*l ⁻¹ 0-2000 mg*l ⁻¹
Nitrógeno total	Spectroquant Nova 60	Kit: 114763	10-150 mg*l ⁻¹
Fosforo	Spectroquant Nova 60	Kit: 100616	3-100 mg*l ⁻¹
DQO	Spectroquant Nova 60	Kit: 114541	25-1500 mg*l ⁻¹
Turbidez	Fotómetro SQ118	Método: 113	10-400 UNF
pH	Oakton pH/CON 510 series	N/A	-2-16 pH
Conductividad	Oakton pH/CON 510 series	N/A	0-1999 µS
(TDS) ppm	Oakton pH/CON 510 series	N/A	0-999 ppm
Oxígeno Disuelto	HANNA HI9146	N/A	0.0-45 ppm

Resultados de los análisis fisicoquímicos

Parámetro	Resultado
DBO ₅	750 mg*l ⁻¹
DQO	1054.75 mg*l ⁻¹
Nitrógeno total	127.3 mg*l ⁻¹
Fosforo	56.9 mg*l ⁻¹
Turbidez	238 UNF
pH	6.89
Conductividad eléctrica	1411 µS
Solidos disueltos totales	700 ppm
Sustancias solidas en suspensión	474 mg*l ⁻¹
Oxígeno Disuelto	0.00 ppm

Comparación con la Norma NOM 001 SEMARNAT 2021 y los indicadores de calidad de agua de la SEMARNAT

Parámetro	Concentración agua residual	Concentración máxima permitida	Clasificación
DQO	1055 mg*l ⁻¹	210 mg*l ⁻¹	Fuertemente contaminada
SST	474 mg*l ⁻¹	84 mg*l ⁻¹	Fuertemente contaminada
N _T	127 mg*l ⁻¹	35 mg*l ⁻¹	Fuertemente contaminada
Fosforo	57.3 mg*l ⁻¹	21 mg*l ⁻¹	Fuertemente contaminada
pH	6.9	6-9	Dentro del rango
DBO	750 mg*l ⁻¹	DBO<3	Fuertemente contaminada
Oxígeno Disuelto	0.0 ppm / 0%	OD>70% y OD<110%	Fuertemente contaminada

Concentrado de mediciones

DBO₅

Se colocaron 2 muestras para diferentes rangos esperados de concentración de DBO₅, las mediciones corresponden a los 5 días que duro la medición.

	Muestra 1	Muestra 2
Dia 1	420 mg*l ⁻¹	500 mg*l ⁻¹
Dia 2	420 mg*l ⁻¹	600 mg*l ⁻¹
Dia 3	420 mg*l ⁻¹	650 mg*l ⁻¹
Dia 4	420 mg*l ⁻¹	700 mg*l ⁻¹
Dia 5	420 mg*l ⁻¹	750 mg*l ⁻¹

Nitrógeno total

Se realizaron mediciones cada 5 minutos a lo largo de 1 hora para tener un valor constante.

Medición	Concentración
1	127 mg ^{*l} -1
2	127 mg ^{*l} -1
3	127 mg ^{*l} -1
4	127 mg ^{*l} -1
5	127 mg ^{*l} -1
6	127 mg ^{*l} -1
7	127 mg ^{*l} -1
8	128 mg ^{*l} -1
9	128 mg ^{*l} -1
10	128 mg ^{*l} -1
11	127 mg ^{*l} -1
12	128 mg ^{*l} -1
Promedio	127.3 mg ^{*l} -1

Fosforo

Se realizaron mediciones cada 3 minutos a lo largo de 30 minutos para tener un valor constante.

Medición	Concentración
1	56.2 mg ^{*l} -1
2	56.5 mg ^{*l} -1
3	56.6 mg ^{*l} -1
4	56.8 mg ^{*l} -1
5	56.8 mg ^{*l} -1
6	56.8 mg ^{*l} -1
7	56.4 mg ^{*l} -1
8	57.0 mg ^{*l} -1
9	57.1 mg ^{*l} -1
10	56.9 mg ^{*l} -1
11	57.2 mg ^{*l} -1
12	57.1 mg ^{*l} -1
13	57.2 mg ^{*l} -1
14	57.3 mg ^{*l} -1
15	56.7 mg ^{*l} -1
16	57.0 mg ^{*l} -1
17	57.1 mg ^{*l} -1
18	57.3 mg ^{*l} -1
19	57.2 mg ^{*l} -1
20	57.3 mg ^{*l} -1
Promedio	56.9 mg ^{*l} -1

DQO

Se realizaron mediciones cada 5 minutos a lo largo de 1 hora para tener un valor constante.

Medición	Concentración
1	1056 mg ^{*l} -1
2	1058 mg ^{*l} -1
3	1056 mg ^{*l} -1
4	1054 mg ^{*l} -1
5	1055 mg ^{*l} -1
6	1055 mg ^{*l} -1
7	1055 mg ^{*l} -1
8	1055 mg ^{*l} -1
9	1053 mg ^{*l} -1
10	1054 mg ^{*l} -1
11	1055 mg ^{*l} -1
12	1053 mg ^{*l} -1
Promedio	1054.75 mg ^{*l} -1

Turbidez

Medición	Concentración
1	238 UNF

pH

Medición	Valor
2	6.72

Conductividad

Medición	Valor
1	1411 μS

Solidos Disueltos Totales

Medición	Concentración
1	700 mg ^{*l} -1

Sustancias Solidas en Suspensión

Medición	Concentración
1	474 mg ^{*l} -1

Oxígeno Disuelto

Medición	Concentración
1	0.00 ppm

Anexo 2 Certificados de calidad de equipos de laboratorio



Applicability of Spectroquant® Test Kits for Self-Monitoring Eignung der Spectroquant® Testsätze zur Selbstüberwachung Aptitud de los equipos de ensayo Spectroquant® para autovigilancia

The characteristic data of the procedure of the following test kit were determined in accordance with ISO 8466-1 and DIN 38402 A51 "Calibration of analysis methods" during the production control process.
Die Verfahrenskenndaten für den unten genannten Testsatz wurden gemäß ISO 8466-1 und DIN 38402 A51 "Kalibrierung von Analyseverfahren" bei der Produktionsendkontrolle ermittelt.
Los datos característicos del procedimiento para el equipo de ensayo abajo citado se determinaron según ISO 8466-1 y DIN 38402 A51 "Calibración de procedimientos analíticos" durante el control final de producción.

Spectroquant® Phosphate Cell Test, Cat. No. 1.00616 Spectroquant® Phosphat-Küvettest, Art.-Nr. 1.00616 Spectroquant® Test en cubetas Fosfatos, Art. Núm. 1.00616

Measuring Range / Messbereich / Intervalo de medida	3.0 – 100.0 mg/l PO ₄ -P
Sensitivity: 0.010 A (absorbance) = Empfindlichkeit: 0.010 E (Extinktion) = Sensibilidad: 0.010 A (absorbancia) =	0.4 mg/l PO ₄ -P
Lower Limit of Detection (LLD) Nachweisgrenze Límite de detección	0.14 mg/l PO ₄ -P
Method Detection Limit (MDL) Bestimmungsgrenze Límite de determinación	0.3 mg/l PO ₄ -P
Confidence Interval (P = 95 %) (average value of lots) Vertrauensbereich (95 % Wahrscheinlichkeit) (Mittelwert aller Chargen) Intervalo de confianza (95 % de probabilidad) (valor medio de todos los lotes)	± 0.9 mg/l PO ₄ -P
Standard Deviation of the Method (average value of lots) Verfahrensstandardabweichung (Mittelwert aller Chargen) Desviación estándar del procedimiento (valor medio de todos los lotes)	± 0.38 mg/l PO ₄ -P
Variation Coefficient of the Method (average value of lots) Verfahrensvariationskoeffizient (Mittelwert aller Chargen) Coeficiente de variación del procedimiento (valor medio de todos los lotes)	± 0.72 %
Number of Lots for calculation Anzahl Produktionschargen zur Berechnung Número de lotes de producción para el cálculo	28
Accuracy / Genauigkeit / Exactitud	± 1.2 mg/l PO ₄ -P

Merck KGaA, Darmstadt, Germany 25.06.2021

This document is computer-generated and is valid without signature.
Dieses Dokument wurde maschinell erstellt und ist ohne Unterschrift gültig.
Este documento se ha creado de forma automática y es válido sin firma.

The life science business of Merck KGaA, Darmstadt, Germany operates as MilliporeSigma in the U.S. and Canada.

© 2021 Merck KGaA, Darmstadt, Germany and/or its affiliates. All Rights Reserved. The vibrant M is a trademark of Merck KGaA, Darmstadt, Germany. All other trademarks are the property of their respective owners. Detailed information on trademarks is available via publicly available resources.



Merck KGaA, 64271 Darmstadt, Germany • EMD Millipore Corporation, Burlington, USA

certificate of quality

qualitätszertifikat • certificado de calidad

Applicability of Spectroquant® Test Kits for Self-Monitoring
Eignung der Spectroquant® Testsätze zur Selbstüberwachung
Aptitud de los equipos de ensayo Spectroquant® para autovigilancia

The characteristic data of the procedure of the following test kit were determined in accordance with ISO 8466-1 and DIN 38402 A51 "Calibration of analysis methods" during the production control process.
 Die Verfahrenskennndaten für den unten genannten Testsatz wurden gemäß ISO 8466-1 und DIN 38402 A51 "Kalibrierung von Analyseverfahren" bei der Produktionsendkontrolle ermittelt.
 Los datos característicos del procedimiento para el equipo de ensayo abajo citado se determinaron según ISO 8466-1 y DIN 38402 A51 "Calibración de procedimientos analíticos" durante el control final de producción.

Spectroquant® Phosphate Cell Test, Cat. No. 1.00673
Spectroquant® Phosphat-Küvettest, Art.-Nr. 1.00673
Spectroquant® Test en cubetas Fosfatos, Art. Núm. 1.00673

Measuring Range / Messbereich / Intervalo de medida	3.0 – 100.0 mg/l PO ₄ -P
Sensitivity: 0.010 A (absorbance) = Empfindlichkeit: 0.010 E (Extinktion) = Sensibilidad: 0.010 A (absorbancia) =	0.4 mg/l PO ₄ -P
Lower Limit of Detection (LLD) Nachweisgrenze Límite de detección	0.2 mg/l PO ₄ -P
Method Detection Limit (MDL) Bestimmungsgrenze Límite de determinación	0.4 mg/l PO ₄ -P
Confidence Interval (P = 95 %) (average value of lots) Vertrauensbereich (95 % Wahrscheinlichkeit) (Mittelwert aller Chargen) Intervalo de confianza (95 % de probabilidad) (valor medio de todos los lotes)	± 0.9 mg/l PO ₄ -P
Standard Deviation of the Method (average value of lots) Verfahrensstandardabweichung (Mittelwert aller Chargen) Desviación estándar del procedimiento (valor medio de todos los lotes)	± 0.38 mg/l PO ₄ -P
Variation Coefficient of the Method (average value of lots) Verfahrensvariationskoeffizient (Mittelwert aller Chargen) Coefficiente de variación del procedimiento (valor medio de todos los lotes)	± 0.73 %
Number of Lots for calculation Anzahl Produktionschargen zur Berechnung Número de lotes de producción para el cálculo	7
Accuracy / Genauigkeit / Exactitud	± 1.3 mg/l PO ₄ -P

Merck KGaA, Darmstadt, Germany 22.06.2021

This document is computer-generated and is valid without signature.
 Dieses Dokument wurde maschinell erstellt und ist ohne Unterschrift gültig.
 Este documento se ha creado de forma automática y es válido sin firma.

The life science business of Merck KGaA, Darmstadt, Germany operates as MilliporeSigma in the U.S. and Canada.

© 2021 Merck KGaA, Darmstadt, Germany and/or its affiliates. All Rights Reserved. The vibrant M is a trademark of Merck KGaA, Darmstadt, Germany. All other trademarks are the property of their respective owners. Detailed information on trademarks is available via publicly available resources.



Merck KGaA, 64271 Darmstadt, Germany • EMD Millipore Corporation, Burlington, USA

certificate of quality

qualitätszertifikat • certificado de calidad

Applicability of Spectroquant® Test Kits for Self-Monitoring
Eignung der Spectroquant® Testsätze zur Selbstüberwachung
Aptitud de los equipos de ensayo Spectroquant® para autovigilancia

The characteristic data of the procedure of the following test kit were determined in accordance with ISO 8466-1 and DIN 38402 A51 "Calibration of analysis methods" during the production control process.
 Die Verfahrenskennndaten für den unten genannten Testsatz wurden gemäß ISO 8466-1 und DIN 38402 A51 "Kalibrierung von Analyseverfahren" bei der Produktionsendkontrolle ermittelt.
 Los datos característicos del procedimiento para el equipo de ensayo abajo citado se determinaron según ISO 8466-1 y DIN 38402 A51 "Calibración de procedimientos analíticos" durante el control final de producción.

Spectroquant® Nitrogen (total) Cell Test, Cat. No. 1.14763
Spectroquant® Stickstoff (gesamt)-Küvettest, Art.-Nr. 1.14763
Spectroquant® Test en cubetas Nitrógeno total, Art. Núm. 1.14763

Measuring Range / Messbereich / Intervalo de medida	10 – 150 mg/l N
Sensitivity: 0.010 A (absorbance) = Empfindlichkeit: 0.010 E (Extinktion) = Sensibilidad: 0.010 A (absorbancia) =	2 mg/l N
Lower Limit of Detection (LLD) Nachweisgrenze Límite de detección	2.1 mg/l N
Method Detection Limit (MDL) Bestimmungsgrenze Límite de determinación	5 mg/l N
Confidence Interval (P = 95 %) (average value of lots) Vertrauensbereich (95 % Wahrscheinlichkeit) (Mittelwert aller Chargen) Intervalo de confianza (95 % de probabilidad) (valor medio de todos los lotes)	± 3 mg/l N
Standard Deviation of the Method (average value of lots) Verfahrensstandardabweichung (Mittelwert aller Chargen) Desviación estándar del procedimiento (valor medio de todos los lotes)	± 1.1 mg/l N
Variation Coefficient of the Method (average value of lots) Verfahrensvariationskoeffizient (Mittelwert aller Chargen) Coefficiente de variación del procedimiento (valor medio de todos los lotes)	± 1.4 %
Number of Lots for calculation Anzahl Produktionschargen zur Berechnung Número de lotes de producción para el cálculo	49
Accuracy / Genauigkeit / Exactitud	± 5 mg/l N

Merck KGaA, Darmstadt, Germany 03.05.2021

This document is computer-generated and is valid without signature.
 Dieses Dokument wurde maschinell erstellt und ist ohne Unterschrift gültig.
 Este documento se ha creado de forma automática y es válido sin firma.

The life science business of Merck KGaA, Darmstadt, Germany operates as MilliporeSigma in the U.S. and Canada.

© 2021 Merck KGaA, Darmstadt, Germany and/or its affiliates. All Rights Reserved. The vlogo M is a trademark of Merck KGaA, Darmstadt, Germany.
 All other trademarks are the property of their respective owners. Detailed information on trademarks is available via publicly available resources.



Merck KGaA, 64271 Darmstadt, Germany • EMD Millipore Corporation, Burlington, USA



Certificate of quality

Qualitätszertifikat • Certificado de calidad

Applicability of Spectroquant® Test Kits for Self-Monitoring. Eignung der Spectroquant® Testsätze zur Selbstüberwachung Aptitud de los equipos de ensayo Spectroquant® para autovigilancia

The characteristic data of the procedure of the following test kit were determined in accordance with ISO 8466-1 and DIN 38402 A51 "Calibration of analysis methods" during the production control process.

Die Verfahrenskenndaten für den unten genannten Testsatz wurden gemäß ISO 8466-1 und DIN 38402 A51 "Kalibrierung von Analyseverfahren" bei der Produktionsendkontrolle ermittelt.

Los datos característicos del procedimiento para el equipo de ensayo abajo citado se determinaron según ISO 8466-1 y DIN 38402 A51 "Calibración de procedimientos analíticos" durante el control final de producción.

Spectroquant® COD Cell Test, Cat. No. 114541 Spectroquant® CSB-Küvettest, Art.-Nr. 114541 Spectroquant® Test en cubetas DQO, Art. Núm. 114541

Measuring Range / Messbereich / Intervalo de medida	25 – 1500 mg/l COD / CSB / DQO
Sensitivity: 0.010 A (absorbance) = Empfindlichkeit: 0.010 E (Extinktion) = Sensibilidad: 0.010 A (absorbancia) =	17 mg/l COD / CSB / DQO
Lower Limit of Detection (LLD) Nachweisgrenze Límite de detección	6.9 mg/l COD / CSB / DQO
Method Detection Limit (MDL) Bestimmungsgrenze Límite de determinación	18 mg/l COD / CSB / DQO
Confidence Interval (P = 95 %) (average value of lots) Vertrauensbereich (95 % Wahrscheinlichkeit) (Mittelwert aller Chargen) Intervalo de confianza (95 % de probabilidad) (valor medio de todos los lotes)	± 12 mg/l COD / CSB / DQO
Standard Deviation of the Method (average value of lots) Verfahrensstandardabweichung (Mittelwert aller Chargen) Desviación estándar del procedimiento (valor medio de todos los lotes)	± 5.0 mg/l COD / CSB / DQO
Variation Coefficient of the Method (average value of lots) Verfahrensvariationskoeffizient (Mittelwert aller Chargen) Coeficiente de variación del procedimiento (valor medio de todos los lotes)	± 0.65 %
Number of Lots for calculation Anzahl Produktionschargen zur Berechnung Número de lotes de producción para el cálculo	62
Accuracy / Genauigkeit / Exactitud	± 29 mg/l COD / CSB / DQO

Merck KGaA, Darmstadt, 02.09.13

Ralf Oit

Merck KGaA, 64271 Darmstadt, Germany
EMD Millipore Corporation, Billerica, USA