



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

“2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria”

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

“TRATAMIENTO DE UN AGUA RESIDUAL AZUCARERA
UTILIZANDO UN SISTEMA HÍBRIDO (DIGESTIÓN
ANAEROBIA-HUMEDAL CONSTRUIDO)”.

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA QUÍMICA

PRESENTA:

I.Q. Viridiana Solano De La Cruz

DIRECTOR DE TESIS:

M.I. Norma Alejandra Vallejo Cantú

CODIRECTOR DE TESIS:

Dr. Alejandro Alvarado Lassman



ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO.

FEBRERO 2020



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

FECHA : 20/01/2020

ASUNTO: Revisión de Trabajo Escrito

C. MARIO LEONCIO ARRIJOJA RODRIGUEZ
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACION.
P R E S E N T E

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C. :

VIRIDIANA SOLANO DE LA CRUZ

la cual lleva el título de:

"TRATAMIENTO DE UN AGUA RESIDUAL AZUCARERA UTILIZANDO UN SISTEMA HIBRIDO (DIGESTION ANAEROBIA-HUMEDAL CONSTRUIDO)".

Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

PRESIDENTE : M.I. **NORMA ALEJANDRA VALLEJO CANTU**

SECRETARIO : DR. **ALEJANDRO ALVARADO LASSMAN**

VOCAL : DR. **ERIK SAMUEL ROSAS MENDOZA**

VOCAL SUP. : DR. **JUAN MANUEL MENDEZ CONTRERAS**

FIRMA

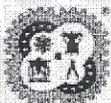
FIRMA

FIRMA

FIRMA

EGRESADO(A) DE LA MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA

OPCION: I **Tesis**



Declaración

Yo, Viridiana Solano De La Cruz, certifico que esta tesis, que tiene una extensión de 84 cuartillas, ha sido escrita por mí y constituye el registro escrito del trabajo de tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Química bajo la asesoría y dirección de MIQ. Norma Alejandra Vallejo Cantú y Dr. Alejandro Alvarado Lassman y no ha sido sometida en ninguna otra institución previamente.

Fui admitido como estudiante de la maestría en FEBRERO 2020 y mi trabajo de tesis fue liberado para su impresión el 6 FEBRERO 2020.

También declaro que, al presentar esta tesis, el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba tiene permiso para publicarla en formato electrónico bajo las regulaciones propias de la institución y que si existe algún acuerdo de confidencialidad de la información lo haré saber en forma escrita para que se omitan las secciones correspondientes.

Fecha: 7 FEBRERO 2020

Firma: _____



Vo. Bo.

Asesor: MIQ. Norma Alejandra Vallejo Cantú

Firma del asesor: _____



DEDICATORIAS

A Dios por la vida, por todas las bendiciones que he recibido, por acompañarme en cada momento y no permitir que me aparte de él, por escucharme todos los días, por cada logro que he cumplido, por el todo el amor que me ha demostrado, por todo lo que he aprendido hasta este momento y por enseñarme el verdadero valor de la fe.

A mis padres María y Luis que son lo más importante para mí, por ser una motivación, por demostrarme su amor, por el gran esfuerzo que han hecho para poder obtener un grado profesional, por estar en todo momento conmigo, por brindarme siempre su apoyo y confianza, por la educación que me brindaron, por enseñarme a crecer como persona y por el aprendizaje que he adquirido gracias a ellos.

A mi hermana y hermanos Cristina, Luis y Edgar, que también son las personas más importantes para mí, porque al igual que mis padres fueron una gran motivación para continuar con mis estudios y conseguir mis metas, por apoyarme en todo momento, porque a pesar de todo seguimos unidos, por su amor y por todo lo que he aprendido gracias a ellos.

A mis tíos Paula, Demetrio y Víctor por sus consejos para crecer como persona, por su cariño, por siempre estar al pendiente de mí, por estar en cada momento importante y por el apoyo que me han brindado.

A mi abuelita Ceferina por sus oraciones, por los consejos sabios que me ha brindado para que pueda tener un futuro mejor, por siempre estar al pendiente de mi bienestar y por su cariño.

A mis primas Paulina, Janet, Obdulia y Valeria que hemos crecido como hermanas y siempre me han demostrado su apoyo sincero, por compartir conmigo cada logro que he tenido y por el cariño.

A mis amigos de laboratorio y de generación Iris, Anahí, Catalina, Luisa, Oscar, Francisco y Omar por la compañía en la realización del proyecto, por los momentos divertidos que pasamos, por su amistad y por el apoyo que me brindaron.

A mis amigas de licenciatura Luz, Eneida, Abril, Claudia, Diana, Irma, Kenia, Lupita, Marlen y Sara, que a pesar de la distancia siempre he contado con su apoyo y amistad sincera y por todos los momentos que hemos pasado.

RECONOCIMIENTOS

A la MIQ. Norma Alejandra Vallejo Cantú por todo el apoyo que me brindo para la realización del proyecto, por su paciencia, amabilidad y la confianza al darme la oportunidad de formar parte de su equipo de trabajo una vez más, por los consejos para crecer profesionalmente y por motivarme para dar siempre lo mejor.

Al Dr. Alejandro Alvarado Lassman por resolver mis dudas en la realización de mi trabajo, por compartir sus conocimientos en las materias impartidas, por su apoyo y confianza y por también aceptarme para ser parte de este proyecto.

Al Dr. Erik Samuel Rosas Mendoza por su paciencia al realizar las correcciones necesarias en mi trabajo y ayudarme a presentar un buen trabajo, por las recomendaciones y por sus enseñanzas.

Al Dr. Juan Manuel Méndez Contreras por sus clases impartidas, por todo el apoyo y confianza que me brindo, por todos los consejos para crecer profesionalmente, por compartir sus experiencias profesionales para motivarme y por su amistad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme la beca con No. 886293 para poder realizar mis estudios de posgrado.

RESUMEN

“Tratamiento de un agua residual azucarera utilizando un sistema híbrido (digestión anaerobia – humedal construido)”

Elaborada por: Ing. Viridiana Solano De La Cruz

Dirigida por: M.I.Q. Normal Alejandra Vallejo Cantú

Dr. Alejandro Alvarado Lassman

La industria azucarera ha tenido problemas de contaminación ambiental, uno de ellos es la descarga de aguas residuales sin un tratamiento previo con altas concentraciones de materia orgánica ocasionando problemas al ecosistema acuático y terrestre. Los procesos biológicos son una buena alternativa para el tratamiento y aprovechamiento de los componentes presentes en aguas residuales. El principal objetivo de este trabajo fue el tratamiento de este efluente por medio de un sistema híbrido que comprende dos etapas de tratamiento. La primera etapa consiste en un Reactor de Biopelícula Anaerobio (RBA) en donde se lleva a cabo la hidrólisis la cual es la primera etapa de la digestión anaerobia y se encarga de degradar y descomponer los principales componentes de la materia orgánica para ser aprovechados de manera más fácil. El RBA contiene un panel interno utilizado como soporte hecho de aluminio y fibras de nylon poliéster para favorecer la adhesión del consorcio bacteriano, la segunda etapa es un tratamiento ecológico en un Humedal Construido compuesto por tres celdas de acrílico conteniendo tres tipos de soporte: PET, tezontle y piedra de río así como tres especies vegetales: *Canna hybrids*, *Spathiphyllum* y *Typha spp.* Los humedales son una alternativa eficiente y sin costo energético debido a que de manera natural logran aprovechar y remover los contaminantes. El tratamiento inició con una concentración de 13 g/DQO como alimentación al RBA con valores de remoción del 64 % en DQO seguido de la alimentación al humedal con una concentración de 3 g DQO/L y obteniendo remociones del 95%.

ABSTRACT

“Treatment of a sugar wastewater using a hybrid system (anaerobic digestion - constructed wetland)”

By: Ing. Viridiana Solano De La Cruz

Advisor(s): M.I.Q. Normal Alejandra Vallejo Cantú

Dr. Alejandro Alvarado Lassman

The sugar industry has had problems of environmental pollution, one of them is the discharge of wastewater without a previous treatment with high concentration of organic matter causing problems to the aquatic and terrestrial ecosystem. Biological processes are a good alternative for use and treatment of the components present in wastewater. The main objective of this work was the treatment of this effluent by means of a hybrid system comprising two treatment stages. The first consists of a Reactor of Anaerobic Biofilm (RBA) where the first stage of anaerobic digestion hydrolysis is carried out and it is also, responsible for degrading and decomposing the main components of organic matter to be used more easily. The RBA contains an internal panel used as a support made of aluminum and polyester nylon fibers to favor the adhesion of the bacterial consortium. The second stage is an ecological treatment in a Constructed Wetland composed of three acrylic cells containing three types of support: PET, tezontle and river stone as well as three plant species *Canna* hybrids, *Spathiphyllum* and *Typha* spp., Wetlands are an efficient and energy-free alternative because they naturally take advantage of and remove contaminants. The treatment began with a concentration of 13 g/COD as feed to the RBA with removal values of 64% in COD followed by feeding to the wetland with a concentration of 3 g COD/L and obtaining 95% removals.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABLAS.....	VIII
NOMENCLATURA	IX
INTRODUCCIÓN	X
JUSTIFICACIÓN	XI
OBJETIVOS	XII
CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	1
1.1 La industria azucarera en México.....	1
1.1.1 Producción de azúcar	2
1.1.2 Contaminacion de la industria azucarera.....	3
1.1.3 Agua residual de la industria azucarera.....	4
1.2 Tratamiento de aguas residuales	5
1.3 Digestión anaerobia	6
1.3.1 Hidrólisis	9
1.4 Reactores anaerobios de biopelícula	10
1.5 Humedales	11
1.6 Tratamiento de aguas residuales en humedales.....	12
1.7 Humedales construidos.....	13
1.7.1 Humedales construidos de flujo superficial.....	13
1.7.2 Humedales construidos de flujo subsuperficial.....	14
1.8 Vegetación en humedales	16
1.8.1 <i>Spathiphyllum</i>	17
1.8.2 <i>Canna hybrids</i>	17
1.8.3 <i>Typha spp.</i>	18

1.9	Antecedentes	18
CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS		22
2.1	Recolección de la muestra	23
2.2	Caracterización fisicoquímica de agua residual	23
2.2.1	Determinación de pH	23
2.2.2	Determinación de Demanda Química de Oxígeno (DQO)	23
2.2.3	Determinación de Sólidos Totales (ST) y Sólidos Totales Volátiles (STV)	24
2.2.4	Determinación de Grasas y Aceites.....	25
2.2.5	Determinación de Carbohidratos	25
2.2.6	Determinación de Nitrógeno Total	25
2.2.7	Determinación de Fósforo.....	25
2.3	Operación del sistema híbrido a escala microcosmos	26
2.3.1	Carga Volumétrica Aplicada (Cva).....	26
2.3.2	Tiempo de Residencia Hidráulica (TRH)	26
2.3.3	Características del Reactor de Hidrólisis Anaerobio (RHA)	27
2.3.4	Características del Humedal Construido escala Microcosmo (HCMi)....	27
2.4	Diseño y construcción del Reactor de Biopelícula Anaerobio (RBA).....	28
2.5	Arranque y operación del RBA	30
2.6	Diseño y construcción del Humedal Construido de Flujo Subsuperficial Vertical escala mesocosmos (HCMe)	30
2.7	Sembrado de las especies vegetales.....	32
2.8	Alimentación al humedal construido.....	33
2.9	Monitoreo del sistema de tratamiento	33
CAPITULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN		35

3.1	Obtención del agua residual.....	35
3.2	Caracterización fisicoquímica.....	35
3.2.1	Caracterización microbiológica.....	36
3.3	Reactor de Hidrólisis Anaerobio (RHA) a escala microcosmo.....	36
3.3.1	Remoción del Reactor de Hidrólisis Anaerobio (RHA).....	37
3.4	Humedal Construido escala Microcosmos (HCMi)	39
3.4.1	Remoción del Humedal Construido escala microcosmos.....	39
3.5	Construcción del Reactor de Biopelícula Anaerobio	42
3.5.1	Colonización y adaptación del Reactor de Biopelícula Anaerobio	44
3.6	Construcción del Humedal Construido de Flujo Subsuperficial Vertical (HCMe)	45
3.7	Remoción del Reactor de Biopelícula Anaerobio	48
3.7.1	Cálculo de concentraciones.....	48
3.7.2	Remoción de Demanda Química de Oxígeno en el RBA	49
3.7.3	Remoción de Sólidos Totales y Sólidos Totales Volátiles del reactor de biopelícula anaerobio.....	51
3.7.4	Monitoreo de pH	51
3.7.5	Remoción de Demanda Química de Oxígeno en el Humedal Construido	52
3.7.6	Remoción de Sólidos Totales y Sólidos Totales Volátiles en el Humedal Construido	53
3.8	Monitoreo de las especies vegetales	54
3.8.1	<i>Typha spp.</i>	54
3.8.2	<i>Spathiphyllum</i>	55
3.8.3	<i>Canna hybrids</i>	57

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 60
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Productividad del campo cañero mexicano.....	1
Figura 1.2 Generación de coproductos y subproductos de la industria azucarera.....	3
Figura 1.3 Esquema de la digestión anaerobia de materia orgánica compleja.	8
Figura 1.4 Esquema del Sistema de Flujo Vertical.....	15
Figura 1.5 Esquema de Sistema de Flujo Horizontal.....	16
Figura 1.6 <i>Spathiphyllum</i>	17
Figura 1.7 <i>Canna hybrid</i>	18
Figura 1.8 <i>Typha spp.</i>	18
Figura 2.1 Metodología del proyecto	22
Figura 2.2 Reactor de Hidrólisis Anaerobio.....	27
Figura 2.3 Diseño de la celda a escala microcosmos.....	28
Figura 2.4 Diseño del Reactor de Biopelícula Anaerobio (RBA)	29
Figura 2.5 Diseño del Humedal Construido a escala Mesocosmos (HCMe)	31
Figura 2.6 Configuración de sembrado para celdas del HCMe	32
Figura 3.1 Agua Residual.....	35
Figura 3.2 Reactor de Hidrólisis Anaerobio.....	36
Figura 3.3 Porcentaje de remoción de DQO _T y DQO _S de RHA.....	38
Figura 3.4 Porcentaje de remoción ST y STV del RHA.....	38
Figura 3.5 Sistema de humedales.....	39
Figura 3.6 Porcentaje de remoción de DQO _T y DQO _S del HCMi.....	40
Figura 3.7 Porcentaje de remoción de ST y STV del HCMi.....	41
Figura 3.8 Porcentaje de remoción por especie del HCMi.	42
Figura 3.9 Tanque del reactor.	43
Figura 3.10 Panel de soporte interno.	43
Figura 3.11 Bomba peristáltica.....	43
Figura 3.12 Tapas internas.....	43
Figura 3.13 Tapa externa.	43
Figura 3.14 Reactor de Biopelícula Anaerobia.	44

Figura 3.15 Distribuidor de flujo.....	45
Figura 3.16 Precipitado sólido de efluente.	45
Figura 3.17 Panel colonizado.	45
Figura 3.18 Celdas de acrílico.....	46
Figura 3.19 Tubos de PVC.....	46
Figura 3.20 Válvulas de alimentación.....	46
Figura 3.21 Contenedor de efluente de salida.....	46
Figura 3.22 Distribución del soporte.	47
Figura 3.23 Distribución de tubos de PVC.....	47
Figura 3.24 Celda con material de soporte.....	47
Figura 3.25 Porcentaje de remoción de DQO_T y DQO_S en el RBA.	50
Figura 3.26 Porcentaje de remoción en ST y STV en el RBA.	51
Figura 3.27 Monitoreo de pH en el RBA.....	52
Figura 3.28 Porcentaje de remoción de $DQOT$ y $DQOS$ en el HCMe.	53
Figura 3.29 Porcentaje de remoción de ST y STV en el HCMe.	54
Figura 3.30 <i>Typha spp</i>	56
Figura 3.31 <i>Spathiphyllum</i>	56
Figura 3.32 <i>Canna hybrids</i>	57
Figura 3.33 Porcentaje de remoción por celda y especie.....	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Características de aguas residuales de la industria azucarera.....	4
Tabla 2.1 Parámetros fisicoquímicos y métodos de prueba	24
Tabla 2.2 Características físicas del RBA	30
Tabla 2.3 Características de las celdas de HCMe.....	32
Tabla 2.4 Frecuencia de medición de parámetros generales para vegetación	33
Tabla 3.1 Caracterización fisicoquímica del agua residual.....	37
Tabla 3.2 Distribución de especies vegetales	40
Tabla 3.3 Características de crecimiento (<i>Typha spp.</i>)	55
Tabla 3.4 Características de crecimiento (<i>Spathiphyllum</i>).....	57
Tabla 3.5 Características de crecimiento (<i>Canna hybrids</i>).....	58

NOMENCLATURA

Abreviatura	Significado	Unidades
AGV	Ácidos Grasos Volátiles	mg/L
DQO	Demanda Química de Oxígeno	g/L
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno	g/L
HC	Humedal Construido	---
HCMi	Humedal Construido escala Microcosmos	---
HCMe	Humedal Construido escala Mesococosmos	---
pH	Potencial de Hidrógeno	---
RHA	Reactor de Hidrólisis Anaerobio	---
RBA	Reactor de Biopelícula Anaerobio	---
SST	Sólidos Suspendidos Totales	g/L
S. Sed	Sólidos Sedimentables	mg/L
ST	Sólidos Totales	g/L
STV	Sólidos Totales Volátiles	g/L
SFV	Sistema de Flujo Vertical	---
SFH	Sistema de Flujo Horizontal	---
TRH	Tiempo de Residencia Hidráulica	h

INTRODUCCIÓN

El agua es utilizada a nivel industrial, pero su consumo no siempre se usa de una manera racional. En los últimos años, los efectos ambientales de las actividades industriales han aumentado considerablemente. La industria de la caña de azúcar se encuentra entre las industrias con mayor demanda de agua, además, es una fuente importante de contaminación orgánica no tóxica. La industria azucarera utiliza aproximadamente 1500–2000 L de agua por tonelada de caña de azúcar procesada y genera aproximadamente 1000 L de agua residual (Sahu *et al.*, 2017). Estas aguas si se descargan sin tratamiento, producen problemas de contaminación en los ecosistemas acuáticos y terrestres, cuando no se tratan completamente generan un olor desagradable al ser liberadas al medio ambiente. Se requieren métodos de tratamiento adecuados para cumplir con los estándares de descarga de efluentes (Kushwaha, 2013), dentro de estos tratamientos se encuentran los procesos biológicos, para el aprovechamiento de las altas cantidades de materia orgánica.

Se han utilizado diferentes tecnologías para tratar las aguas residuales industriales, sin embargo, los métodos de tratamiento dependen del tipo de contaminantes presentes (Sahu *et al.*, 2017). La selección de tecnologías alternativas de bajo costo y eficientes para el tratamiento de aguas residuales es importante, especialmente en países que se encuentran en desarrollo. Para este propósito, los humedales construidos, son una opción razonable. Se han utilizado durante décadas por su capacidad de eliminar contaminantes orgánicos, generalmente son utilizados para el tratamiento de aguas residuales municipales. La digestión anaerobia en combinación con los humedales construidos crea un sistema híbrido que permite una alternativa eficiente y de bajo costo energético para el tratamiento de aguas residuales (Wu *et al.*, 2015).

JUSTIFICACIÓN

El agua residual de la industria azucarera, tiene un alto contenido de materia orgánica. Estos efluentes no tratados contienen aproximadamente una DBO 1700–6600 mg/L, una DQO 2300–8000 mg/L y SST 5000 mg/L (Sahu *et al.*, 2017). Dentro del proceso, el agua se utiliza para lavado de la caña, clarificación del jugo conocida como cachaza, limpieza de evaporadores, calentadores y purgas de calderas, en sistemas de enfriamiento y servicios sanitarios (Suárez-Velázquez, 2012).

El agua residual por lo general se desecha en los ríos y suelo sin un tratamiento previo ocasionando graves consecuencias. Por ello, es necesaria la implementación de sistemas para el tratamiento y aprovechamiento de los componentes presentes. Algunos de los tratamientos utilizados y que generan beneficios, son los procesos biológicos y la implementación de humedales (Wu *et al.*, 2015).

En los procesos biológicos como la digestión anaerobia se aprovecha gran cantidad de los componentes presentes en este tipo de aguas. El proceso utiliza por lo regular una comunidad microbiana que sigue una serie de etapas y se encargan de la remoción de materia orgánica presente para producir un combustible como es el biogás. En la digestión anaerobia se remueve hasta un 90 % de materia orgánica. Los humedales construidos, se presentan como una tecnología para el tratamiento principal o complementario de aguas residuales, principalmente en los casos donde resulta difícil construir, operar o mantener adecuadamente los sistemas de tratamiento convencionales (Díaz-Acero, 2014). Entre las ventajas que tienen estos sistemas frente a los tratamientos convencionales, están sus reducidos costos de operación y la baja generación de subproductos no deseados. Su proceso operacional se basa en la interacción de sus constituyentes principales: medio de soporte, plantas vasculares y microorganismos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Implementar un sistema de tratamiento híbrido (reactor anaerobio - humedal construido) para un agua residual de la industria azucarera.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar fisicoquímicamente el agua de una industria azucarera.
2. Diseñar y construir un Reactor de Biopelícula Anaerobio.
3. Diseñar y construir un humedal de flujo subsuperficial vertical.
4. Operar y monitorear el sistema de tratamiento híbrido.

CAPÍTULO 1
FUNDAMENTOS TEÓRICOS

CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 La industria azucarera en México

La caña de azúcar es la materia prima de la agroindustria azucarera. La producción nacional de caña se realiza en 683,008 hectáreas que generan 48,363,316 toneladas de materia prima que abastecen a 57 ingenios o fábricas azucareras localizados en 15 estados cañeros (Figura 1.1). Así mismo los coproductos y subproductos de la agroindustria azucarera (sacarosa, melazas, bagazo, cachazas y vinazas (Figura 1.2)) sirven como insumo para industrias que fabrican refrescos, jugos, néctares, galletera, repostería, licores, papel y cartón, tableros aglomerados, alimentos pecuarios y farmacéutica entre otros usos, contribuyendo al desarrollo industrial del país. (Aguilar-Rivera *et al.*, 2009)

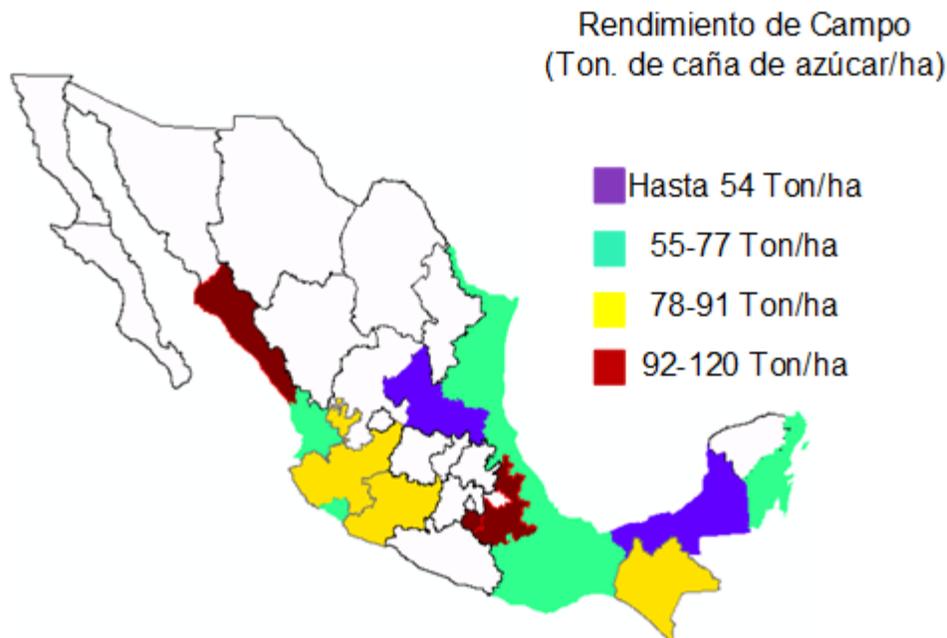


Figura 1.1 Productividad del campo cañero mexicano (Aguilar-Rivera *et al.*, 2009).

1.1.1 Producción de azúcar

La obtención del azúcar se realiza en diferentes etapas (Dominguez-Manjarrez *et al*, 2014):

1. Preparación de la caña: La caña se descarga en mesas alimentadoras y se conduce hacia cuchillas rotatorias donde se cortan los tallos se desmenuza la caña.
2. Molienda: Se lleva a cabo la extracción del jugo de la caña en molinos con agua a altas temperaturas.
3. Clarificación: Se remueven impurezas en el jugo de caña utilizando CaO que ayuda a neutralizar y sirve como coagulante para ayudar a que precipiten sólidos suspendidos presentes en el jugo, en la etapa de clarificación se realizan dos etapas de calentamiento a altas temperaturas.
4. Filtración: Los lodos obtenidos en la etapa de clarificación se separan del jugo clarificado y se filtran en filtros rotativos de vacío.
5. Evaporación: El jugo clarificado contiene aproximadamente 85 % de agua, del cual 65 % se evapora mediante evaporadores de cuádruple efecto. Con este sistema, el vapor que se introduce al primer cuerpo, logra producir evaporación en efecto múltiple y el vapor que sale del último de ellos se envía a un condensador barométrico. El jugo concentrado, llamado meladura, sale del último evaporador y contiene aproximadamente 65 % de sólidos y 35 % de agua.
6. Cristalización: La meladura se lleva a la operación de cristalización, la cual tiene lugar en evaporadores al vacío de simple efecto conocidos como “tachos”,

donde el jarabe se evapora hasta su punto de saturación. Finalmente se lleva a cabo la etapa de secado y envasado con sistemas de calidad.

1.1.2 Contaminación de la industria azucarera

Los ingenios azucareros contribuyen significativamente a la contaminación ambiental al generar aguas residuales, emisiones y residuos sólidos. Las grandes cantidades de materia vegetal y lodo del lavado de los molinos se vierten en cuerpos de agua dulce, absorbiendo el oxígeno disponible y provocando la muerte masiva de peces. Además, las fábricas liberan gases de combustión, cenizas, amoníaco y otras sustancias durante el procesamiento. Si todos los subproductos de la industria azucarera se usan para convertirlos en productos con valor agregado, minimizará la carga de contaminación en gran medida. Los desechos de la industria azucarera son, por lo tanto, un recurso prometedor para la tecnología ambiental si se aplican en el tratamiento de aguas y aguas residuales (Anasttopolus *et al.*, 2017).

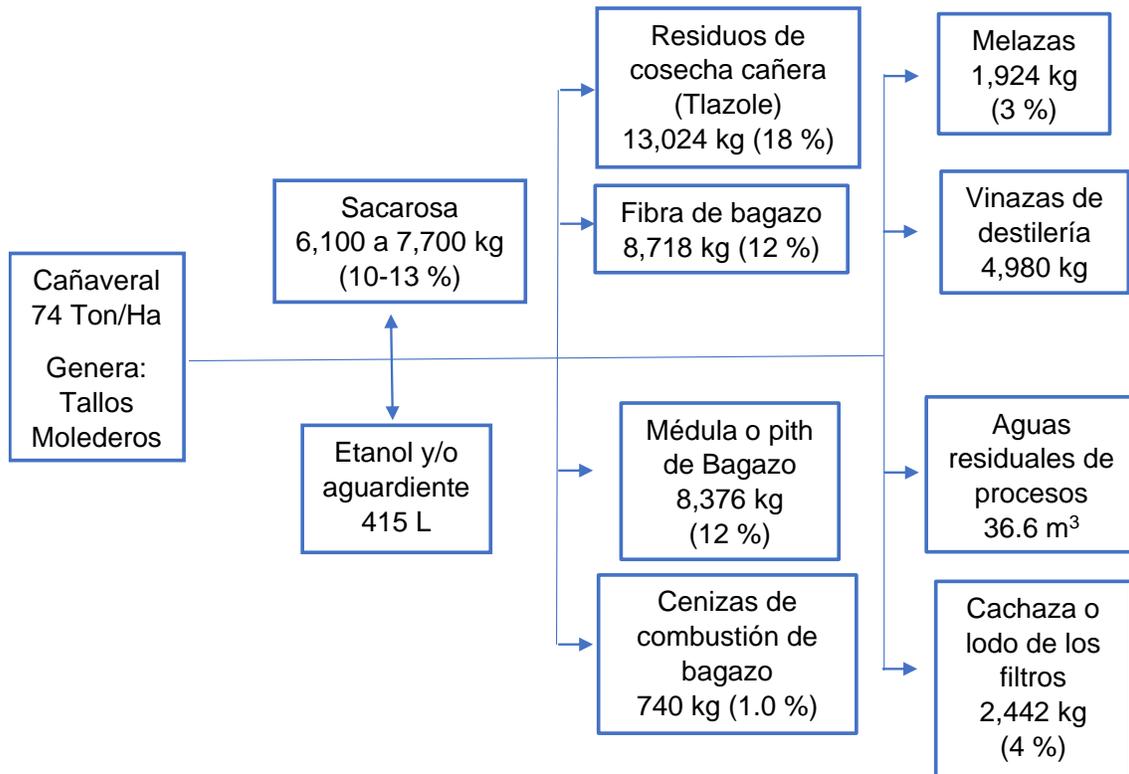


Figura 1.2 Generación de coproductos y subproductos de la industria azucarera. (Aguilar-Rivera *et al.*, 2009).

1.1.3 Agua residual de la industria azucarera

Este tipo de industria depende en alto grado de un abastecimiento adecuado de agua, pues es utilizada como componente de productos, o de manera indirecta en el control del proceso de producción; así como en el enfriamiento de máquinas que generan calor o en la limpieza de determinadas operaciones y partes del proceso productivo del azúcar (CONADESUCA, 2016).

Las aguas residuales del proceso pueden ser tratadas para la recuperación de productos químicos de valor agregado, lo que mejora el rendimiento de la industria azucarera. La tasa de carga orgánica depende del tipo de proceso involucrado en la elaboración de azúcar de caña o reprocesamiento de azúcar en bruto, y la infiltración de otras aguas en las unidades de tratamiento (Jayabalan *et al.*, 2018).

Tabla 1.1 Características de aguas residuales de la industria azucarera.

Características	Agua Residual Valores promedio (Díaz-de los Ríos <i>et al.</i>, 2016)	Descargas de aguas residuales (Cisneros <i>et al.</i>, 2011)	Unidades
pH	2.66	6.26	
Grasas y aceites	197	30.5	mg/L
DQO	17497	3,675	mg/L
DBO	5851	---	mg/L
Nitrógeno Total	98	---	mg/L
Fósforo	130	5.4	mg/L
SST	---	1,030	mg/L
S. Sed	---	2.40	mg/L

En la Tabla 1.1 se muestran las características principales que se encuentran en las aguas residuales de la industria azucarera. Los valores reportados constituyen valores promedios de diversas plantas durante varios años, por lo que la gran variabilidad y dispersión de algunos de ellos se debe a las diferentes condiciones que existen entre las fábricas, variedad de caña, tipo de suelos, condiciones de cosecha y la forma en que se realizan en su política medioambiental, entre otros (Díaz-de los Ríos *et al.*, 2016).

1.2 Tratamiento de aguas residuales

Las técnicas de tratamiento de aguas residuales de procesos industriales en este sector incluyen la filtración preliminar para la separación de sólidos filtrables; la compensación de flujo y carga; la sedimentación para la reducción de sólidos en suspensión utilizando clarificadores; el tratamiento biológico, generalmente tratamiento anaeróbico seguido de tratamiento aeróbico, para la reducción de materia orgánica soluble (DBO); la eliminación de nutrientes biológicos para la reducción de nitrógeno y fósforo; la cloración de efluente cuando se requiere la desinfección; la deshidratación y eliminación de residuos; en algunos casos, puede ser posible el compostaje o la aplicación al terreno de los residuos derivados del tratamiento de aguas residuales de calidad aceptable. Se pueden requerir controles técnicos adicionales para contener y neutralizar los olores molestos (CONAGUA, 2010).

Las prácticas recomendadas de manejo de aguas residuales incluyen las siguientes estrategias preventivas:

- Separar las corrientes de agua residual no contaminadas de las corrientes contaminadas.
- Reducir la carga orgánica de aguas residuales impidiendo la entrada de residuos sólidos y líquidos concentrados en la corriente de agua residual: o

implementar la limpieza previa en seco de la materia prima, máquinas y zonas de fabricación antes de la limpieza en húmedo.

- Dejar que la remolacha se seque en el campo, si es posible, y reducir la ruptura durante la recolección y transporte mediante el uso de esteras de caucho y recipientes forrados.
- Usar técnicas secas para descargar la remolacha o instalar y utilizar sumideros y canales colectores con rejillas y filtros para reducir la cantidad de sólidos (por ejemplo, partes de la remolacha) que entran en las aguas residuales o impedir la escorrentía directa a los cursos de agua, especialmente a partir de los desbordamientos de depósitos (IFC, 2007).

1.3 Digestión anaerobia

El proceso de digestión anaerobia consiste en la transformación de la materia orgánica a través de una serie de reacciones bioquímicas, en un biogás con un alto contenido de metano, y un efluente sólido con excelentes características para ser utilizado como fertilizante para el suelo. La digestión anaerobia se basa en un consorcio de poblaciones de microorganismos, los cuales son capaces de utilizar un diverso espectro de sustratos en la ausencia de oxígeno para la síntesis de productos finales. Esta degradación anaerobia de materia orgánica puede ser llevada a cabo en un amplio rango de temperaturas incluyendo condiciones termofílicas, mesofílicas y psicofílicas (Parra-Huertas, 2010).

El metano producido por los sistemas anaerobios, puede ser recuperado y aprovechado para la generación de energía, reduciendo el consumo de combustibles fósiles e impactando de manera positiva sobre la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Almeida *et al.*, 2011).

El proceso de digestión anaerobia se lleva a cabo en cuatro etapas, hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

1. Hidrólisis: En este primer paso el sustrato sufre una reacción de hidrólisis que reduce los polímeros orgánicos complejos a moléculas solubles simples con la ayuda de enzimas extracelulares. Durante esta reacción, la proteína, los lípidos y los polímeros de carbohidratos se hidrolizan a aminoácidos, ácidos grasos de cadena larga y azúcares, respectivamente.
2. Acidogénesis: Los compuestos reducidos se convierten luego en una mezcla de Ácidos Grasos Volátiles de cadena corta (AGV) y otros productos menores como el dióxido de carbono, hidrógeno y ácido acético con la ayuda de bacterias fermentativas.
3. Acetogénesis: Las bacterias acetogénicas convierten además los ácidos orgánicos en acetato, dióxido de carbono y/o hidrógeno, que se utilizan como sustratos directos para la producción de metano.
4. Metanogénesis: El último paso de la digestión anaerobia, donde una variedad de bacterias metanogénicas consumen acetato, dióxido de carbono e hidrógeno para producir metano. (Jain *et al.*, 2015)

La Figura 1.3 muestra la interacción de los microorganismos de cada etapa para llevar a cabo el proceso.

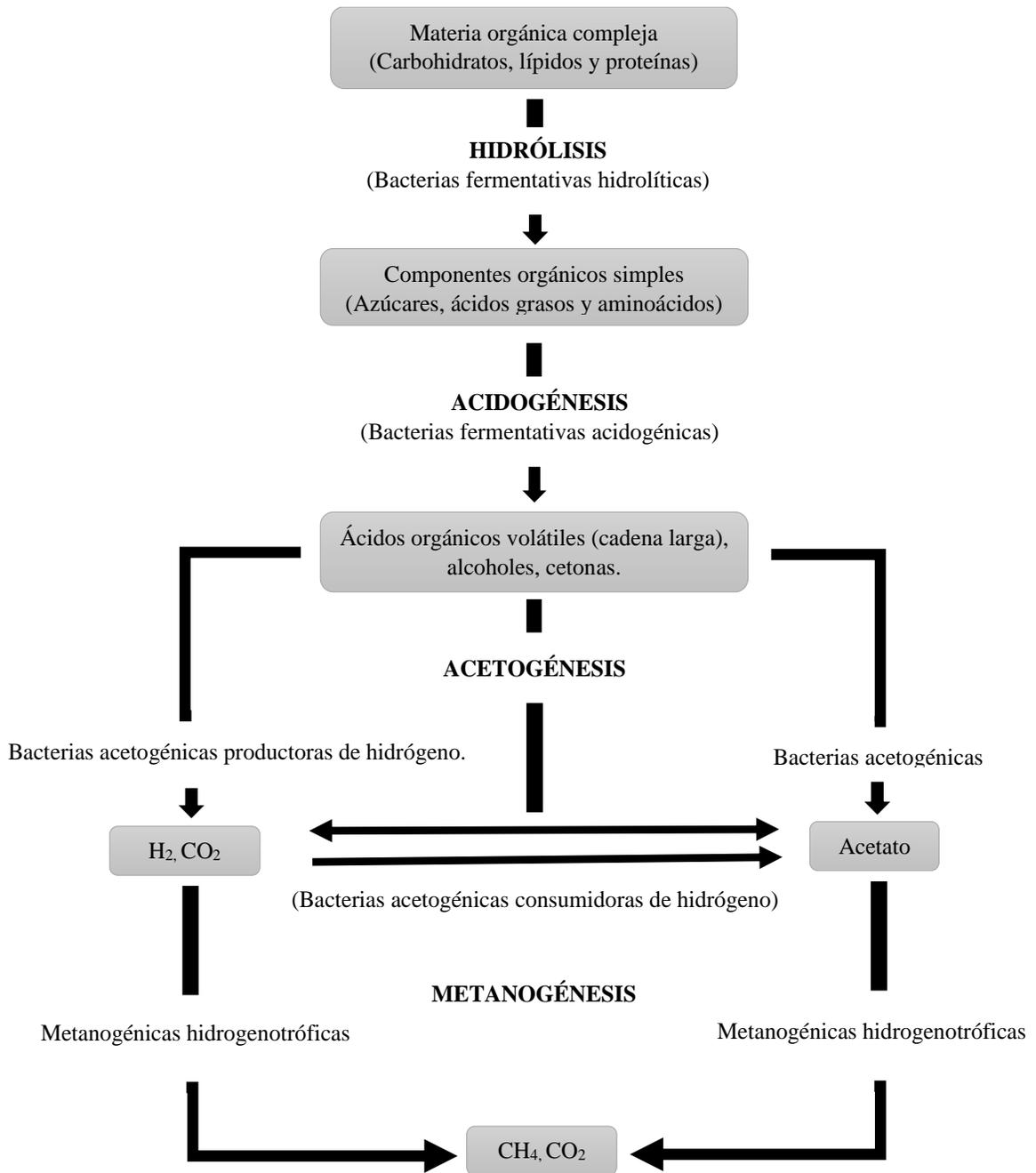


Figura 1.3 Esquema de la digestión anaerobia de materia orgánica compleja (Parra-Huertas, 2015).

1.3.1 Hidrólisis

La hidrólisis es la descomposición biológica de polímeros orgánicos en moléculas más pequeñas (monómeros y dímeros) que son capaces de atravesar la membrana celular de las bacterias, este proceso se lleva a cabo por medio de enzimas denominadas hidrolasas, que son capaces de solubilizar la materia orgánica y romper enlaces específicos con ayuda de agua para poder ser utilizadas. La degradación anaerobia principalmente se da en polímeros como celulosa y hemicelulosa, con la participación de enzimas celulasas (Corrales *et al.*, 2015).

Existen tres métodos descritos, mediante los cuales los microorganismos realizan la hidrolización de moléculas complejas. Los microorganismos secretan las enzimas al medio líquido, y estas se adsorben en las partículas para liberar un sustrato libre.

- Los microorganismos se adhieren a las moléculas, y secretan enzimas en los alrededores de la misma, para obtener sustratos liberados.
- Los microorganismos poseen enzimas adjuntas que poseen la doble capacidad de actuar como transportadores-receptores hacia el interior de las células.
- La velocidad de hidrólisis está determinada por el tamaño de partícula o por el número de sitios de adsorción existentes en la superficie de la molécula.

Cuando la hidrólisis se realiza en un digestor, las partículas de sustratos son rápidamente colonizadas por los microorganismos y estos secretan enzimas extracelulares (Albuja *et al.*, 2011).

Para la realización de este proyecto solamente se trabajará con la etapa de hidrólisis, para que el efluente tratado pase a un segundo tratamiento como son los humedales.

1.4 Reactores anaerobios de biopelícula

El tratamiento anaerobio tiene varias ventajas en comparación con el tratamiento aerobio, como bajos costos de capital y operación, menor necesidad de energía, menor producción de lodo, diseño y operación más simples y la conversión de materia orgánica a biogás y bioenergía (Arvin *et al.*, 2019). El uso de una fracción de partículas colonizadas tiene algunas ventajas, principalmente porque la estabilidad del sistema se logra en menos tiempo, independientemente del modo de operación (Alvarado-Lassman *et al.*, 2010).

Los procesos bioquímicos en biorreactores anaerobios se realizan mediante cultivos mixtos de bacterias acidogénicas y metanogénicas, pueden clasificarse como reactores de gránulos y biopelículas según la distribución de los microorganismos. En los reactores de biopelículas anaerobios, los microorganismos se inmovilizan en materiales de soporte y la eficiencia de eliminación de materia orgánica está relacionada con la naturaleza y las propiedades de los materiales. Los reactores anaerobios de biopelículas son atractivos por sus altas capacidades de carga, biomasa concentrada, resistencia a sobrecargas hidráulicas u orgánicas, y no requieren de mezcla mecánica. En comparación con los sistemas de tratamiento anaerobio convencionales, los reactores de biopelículas podrían reducir significativamente el tiempo de inicio y aumentar las tasas de carga orgánica hasta cinco veces. Las biopelículas son comunidades microbianas unidas a materiales de apoyo y tienen capacidad para la eliminación efectiva de compuestos orgánicos y metano (Karadag *et al.*, 2015).

- **Reactor hidrolítico**

El reactor está construido en fibra de vidrio, color negro, con una capacidad de volumen total de 1200 L, diámetro interno de 1.1 m, altura de 0.95 m y un volumen útil de 1000

L, con una chaqueta exterior de calentamiento de 280 L y diámetro de 1.26 m, dispone de 2 bombas centrífugas de 0.5 HP.

Cuenta con un área de soporte de fibras de nylon-poliéster fijadas a una canaleta de aluminio en forma de “U” en un arreglo de 12 rieles y con un diseño de 6 paneles de policarbonato que contienen 12 fibras de nylon-poliéster de tamaño de 15x24 cm por cada panel (Apanco Rosas, 2018)



Figura 1.4 Reactor hidrolítico

1.5 Humedales

Los humedales son ecosistemas definidos como extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de agua, sean estas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no excede de 6 m. Las plantas, uno de los componentes de los humedales, intervienen en numerosos procesos, beneficiando el desarrollo y equilibrio de la vida. Las plantas de los humedales poseen adaptaciones morfológicas, fisiológicas y reproductivas que les permiten tolerar el exceso de humedad. Su diversidad está representada por un

continuo, desde especies capaces de tolerar suelos inundados, hasta especies que pueden desarrollarse tanto en tierra como en agua, hasta plantas adaptadas a vivir completamente sumergidas (Heynes-Silerio *et al.*, 2017).

Los humedales constituyen un eslabón básico e insustituible del ciclo del agua. Su conservación y manejo sostenible pueden garantizar la riqueza biológica y los servicios ambientales que realizan, como el almacenamiento de agua, la conservación de los acuíferos, la purificación del agua mediante la retención de nutrientes, sedimentos y contaminantes, la protección contra tormentas y la mitigación de inundaciones, la estabilización de las costas. y control de la erosión (CONAGUA, 2010).

1.6 Tratamiento de aguas residuales en humedales

La tecnología de humedales actúa como un ecosistema complejo en el que participan los siguientes elementos:

- El agua a tratar, que circula a través del sustrato filtrante y/o de la vegetación.
- El sustrato, que tiene las finalidades de servir de soporte a la vegetación y de permitir la fijación de la población microbiana (en forma de biopelícula), que va a participar en la mayoría de los procesos de depuración.
- Las plantas emergentes acuáticas, que proporcionan superficie para la formación de las películas bacterianas, facilitan la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, contribuyen a la oxigenación del sustrato y a la eliminación de nutrientes y controlan el crecimiento de algas, al limitar la penetración de la luz solar. Además, la vegetación contribuye notablemente a la integración de estos dispositivos de tratamiento (Zhang *et al.*, 2014).

1.7 Humedales construidos

Un humedal construido es un sistema que ha sido diseñado para tomar ventaja de muchos de los procesos que ocurren en humedales de manera natural utilizado en el tratamiento de aguas residuales. Estos procesos naturales requieren de la interacción entre la vegetación, el suelo y la comunidad microbiana presente en los humedales (Vymazal, 2013).

La gran diferencia entre un humedal construido y un humedal natural es que los primeros pueden tratar de forma más eficiente el agua residual, al manejar de forma consistente la carga hidráulica. Los humedales construidos han resultado ser sistemas efectivos en el tratamiento de distintos tipos de aguas residuales incluyendo las procedentes de industrias, la agricultura, residuos mineros, filtraciones de vertederos y las aguas pluviales urbanas (Araneda-Gallardo, 2016). Los humedales construidos se dividen en dos tipos de sistemas que son; humedales de flujo superficial y humedales de flujo subsuperficial.

1.7.1 Humedales construidos de flujo superficial

Los humedales de flujo superficial son similares a los humedales naturales, con un flujo superficial de aguas residuales sobre un sustrato de suelo saturado (Wu *et al.*, 2015). Son cuencas poco profundas con agua en la superficie, los procesos de tratamiento se producen a través de complejas interacciones entre la vegetación y las biopelículas asociadas en la fase acuosa. La capa de agua cerca de la superficie es aerobia, mientras que las aguas más profundas y el sustrato suelen ser anaerobios. Los humedales de flujo superficial suelen tener profundidades de agua inferiores a 0.4 m. En general, en los humedales construidos de flujo superficial, se pueden lograr eficiencias de remoción por encima del 70 % para Sólidos Suspendidos Totales (SST), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) (Zhang *et al.*, 2014).

1.7.2 Humedales contruidos de flujo subsuperficial

Los humedales de flujo subsuperficial emplean principalmente grava como los principales medios para apoyar el crecimiento de las plantas; las aguas residuales fluyen vertical u horizontalmente a través del sustrato, donde entran en contacto con microorganismos, que viven en las superficies de las raíces de las plantas y el sustrato (Saeed y Sun, 2012). Los humedales contruidos con flujo subsuperficial son un enfoque prometedor para reducir aún más la liberación de Nitrógeno de las descargas de efluentes municipales en las vías fluviales (Chen *et al.*, 2014).

Los humedales contruidos con flujo subsuperficial se dividen en dos grupos; Sistemas de Flujo Vertical (SFV) y Sistemas de Flujo Horizontal (SFH), ambos son típicamente más efectivos que los sistemas de superficie, en términos de eliminación de contaminantes en masa por m² de área de superficie del sistema (Saeed y Sun, 2012).

1.7.2.1 Sistemas de Flujo Vertical

Estos humedales son cargados con aguas residuales que se vierten o dosifican a la superficie del humedal desde arriba usando un sistema mecánico de dosificación. Las aguas se recogen en una red de drenaje situada en el fondo del humedal. Estos humedales de flujo vertical reciben cargas intermitentes desde la superficie. La aplicación intermitente del agua residual y el drenaje vertical en el lecho permiten que las reacciones aeróbicas se produzcan con rapidez. Este tipo de sistema desarrollado en Europa como alternativa a los humedales horizontales para producir efluentes nitrificados. La circulación del agua es de tipo vertical y tiene lugar a pulsos, de manera que el medio granular no está permanentemente inundado (Díaz-Acero, 2014).

La profundidad del medio granular es de entre 0.5 m y 0.8 m. Operan con cargas de alrededor de 20 g DBO/m²d. Los sistemas verticales tienen una mayor capacidad de tratamiento que los horizontales (requieren de menor superficie para tratar una

determinada carga orgánica) (García-Serrano y Corzo-Hernández, 2008). La Figura 1.4 muestra el Sistema de Flujo Vertical.

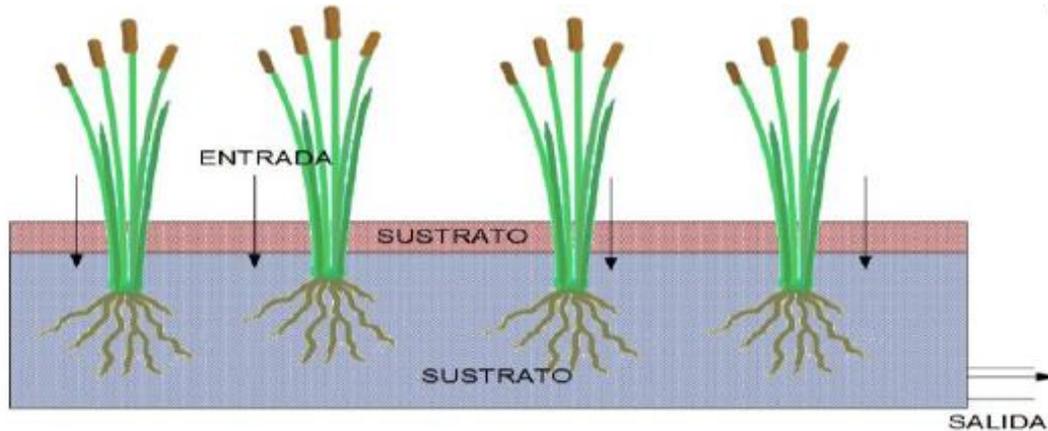


Figura 1.4 Esquema del Sistema de Flujo Vertical (Hernández, 2016).

1.7.2.2 Sistemas de Flujo Horizontal

Consisten en lechos de grava o tierra con vegetación de humedales. Normalmente están diseñados para tratar el efluente primario antes de la dispersión del suelo o la descarga de agua superficial. Las aguas residuales están destinadas a permanecer debajo de la superficie de los medios y fluyen dentro y alrededor de las raíces y rizomas de las plantas. Debido a que el agua no está expuesta durante el proceso de tratamiento, se minimiza el riesgo asociado con la exposición humana o de la fauna silvestre a organismos patógenos. Comúnmente se usan para el tratamiento secundario de hogares unifamiliares o sistemas de grupos pequeños o para pequeñas comunidades. La profundidad del agua es de entre 0.3 m y 0.9 m y con cargas de alrededor de 6 g DBO/m²d (García-Serrano y Corzo-Hernández, 2008).

Los SFH están compuestos típicamente por tuberías de entrada, un revestimiento de arcilla o sintético, medios de filtro, vegetación emergente, bermas y tuberías de salida con control de nivel de agua. En la Figura 1.5 se muestra el esquema de un Sistema de Flujo Horizontal convencional para climas cálidos (Kadlec y Wallace, 2009).

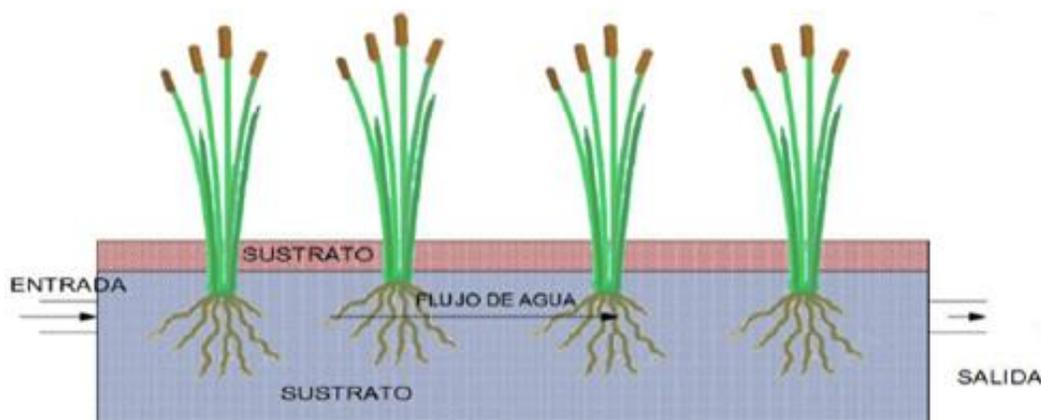


Figura 1.5 Esquema de Sistema de Flujo Horizontal (Hernández, 2016).

1.8 Vegetación en humedales

Las plantas son un componente esencial en el diseño y operación de un humedal construido. Entre la diversidad de funciones que proveen, se cuentan:

- a. Promover el asentamiento y la retención de sólidos en suspensión.
- b. Proporcionar superficie para el desarrollo de biopelículas microbianas.
- c. Transportar oxígeno a su zona radicular.

Adicionalmente, generan una vinculación con la vida silvestre al proveer hábitats, y mejoran estéticamente los lugares donde se implantan (Morales *et al.*, 2013).

Las plantas de humedal juegan un papel importante en la química del agua, al remover los nutrientes e incorporarlos en sus tejidos, sirven como soporte para microorganismos, airean el sustrato, permitiendo tener gradientes de óxido-reducción desde anaerobiosis hasta aerobiosis. Los gradientes de óxido-reducción en los humedales son sumamente importantes para los procesos biogeoquímicos que ocurren en ellos y que mayoritariamente son responsables de la eliminación de contaminantes en los humedales construidos. Entre estos procesos están la

metanogénesis, la respiración aerobia y la desnitrificación, a través de los cuales se remueve carbono y nitrógeno (Hernández, 2016).

A continuación se describen algunas plantas de ornato y de uso común utilizadas en humedales.

1.8.1 *Spathiphyllum*

El género *Spathiphyllum* comprende 50 especies, 47 de las cuales están restringidas al Neotrópico. Se distribuyen desde el Sur de México y en toda América Central, al Sur de Perú y Brasil. Para México se reportan siete especies, de las cuales cuatro se encuentran en el estado de Veracruz. Estas plantas crecen por lo general en lugares húmedos y sombríos, que pueden ser inundados ocasionalmente, a menudo formando poblaciones a lo largo de los márgenes de ríos, arroyos y pantanos (Díaz-Jiménez, 2016).



Figura 1.6 *Spathiphyllum* (Díaz-Jiménez, 2016).

1.8.2 *Canna hybrids*

Son plantas de rizoma corto y robusto que pueden alcanzar los 3 m de altura. Se distribuyen a lo largo de regiones subtropicales, desde Estados Unidos hasta Argentina. Se han cultivado para la decoración ya que poseen flores de color rojo oscuro a amarillo (Morales *et al.*, 2013).



Figura 1.7 *Canna hybrid* (Morales *et al.*, 2013).

1.8.3 *Typha spp.*

Son plantas perennes rizomatosas erectas con tallos sin articulación. Las plantas alcanzan hasta 3 m de altura con un extenso sistema de rizomas horizontales de ramificación. Las hojas son planas o ligeramente redondeadas en la parte posterior, en sus partes basales esponjosas. Las especies de totora se encuentran comúnmente en bahías poco profundas, zanjas de riego, lagos, lagunas, ríos y marismas tanto de agua salobre como dulce (Vymazal, 2011).



Figura 1.8 *Typha spp.* (Vyzamal, 2011).

1.9 Antecedentes

Sandoval *et al.*, (2019). Evaluaron, durante nueve meses, el efecto de tres plantas ornamentales terrestres y dos sustratos sobre la eliminación de contaminantes en las aguas residuales mediante el uso de Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial de llenado y drenaje. Utilizaron dieciséis microcosmos, nueve rellenos con tereftalato de polietileno (PET) y nueve con piedra de río porosa. Para cada tipo de sustrato,

utilizaron duplicados de microcosmos, utilizando *Anthurium sp.*, *Zantedeschia aethiopica* y *Spathiphyllum wallisii* como vegetación. Registraron las condiciones ambientales, número de flores y altura de las plantas. La eliminación promedio de contaminantes en sistemas con vegetación demostró un efecto positivo en la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno (55-70 %), nitratos (28-44 %), fosfatos (25-45 %) y coliformes fecales (52-65 %). Mientras tanto, en unidades sin vegetación, la reducción de contaminantes fue casi un 40-50 % menor que en aquellas con vegetación.

Orduña-Gaytan *et al.*, (2018). Diseñaron la construcción y operación de un Humedal Artificial utilizando la especie *Hippeastrum* y *Spathiphyllum* evaluando eficiencias de remoción de materia orgánica, eliminación de patógenos y nutrientes. Se llevó a cabo en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Orizaba. El período de adaptación de ambas especies se llevó a cabo alimentando el sistema solo con agua natural durante 30 días, posteriormente utilizando el efluente del reactor hidrolítico alimentado con residuos sólidos del Mercado Zapata, fue necesaria una dilución debido a la alta concentración promedio de 20 g DQO/L d y pH de 6.5 - 7. Alimentó a concentraciones de 1 a 8 g DQO/L d en períodos de tiempo de residencia hidráulica de 3 días, dos veces por concentración, con una carga volumétrica aplicada de 2.6181 g DQO/L d, se obtuvieron remociones del 95 % para DQO y 90 % para SST y SSV.

Marín-Muñiz, (2016). Evaluó la remoción de contaminantes de aguas residuales mediante microcosmos de humedales artificiales sembrados con *Typha spp.* en Pastorías, Actopan, Veracruz, México. Implanto doce microcosmos; seis con tepezil y seis con piedra porosa de río como sustrato, de las cuales; tres microcosmos tuvieron ST y vegetación, y como control, tres microcosmos sin planta, tres microcosmos con piedra porosa de río con planta y tres sin planta. El estudio se realizó durante los periodos de sequía y lluvias en la zona. No se observó un efecto significativo en la remoción de contaminantes con respecto a los periodos de sequía y lluvia ni con respecto al tipo de sustrato. Las remociones promedio de NNO_3 , P-PO_4 y DBO fueron

60.3 %, 55.4 % y 80.1 %, respectivamente, en humedales con *Typha spp*, mientras que en humedales sin vegetación las remociones fueron de 19.6 %, 18.8% y 63.6 % para N-NO₃, P-PO₄ y DBO⁵, respectivamente. Los resultados obtenidos revelaron que el uso de piedra porosa de río y tepezil son sustratos idóneos para humedales artificiales y la utilidad de *Typha spp*. en la remoción de contaminantes de aguas residuales sin importar si es período de sequía o lluvia.

Montoya *et al.*, (2013). Investigaron la remoción de materia orgánica con agua residual sintética durante tres meses, en seis sistemas de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal, a escala piloto, sembrados con tres diferentes macrófitas: *Canna limbata*, *Heliconia psittacorum* y *Phragmites sp*; obteniendo remociones en DQO de 97.31 % y 95.94 % para *Canna limbata*; 94.49 % y 93.50 % para *Heliconia psittacorum*; 97.39 % y 97.13 % para *Phragmites sp*. En DBO fueron de 100 % y 99.36 % para *Canna limbata*; 99.09 % y 97.49 % para *Heliconia psittacorum*; 100 % y 99.45 % para *Phragmites sp*.

Romero-Aguilar *et al.*, (2009). Evaluaron el porcentaje de remoción de la carga orgánica de aguas residuales, en un sistema de tratamiento por humedales artificiales de flujo horizontal y con dos especies vegetales. *Phragmites australis* y *Typha dominguensis*. Los módulos experimentales fueron instalados a la salida de un tratamiento primario, el cual contiene aguas residuales municipales provenientes de un edificio de investigación. En el agua se analizó Demanda Química de Oxígeno (DQO), los iones de nitrógeno (N-NO₃, N-NO₂ y N-NH₄) y el fósforo total. También realizaron el conteo de bacterias asociadas al sistema. Los resultados demostraron que el sistema es una opción para la remoción de la carga orgánica y de nutrimentos, de bajo costo de operación y mantenimiento.

CAPÍTULO 2
MATERIALES Y MÉTODOS

CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

En la Figura 2.1 se muestra la metodología a seguir para la realización del proyecto.

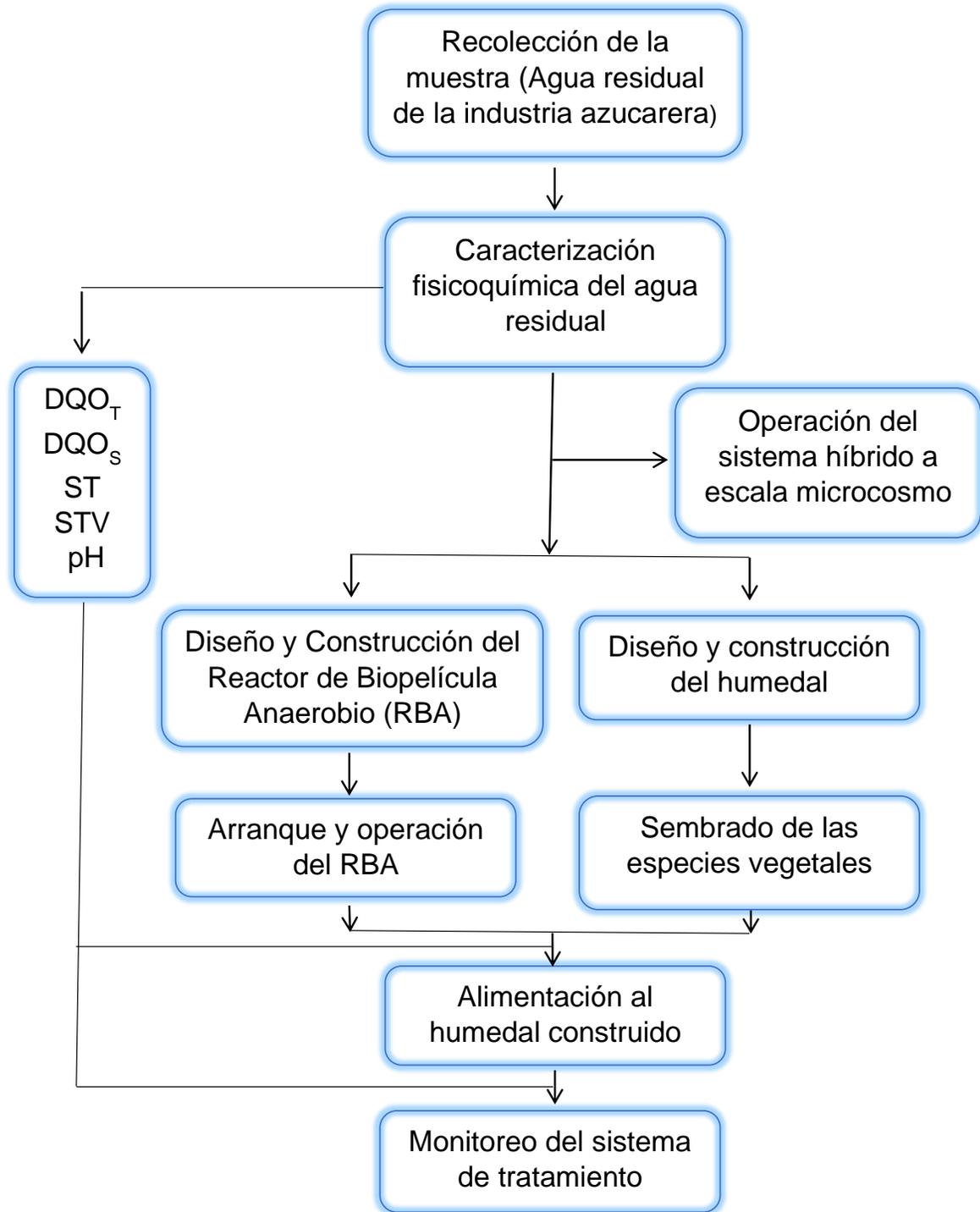


Figura 2.1 Metodología del proyecto.

2.1 Recolección de la muestra

El agua residual fue recolectada en tres ingenios azucareros de la región Orizaba-Córdoba y se almacenó en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental 1 del Instituto Tecnológico de Orizaba. De las muestras recolectadas se analizaron y se eligió una sola muestra con mayor concentración para iniciar el tratamiento en el sistema debido a los dos tratamientos a realizar para lograr mejores remociones.

2.2 Caracterización fisicoquímica de agua residual

Se realizó una caracterización fisicoquímica al agua residual de la industria. Se determinaron diferentes parámetros (Tabla 2.1) antes del tratamiento de hidrólisis realizado en el Reactor de Biopelícula Anaerobio, a la salida de este, antes de entrar al Humedal Construido y como efluente final para determinar la remoción final de contaminantes.

2.2.1 Determinación de pH

Este parámetro se obtuvo mediante el Método potenciométrico 4500-H⁺B de Standard Methods. El principio básico de la medición electrométrica del pH es la determinación de la actividad de los iones hidrógeno por medición potenciométrica usando un electrodo de hidrógeno estándar y un electrodo de referencia.

2.2.2 Determinación de Demanda Química de Oxígeno (DQO)

El parámetro de DQO se realizó siguiendo el Método Colorimétrico 5220 D Standard Methods, este método consiste en medir la cantidad de oxígeno consumida en la oxidación química total de constituyentes orgánicos a productos inorgánicos finales. Para esta determinación se utiliza la muestra en forma total (DQO_T) y soluble (DQO_S), en la primera la muestra se utiliza pura y en la segunda se filtra o centrifuga para separar los sólidos presentes. Con los resultados obtenidos en esta prueba se realizó el cálculo del porcentaje de remoción utilizando la ecuación 2.1

$$\% \text{ Remoción DQO} = \frac{DQO_{\text{Entrada}} - DQO_{\text{Salida}}}{DQO_{\text{Entrada}}} * 100 \quad (2.1)$$

Tabla 2.1 Parámetros fisicoquímicos y métodos de prueba.

Análisis	Unidades	Método de prueba
DQO_T y DQO_s	g/L	Método colorimétrico 5220 D Standard Methods
ST y STV	g/L	NMX-AA-034-SCFI-2001
pH	---	Método potenciométrico 4500- H ⁺ B de Standard Methods
Grasas y aceites	g/L	NMX-AA-005-SCFI-2013
Carbohidratos	mg/L	Método de Antrona-Ácido Sulfúrico
Nitrógeno Total	g/L	NMX-AA-026-SCFI-2010
Fósforo	mg/L	Método colorimétrico (Técnica de Fiske-Subbarow)

2.2.3 Determinación de Sólidos Totales (ST) y Sólidos Totales Volátiles (STV)

Se realizó la determinación de ST y STV siguiendo el método de NMX-AA-034-SCFI-2001, el principio de este método se basa en la medición cuantitativa de los sólidos y sólidos disueltos, así como la cantidad de materia orgánica contenidos en aguas mediante la evaporación y calcinación de la muestra a temperaturas específicas, en donde los residuos son pesados y sirven de base para el cálculo del contenido de estos. Con los resultados obtenidos se utilizaron las ecuaciones 2.2 y 2.3 para calcular el porcentaje de remoción en ST y STV respectivamente.

$$\% \text{ Remoción ST} = \frac{ST_{\text{Entrada}} - ST_{\text{Salida}}}{ST_{\text{Entrada}}} * 100 \quad (2.2)$$

$$\% \text{ Remoción STV} = \frac{STV_{\text{Entrada}} - STV_{\text{Salida}}}{STV_{\text{Entrada}}} * 100 \quad (2.3)$$

2.2.4 Determinación de Grasas y Aceites

Este método se realizó conforme a la norma NMX-AA-005-SCFI-2013 la cual consiste en la estimación del contenido de grasas y aceites en aguas residuales, determina gravimétricamente las sustancias que son extraídas con hexano de una muestra acuosa acidificada, se utilizó la ecuación 2.4. para calcular el contenido de grasas y aceites presentes en la muestra.

$$G \text{ y } A \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{A-B}{V} \quad (2.4)$$

A: peso final del matraz (mg)

B: peso inicial del matraz (mg)

V: volumen de la muestra (L)

2.2.5 Determinación de Carbohidratos

Esta determinación se realizó siguiendo el método Antrona-Sulfúrico Finleyand *et al.* 1973 consiste en que el medio ácido hidroliza el enlace glucosídico de la sacarosa y los monosacáridos resultantes reaccionan con la antrona produciendo un color verde-azulado.

2.2.6 Determinación de Nitrógeno Total

Se determino por el método de NMX-AA-026-SCFI-2010, esta técnica se aplica para la determinación del contenido de nitrógeno en sustancias orgánicas e inorgánicas presentes en aguas residuales. Debido a que el nitrógeno es un nutriente esencial para organismos fotosintéticos, es importante el monitoreo y control de descargas del mismo al ambiente.

2.2.7 Determinación de Fósforo

Se utilizó el Método colorimétrico (Técnica de Fiske-Subbarow) para determinar fósforo presente en la muestra, consiste en un método de digestión capaz de oxidar la materia

orgánica efectivamente, para liberar el fósforo como ortofosfato, para su posterior determinación por el Método del Ácido Ascórbico. La concentración de fósforo total se registra como mg P/L.

2.3 Operación del sistema híbrido a escala microcosmos

Se construyó un sistema a nivel laboratorio utilizando un Reactor de Hidrólisis Anaerobio (RHA) para realizar la primera etapa del tratamiento y un Humedal Construido, este sistema se utilizó como prueba de adaptación a las plantas, debido a que era necesario iniciar con caudales y concentraciones pequeñas para poder llevar el sistema a una escala mayor. El sistema de humedales fue construido y diseñado por (Orduña-Gaytan *et al.*, 2018)

2.3.1 Carga Volumétrica Aplicada (Cva)

La Cva se controló a la entrada del sistema de cada tratamiento para controlar los cambios de concentración de materia orgánica, esta se calcula con los datos de volumen útil, volumen de alimentación y la concentración de la materia orgánica del parámetro de DQO como se muestra en la Ecuación 2.5

$$Cva = \frac{\text{Volumen de alimentación} \left(\frac{L}{d}\right) * DQO_T \left(\frac{g}{L}\right)}{\text{Volumen util (L)}} = \frac{gDQO_T}{L} * d \quad 2.5$$

2.3.2 Tiempo de Residencia Hidráulica (TRH)

El TRH es un parámetro que describe el tiempo promedio que el sustrato permanece en el interior del sistema, este parámetro es importante, debido a que, durante este tiempo se realiza la remoción de residuos orgánicos y absorción de nutrientes (nitrógeno y fósforo). Este se calcula mediante la ecuación 2.6.

$$TRH = \frac{\text{Volumen útil (L)}}{\text{Volumen de alimentación} \left(\frac{L}{d}\right)} = d \quad 2.6$$

2.3.3 Características del Reactor de Hidrólisis Anaerobio (RHA)

En la primera etapa del tratamiento se realizó una hidrólisis del sustrato para descomponer la materia orgánica y aprovechar los componentes en su segunda etapa. El RHA está construido de un material de acrílico y tapas de Nylamid, tiene un volumen total de 15.5 L y un volumen útil de 11.5 L.



Figura 2.2 Reactor de Hidrólisis Anaerobio (RHA).

2.3.4 Características del Humedal Construido escala Microcosmo (HCMi)

El HCMi está compuesto de 9 celdas de plástico, cada una con las siguientes características; 45 cm largo, 20 cm ancho y 20 cm de altura, con un volumen total de 30 L y un volumen útil de 11 L. Se adaptó una tubería para la salida del efluente en forma de "S", de esta manera se evita que la celda se quede completamente vacía. El diseño se muestra en la Figura 2.3.

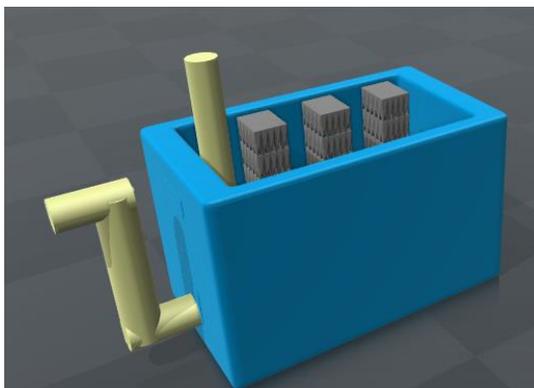


Figura 2.3 Diseño de la celda a escala microcosmos (Orduña Gaytán, 2017).

Con base a los resultados obtenidos por Orduña-Gaytán *et al*, 2017 es necesario iniciar con una carga de concentración baja, para alcanzar la estabilidad del proceso sin dañar las especies vegetales y así mantener el proceso controlado, para este sistema a escala laboratorio (microcosmos) se alimentó el sistema con la concentración 1 g DQO/L.

2.4 Diseño y construcción del Reactor de Biopelícula Anaerobio (RBA)

El RBA fue construido en fibra de vidrio con resina epóxica, está conformado en su interior de un material de soporte construido de un panel de aluminio con fibras de nylon polyester en donde se lleva a cabo la colonización de las bacterias para el tratamiento del efluente como se muestra en la Figura 2.4. El reactor tiene una altura de 50 cm, tiene un volumen total de 70 L y un volumen útil de 50 L. La Tabla 2.2 muestra las características físicas del RBA.

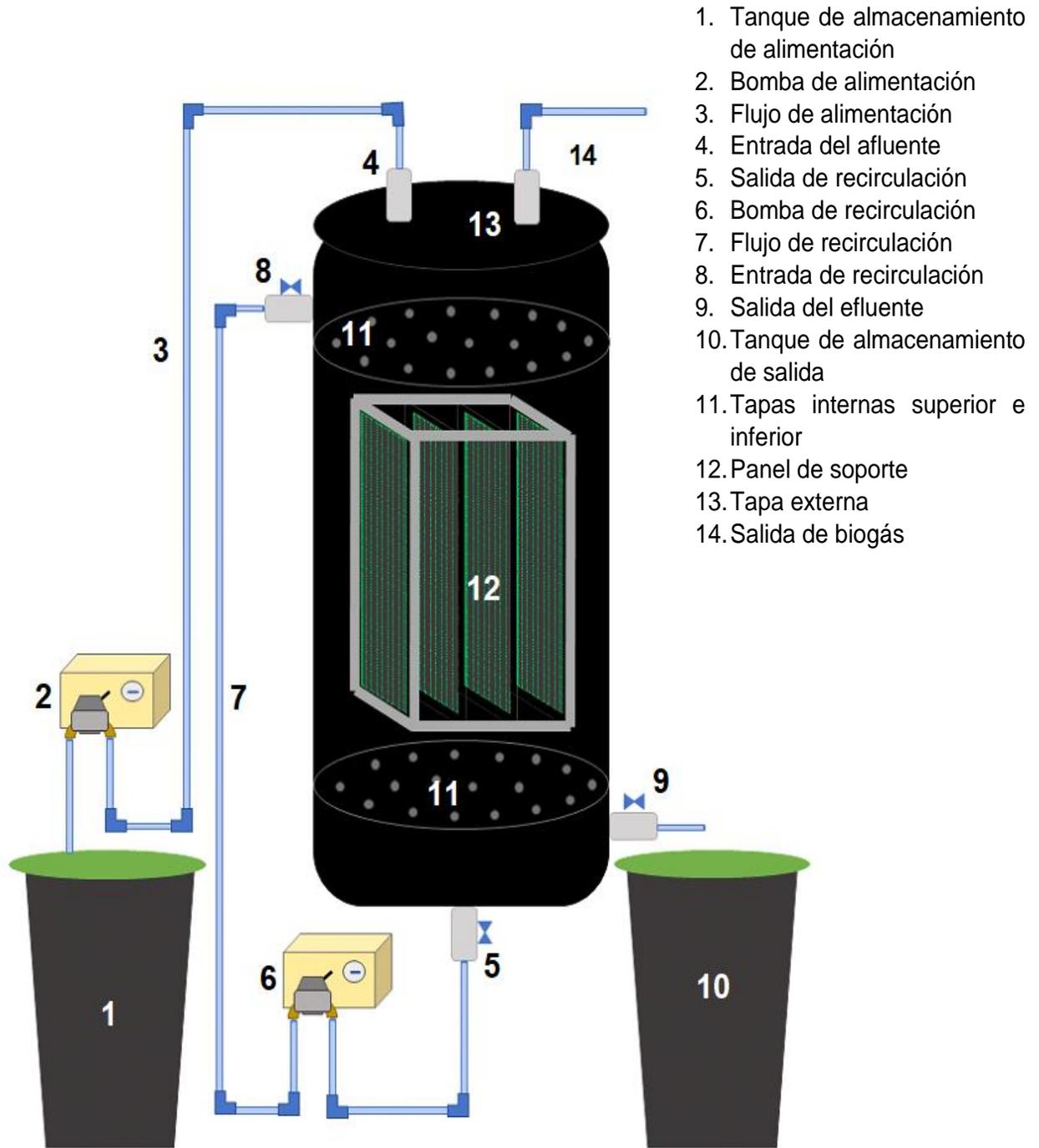


Figura 2.4 Diseño del Reactor de Biopelícula Anaerobio (RBA).

Tabla 2.2 Características físicas del RBA.

Características del RBA	
Altura (cm)	74.3
Diámetro interno (cm)	115.7
Diámetro externo (cm)	116.2
Volumen total (L)	70
Volumen útil (L)	20

2.5 Arranque y operación del RBA

El RBA inició su operación con la colonización de bacterias para después lograr una adaptación al agua residual utilizada como sustrato, se realizó una mezcla utilizando el 30 % del volumen de alimentación, de residuos de frutas y verduras como inóculo el 10 % de agua residual del ingenio y el resto de agua natural manteniendo en recirculación durante 15 días. Después de lograr la colonización se inició con la alimentación de agua residual a una concentración de 13 g DQO/L.

2.6 Diseño y construcción del Humedal Construido de Flujo Subsuperficial Vertical escala mesocosmos (HCMe)

Para el diseño del Humedal Construido se realizó a escala mesocosmos el cual está conformado de 3 celdas instaladas en el área anexa de la planta de Aprovechamiento de Residuos Sólidos Orgánicos Municipales (RSOM) del Instituto Tecnológico de Orizaba presentando clima templado-húmedo en condiciones de vivero bajo sombra. Las celdas del humedal fueron construidas de un material de acrílico con dimensiones mostradas en la Tabla 2.3.

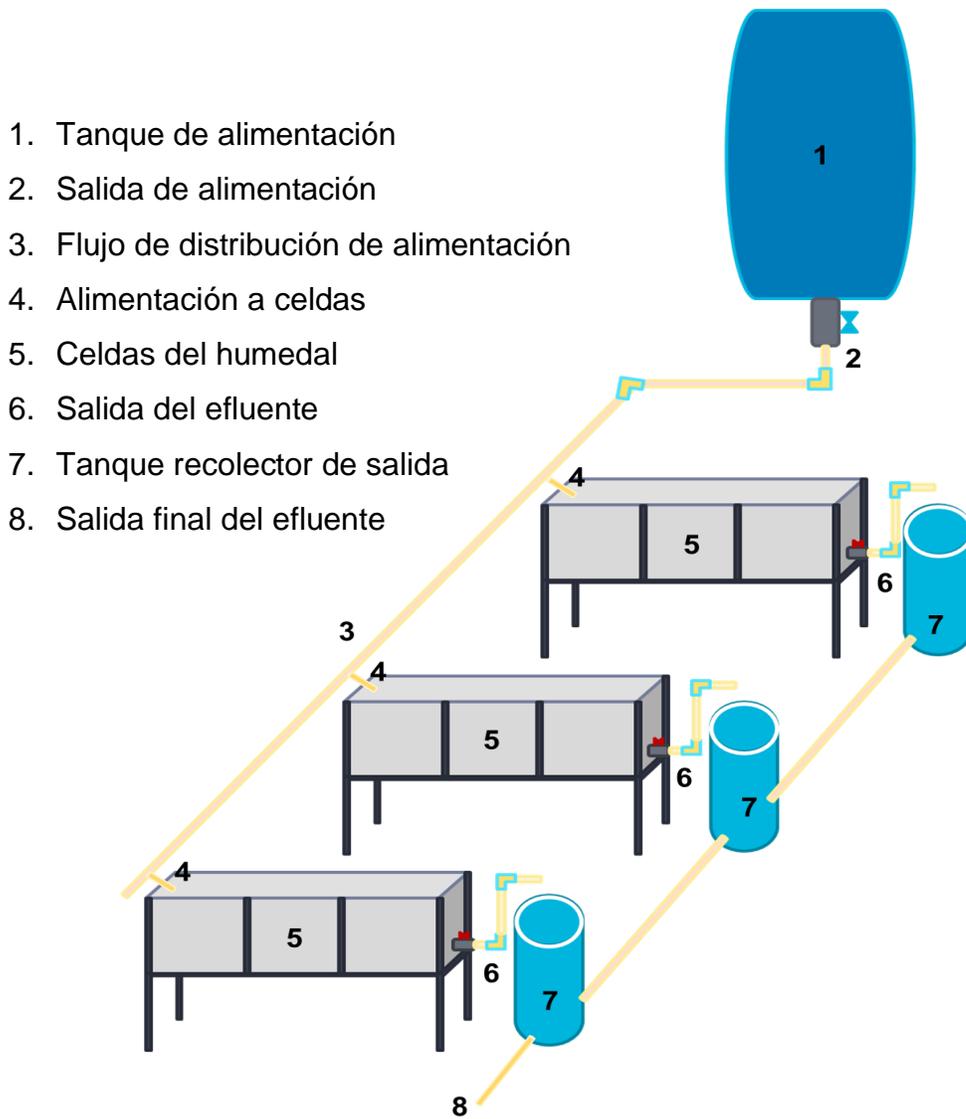


Figura 2.5 Diseño del Humedal Construido a escala Mesocosmos (HCMe).

Las celdas se empotrarán en bases metálicas de material PTR como se muestra en la Figura 2.5 para evitar su contacto con la tierra y así impedir su llenado por corrientes pluviales que se generen por el desnivel del suelo y controlar el sistema de la acción de plagas entomológicas y otros artrópodos.

Tabla 2.3 Características de las celdas de HCMe.

Características	
Largo (m)	1.20
Ancho (m)	0.45
Altura (m)	0.60
Volumen Total (m)	324
Volumen Útil (L)	100

2.7 Sembrado de las especies vegetales

Para el sistema a escala microcosmos se utilizaron las especies *Canna hybrids*, *Spathiphyllum* y *Alpinia*, en cuanto al sistema mesocosmos se realizó un cambio en la especie *Alpinia* por *Typha spp.* este cambio se hizo debido a que esta última especie es utilizada comúnmente en humedales y fue seleccionada para estudiar el comportamiento utilizando el agua residual del ingenio en este proyecto.

Las especies seleccionadas para el HCMe fueron sembradas en 3 celdas del humedal como se muestra en la Figura 2.6 ubicando un tipo de ejemplar por cada celda, para el HCMi se utilizarán 9 celdas y las especies serán sembradas utilizando tres celdas para cada especie. Para ambos sistemas la adaptación se realizará durante 30 días alimentando con agua natural.

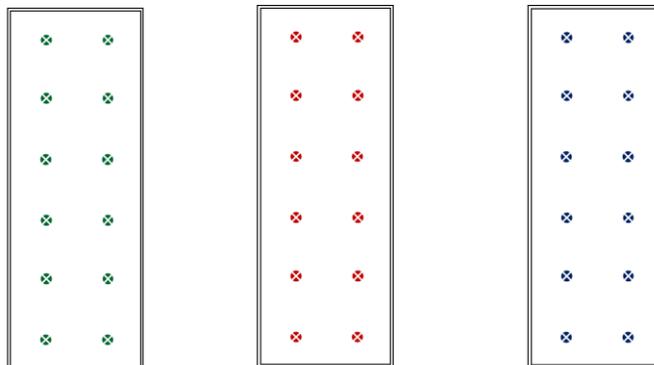


Figura 2.6 Configuración de sembrado para celdas del HCMe.

Para el análisis estadístico sobre el desarrollo vegetal y su relación con la remoción de contaminantes orgánicos se realizó la medición biométrica como se muestra a continuación en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Frecuencia de medición de parámetros generales para vegetación.

Parámetro	Frecuencia de medición (días)
Hojas (Número, ancho y largo)	15
Número de hojas y plantas muertas	15
Número de brotes	15
Diámetro de tallo	15

2.8 Alimentación al humedal construido

El HCMe utilizando el efluente de salida de RBA como alimentación al sistema con una concentración de 3 g DQO/L, fue necesario realizar una dilución al efluente del RBA antes de ingresar al humedal para la adaptación de las especies y evitar la muerte de estas por la alta carga orgánica.

2.9 Monitoreo del sistema de tratamiento

Para observar el comportamiento del sistema se realizaron pruebas de DQO_T , DQO_S , ST, STV y pH diarios. El tratamiento inicia en el RBA y al efluente de salida se le determinan las pruebas mencionadas para obtener los valores de remoción del primer sistema, así también para ajustar y preparar la alimentación del segunda tratamiento en el humedal, se realizaron las mismas determinaciones a la salida de cada una de las celdas del humedal y a la salida final para obtener los resultados finales y graficarlos.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPITULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Obtención del agua residual

El agua residual se colecto en galones de plástico de 20 L (Figura 3.1) y se almacenaron dentro del laboratorio de Investigación ambiental I del Instituto Tecnológico de Orizaba, se mantuvieron dentro de un refrigerador a una temperatura de 4°C.



Figura 3.1 Agua Residual.

3.2 Caracterización fisicoquímica

Para la caracterización del agua residual del ingenio se obtuvo un promedio de los distintos lugares muestreados, el cual fue el sustrato con el que se alimentó el RBA y el efluente de este se alimentó al HCMe. Los datos obtenidos de la caracterización inicial se encuentran en la Tabla 3.1.

Díaz-de los Ríos *et al.*, (2016) obtuvieron valores similares en concentración de DQO con 17.497 g los valores reportados constituyen valores promedios de diversas industrias durante varios años. En cuanto a concentración de fósforo reporta valores de 130 mg/L en comparación con Cisneros *et al.*, (2011) que reportaron 5.4 mg/L cercanos a los valores reportados en este trabajo.

3.2.1 Caracterización microbiológica

Para descartar la presencia de microorganismos patógenos se analizó el efluente de la salida del humedal siendo la salida final del sistema de tratamiento de acuerdo a las normas NOM-004 SEMARNAT 2002 y NMX-AA-042-SCFI-2015 respectivamente, obteniendo los siguientes resultados:

- Salmonella spp: <3 NMP/100 ml
- Coliformes fecales: <3 NMP/100 ml

3.3 Reactor de Hidrólisis Anaerobio (RHA) a escala microcosmo

El RAH (Figura 3.2) se operó con un TRH de 24 horas. Para evitar el lavado del inóculo debido al flujo de recirculación, se estableció una capacidad de operación del 70 % del volumen total. Para inocular el RHA se utilizó la fracción líquida de residuos de frutas y verduras concentrado, agregando una tercera parte del volumen útil del reactor, para colonizar el soporte, se operó en recirculación durante 20 días con 30 % de inóculo en base al volumen útil y el resto con agua, para con esto asegurar que las partículas sólidas se adhirieran a las fibras del panel permitiendo el crecimiento de los microorganismos.



Figura 3.2 Reactor de Hidrólisis Anaerobio.

Tabla 3.1 Caracterización fisicoquímica del agua residual.

Parámetro	Resultados	Unidades
DQO_T	19.092	g/L
DQO_S	11.2	g/L
STV	8.55	g/L
ST	9.01	g/L
pH	5.39	---
Grasas y aceites	0.041	g/L
Carbohidratos	81	mg/L
Fósforo	14.96	mg/L

3.3.1 Remoción del Reactor de Hidrólisis Anaerobio (RHA)

El reactor inicio su operación alimentando con residuo de frutas y verduras durante iniciando con una concentración de 15 g DQO/L, después se realizó un cambio el sustrato de alimentación por agua residual del ingenio a una Carga Volumétrica Aplicada (Cva) de 11.20 g DQO_T/L*d. El monitoreo se realizó durante 31 días. De acuerdo a la Figura 3.3 durante los 31 días de monitoreo el sistema comenzó con variaciones los primeros 5 días de operación esto se debe a que el Reactor se comenzó a adaptar a la concentración de alimentación, los primeros 10 días con el sustrato de frutas y verduras se alzaron remociones de 63 % en DQO_T y valores de 53 % en DQO_S. después de realizar el cambio de sustrato en la Figura 3.3 se aprecia que de los días 10-20 hubo una variación de remociones debido a la adaptación del nuevo sustrato, y a partir del día 21 se incrementó la remoción a valores de 64 % en DQO_T y 59 % en DQO_S obteniendo como efluente de salida una carga orgánica de 6 g DQO/L en valores de concentración.

En la Figura 3.4 se muestran las remociones de sólidos en los primero 10 días se obtuvieron remoción de 44 % ST y 46 % STV en cuanto al segundo sustrato se incrementaron los valores en el día 22 con 68 % ST y 59 % STV.

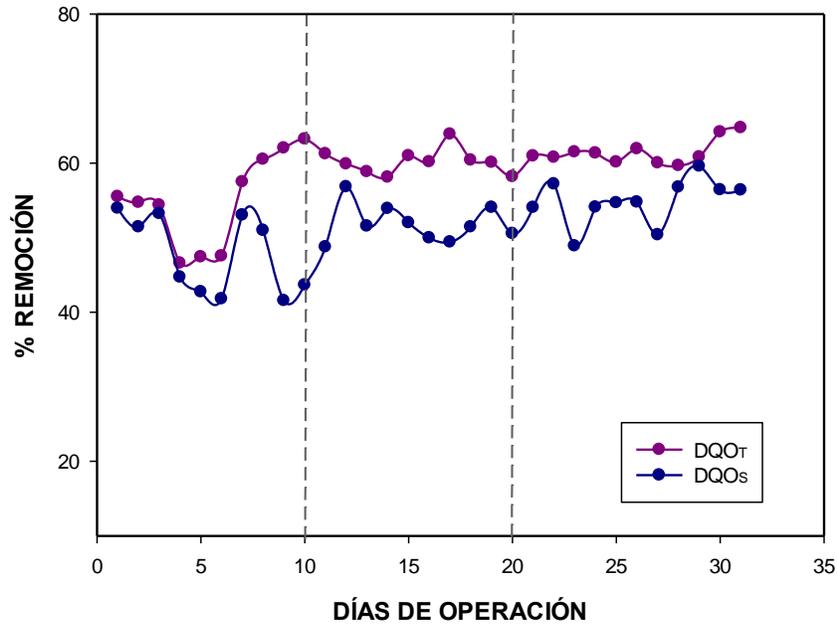


Figura 3.3 Porcentaje de remoción de DQOT y DQOS de RHA.

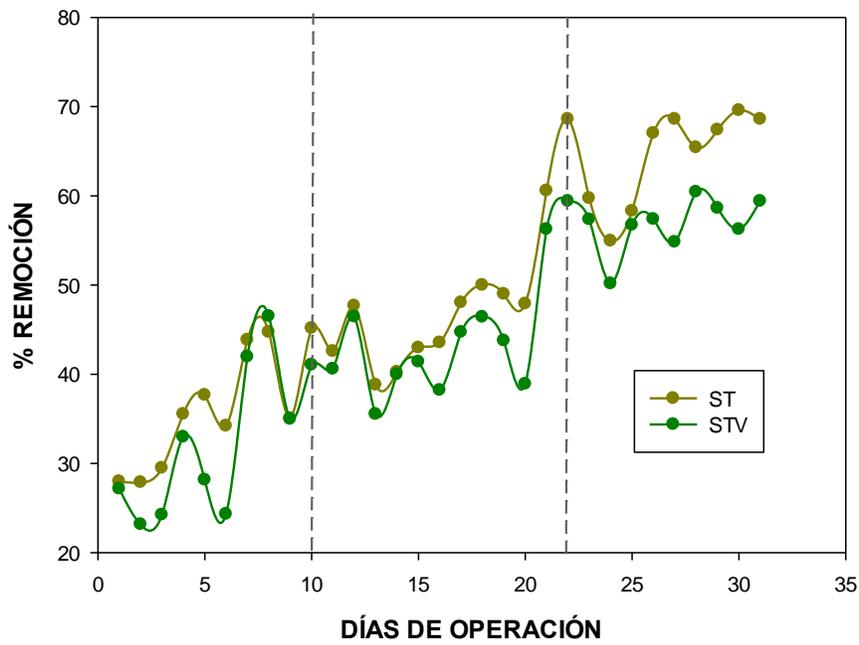


Figura 3.4 Porcentaje de remoción ST y STV del RHA.

3.4 Humedal Construido escala Microcosmos (HCMi)

Se utilizaron 9 celdas para el tratamiento, cada celda contenía un material de soporte (tezontle rojo) de superficie porosa y baja densidad. El sistema se muestra en la Figura 3.4. Se utilizaron tres celdas por especie vegetal y se utilizaron diferentes tipos de soporte. Se trabajo con un TRH de 3 días.



Figura 3.5 Sistema de humedales.

El sembrado de la vegetación se realizó a 5 cm de profundidad desde la superficie, y el número de ejemplares se estableció como se muestra en la Tabla 3.2, así como el tipo de soporte utilizado para cada celda.

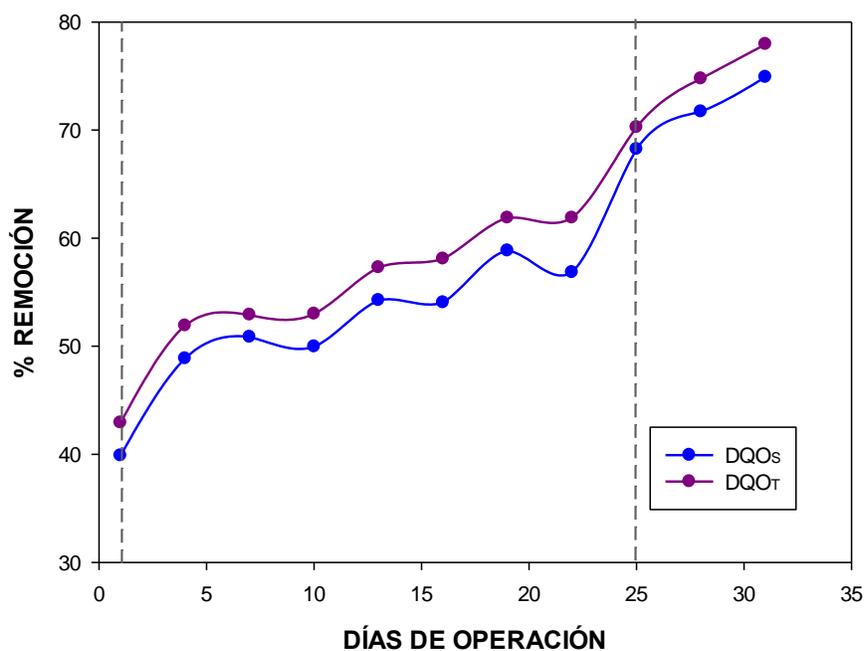
3.4.1 Remoción del Humedal Construido escala microcosmos

El tratamiento en el humedal inició con un periodo de adaptación de las especies vegetales, con una alimentación de agua natural por 30 días, posteriormente se utilizó el efluente del reactor anaerobio, realizando una dilución para alimentar el sistema con una concentración de 1 g DQO/L. El Tiempo de Residencia Hidráulica (TRH) fue de 3 días. Como se muestra en la Figura 3.6, la remoción inicial de la DQO fue del 40 % y a partir del día 25 se observa un incremento alcanzándose una remoción final del 78 %, obteniendo una concentración final de 0.221 g DQO/L. Los resultados obtenidos para la remoción de materia orgánica evaluando los mono y policultivos de los humedales se muestra en la Figura 3.6.

Tabla 3.2 Distribución de especies vegetales.

Celda	Soporte	Especie	Ejemplares por especie
1	Tezontle	<i>Canna hybrids</i>	1
2	Tezontle	<i>Canna hybrids</i>	3
3	Tezontle + Polietileno	<i>Canna hybrids</i>	3
4	Tezontle	<i>Alpinia</i>	1
5	Tezontle	<i>Alpinia</i>	3
6	Tezontle + Polietileno	<i>Alpinia</i>	3
7	Tezontle	<i>Spathiphyllum</i>	1
8	Tezontle	<i>Spathiphyllum</i>	3
9	Tezontle + Polietileno	<i>Spathiphyllum</i>	3

La Figura 3.7 muestra los resultados obtenidos en cuanto a la remoción de ST y STV, el grafico muestra que los valores a partir del día 13 fue incrementando la remoción.

Figura 3.6 Porcentaje de remoción de DQO_T y DQO_S del HCMi.

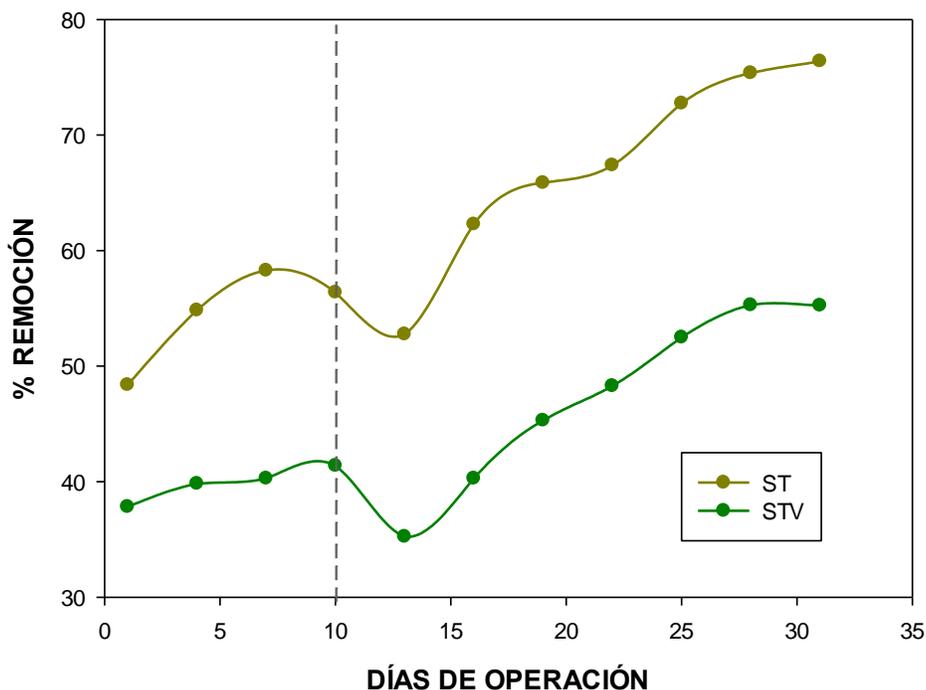


Figura 3.7 Porcentaje de remoción de ST y STV del HCMi.

De los tres tipos de especies ocupadas la mejor fue la *Canna Hybrids* debido a que obtuvo remociones mayores de 60 % en promedio de las 3 celdas utilizadas por especie, de acuerdo a la Figura 3.8, a partir del día 22 las especies comenzaron a incrementar los valores de remoción con 67 % para *Canna Hybrids* 55 % para *Alpinia* y 63 % para la *Spathiphyllum*. En cuanto al tipo de soporte utilizado en cada celda, encontramos que el tezontle utilizado para el humedal, es mejor en comparación a la mezcla tezontle-polietileno debido a que existen menores zonas muertas y sin soporte gracias al tamaño de partícula y mayor capacidad de compactación.

Orduña-Gaytán *et al.*, (2018) utilizaron el mismo sistema y con la especie *Spathiphyllum* alimentando con residuos de frutas y verduras durante 120 días y obtuvo valores de remoción de DQO de hasta el 90 % comparado a este trabajo se deduce que se obtuvieron buenos resultados con el agua residual del ingenio debido que únicamente se operó durante 31 días alcanzando remociones mayores del 70%.

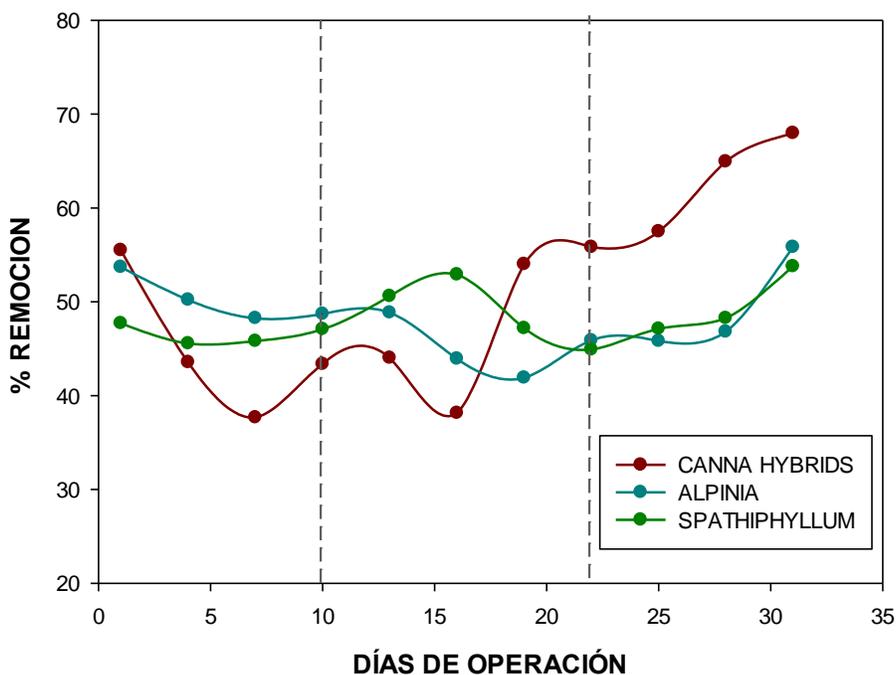


Figura 3.8 Porcentaje de remoción por especie del HCMi.

3.5 Construcción del Reactor de Biopelícula Anaerobio

El RBA está construido de material de fibra de vidrio (Figura 3.9). Está compuesto en su interior de un panel de fibras de nylon polyester como soporte, para favorecer el desarrollo de la biopelícula bacteriana en el material poroso (Figura 3.10). Contiene dos tapas internas en la parte superior e inferior con orificios para distribuir el flujo en la alimentación (Figura 3.12). Se utilizaron dos bombas peristálticas, una para el flujo de alimentación y la segunda para la recirculación (Figura 3.11). Tiene una tapa externa en la parte superior con dos salidas, una de ellas para la conexión de la recirculación y la segunda como salida de biogás (Figura 3.13).



Figura 3.11 Tanque del reactor



Figura 3.10 Panel de soporte interno



Figura 3.9 Bomba Peristáltica



Figura 3.12 Tapas internas.

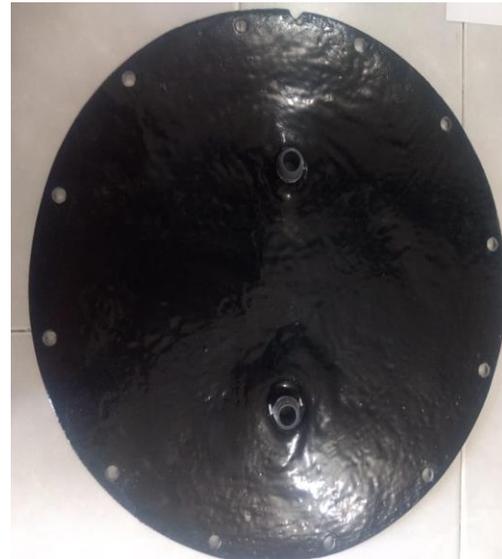


Figura 3.13 Tapa externa.

El RBA (Figura 3.14) se construyó dentro de las instalaciones del Instituto Tecnológico de Orizaba, en este Reactor se realizó la primera etapa del proceso de digestión anaerobia, la hidrólisis, donde la materia orgánica presente en el agua residual se

descompone en compuesto más simples para que sean aprovechados en su segundo tratamiento.



Figura 3.14 Reactor de Biopelícula Anaerobia.

3.5.1 Colonización y adaptación del Reactor de Biopelícula Anaerobio

Para la adaptación del RBA se operó durante 28 días de modo que las bacterias lograran adherirse al soporte interno del reactor, se inició agregando el 30% de sustrato concentrado de residuo de frutas y verduras con una cantidad de 15 litros, 10% del sustrato de agua residual con una cantidad de 5 litros, y el resto de agua, durante los primero 15 días esta mezcla se mantuvo únicamente en recirculación por tiempos cortos, a partir del día 16 la alimentación se realizó cada 3 días. La Figura 3.15 muestra la distribución del flujo de recirculación. Durante los primeros días, debido a que el efluente estaba muy concentrado se formaron precipitados sólidos en la parte superior (Figura 3.16), estas partículas lograron adherirse al panel cuando se comenzó la recirculación del efluente formando la biopelícula de bacteriana (Figura 3.17).



Figura 3.15 Distribuidor de flujo.



Figura 3.16 Precipitado sólido de efluente.



Figura 3.17 Panel colonizado.

3.6 Construcción del Humedal Construido de Flujo Subsuperficial Vertical (HCMe)

El HCMe se construyó utilizando 3 celdas de acrílico (Figura 3.18) con las características mencionadas en el apartado 2.6, contienen 12 tubos de PVC

perforados para muestra de soporte colonizado (Figura 3.19), cada celda tiene un recipiente recolector del efluente por desbordamiento, debido a la tubería en forma de “S” simulando sistemas de flujo subsuperficial con alimentación vertical (Figura 3.20), este recipiente tiene una tapa superior sellada para tomar la muestra de la salida del efluente. Para regular el flujo de alimentación se utilizaron dos válvulas fit (Figura 3.21) con dos salidas para cada celda, con un flujo de alimentación de 10 ml/min.



Figura 3.18 Celdas de acrílico.



Figura 3.19 Tubos de PVC.



Figura 3.21 Contenedor de efluente de salida



Figura 3.20 Válvulas de alimentación

Se utilizaron 12 tubos de PVC por celda acomodados como se muestra en la Figura 3.22 para muestra de soporte colonizado, Se utilizaron tres tipos de material como soporte llenados de la siguiente manera: en el fondo 20 cm de piedra de rio, (con un desnivel en diagonal a la entrada para distribuir el flujo de alimentación y evitar flujos preferenciales), de 10 cm de trozos de polietileno en la parte intermedia y por encima de esta, 10 cm de tezontle tamaño medio comercial, continuando con polietileno y tezontle como se mencionó anteriormente; tal y como se muestra en la Figura 3.23, esta última capa de tezontle se realiza para evitar la propagación de insectos. La Figura 3.24 muestra la celda llena del soporte y las plantas sembradas.



Figura 3.23 Distribución de tubos de PVC



Figura 3.22 Distribución del soporte.



Figura 3.24 Celda con material de soporte.

3.7 Remoción del Reactor de Biopelícula Anaerobio

3.7.1 Cálculo de concentraciones

Las siguientes ecuaciones muestran un balance del sistema de tratamiento con las concentraciones utilizadas para alimentar el reactor seguido del humedal, de igual manera se muestra la concentración de salida de las dos etapas de tratamiento. Este balance se realizó para obtener los valores en g DQO y obtener la remoción del sistema completo.

a) Etapa 1: Reactor de Biopelícula Anaerobio

ALIMENTACIÓN

$$\left(19 \frac{g DQO}{L}\right) (34.2 L) = 646 g DQO \quad (3.1)$$

$$\left(13 \frac{g DQO}{L}\right) (50 L) = 650 g DQO \quad (3.2)$$

RECIRCULACIÓN

$$\left(15 \frac{g DQO}{L}\right) (60 L) = 900 g DQO \quad (3.3)$$

SALIDA

$$\left(8 \frac{g DQO}{L}\right) (60 L) = 480 g DQO \quad (3.4)$$

REMOCIÓN

$$\left(\frac{(900 g DQO - 480 g DQO)}{900 g DQO}\right) * 100 = 46 \% \quad (3.5)$$

b) Etapa 2: Humedal Construido*ALIMENTACIÓN*

$$\left(8 \text{ g } \frac{DQO}{L}\right) (101 \text{ L}) = 808 \text{ g } DQO \quad (3.6)$$

$$\left(3 \text{ g } \frac{DQO}{L}\right) (270 \text{ L}) = 810 \text{ g } DQO \quad (3.7)$$

ALIMENTACIÓN POR CELDA

$$\left(3 \text{ g } \frac{DQO}{L}\right) (90 \text{ L}) = 270 \text{ g } DQO \quad (3.8)$$

SALIDA POR CELDA

$$\left(0.2 \text{ g } \frac{DQO}{L}\right) (90 \text{ L}) = 18 \text{ g } DQO \quad (3.9)$$

SALIDA FINAL

$$\left(0.2 \text{ g } \frac{DQO}{L}\right) (270 \text{ L}) = 54 \text{ g } DQO \quad (3.10)$$

REMOCIÓN

$$\left(\frac{(810 \text{ g } DQO - 54 \text{ g } DQO)}{810 \text{ g } DQO}\right) * 100 = 93 \% \quad (3.11)$$

3.7.2 Remoción de Demanda Química de Oxígeno en el RBA

El primer tratamiento del agua residual se inició en un Reactor de Biopelícula Anaerobio en donde se llevó a cabo la hidrólisis, primera etapa de la digestión anaerobia, este primer tratamiento se monitoreo durante 68 días. Durante los primeros 15 días el reactor se mantuvo en adaptación por lo cual únicamente se recirculo con tiempo cortos de recirculación y la alimentación se mantuvo con una proporción 30 % de sustrato de frutas y verduras, 10% de agua residual y el resto de agua.

La Figura 3.25 muestra que en estos primeros días las remociones eran muy bajas y no tan estables, a partir del día 16 la alimentación comenzó a cambiarse cada tres días manteniendo la misma concentración inicial, a pesar de que las remociones seguían siendo bajas la concentración era más estable. A partir del día 29 se inició la alimentación con agua residual del ingenio con una concentración de 13 gDQO/L aproximadamente, agregando 34.2 L de sustrato (agua residual), durante la operación del RBA permanecía una parte dentro del reactor, esto para evitar que se lavara el panel de soporte donde se encontraba inoculado por las bacterias, debido a esto después de la alimentación se recirculó durante una hora y se tomaba la muestra interna del RBA, la concentración interna se mantenía en 15 gDQO/L los cálculos de concentración se muestran en el apartado 3.7.1.

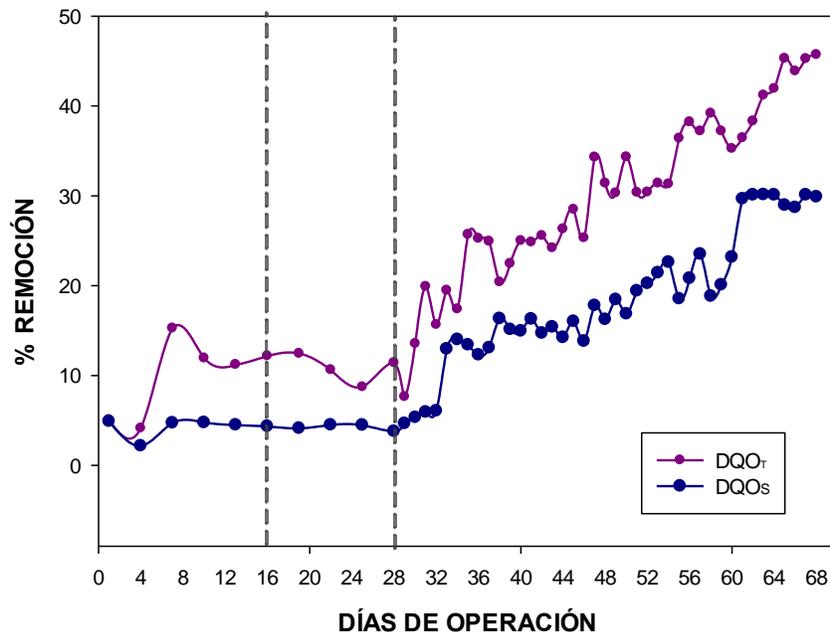


Figura 3.25 Porcentaje de remoción de DQO_T y DQO_S en el RBA.

A partir del día 30 las remociones comenzaron a incrementar llegando a obtener valores del 46 % en DQO_T obteniendo como efluente de salida valores de 8 g DQO/L aproximadamente y valores de 30 % en DQO_S.

3.7.3 Remoción de Sólidos Totales y Sólidos Totales Volátiles del reactor de biopelícula anaerobio

En la Figura 3.26 se encuentran los valores de remoción en Sólidos Totales y Sólidos Totales Volátiles como se mencionó en el apartado anterior debido a que los primeros 28 días el reactor se encontraba en adaptación los valores de remoción no eran los esperados ya que se encontraban valores muy bajos, pero comenzaron a incrementar a partir del día 29. En el caso de los Sólidos Totales se obtuvieron valores del 48 % y en valores de Sólidos Totales Volátiles se lograron remociones de 20%.

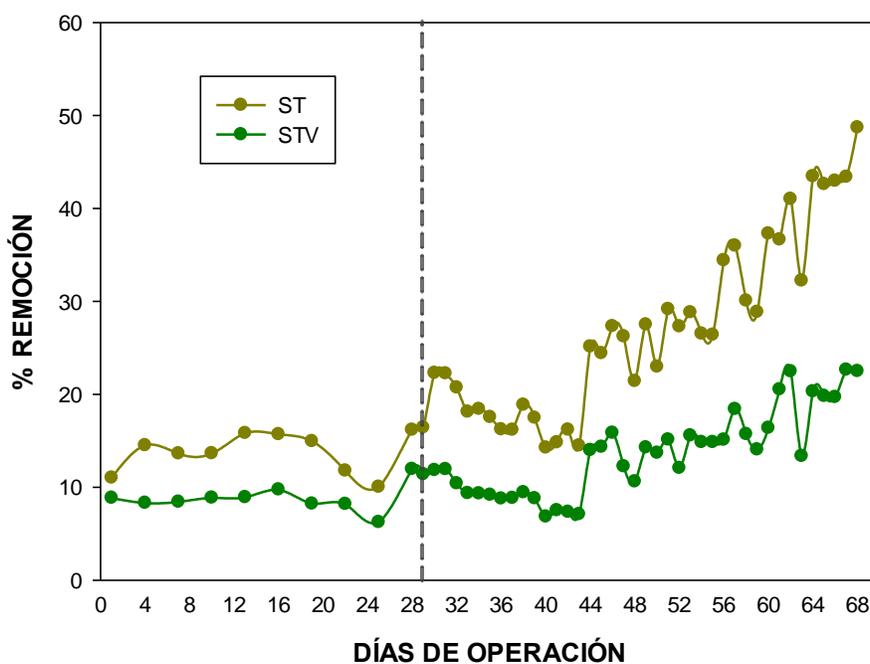


Figura 3.26 Porcentaje de remoción en ST y STV en el RBA.

3.7.4 Monitoreo de pH

El sustrato de alimentación presentó un pH con valor ácido debido a esto se tuvo que ajustar a un rango de 5.5 – 6.5 en el cual se reproducen las bacterias hidrolíticas, como se muestra en la Figura 3.27 se mantuvo en ese rango a excepción del día 40 que se incrementó, el pH de salida se registró mayor que el de entrada debido al tratamiento que realizó el RBA descomponiendo la materia orgánica.

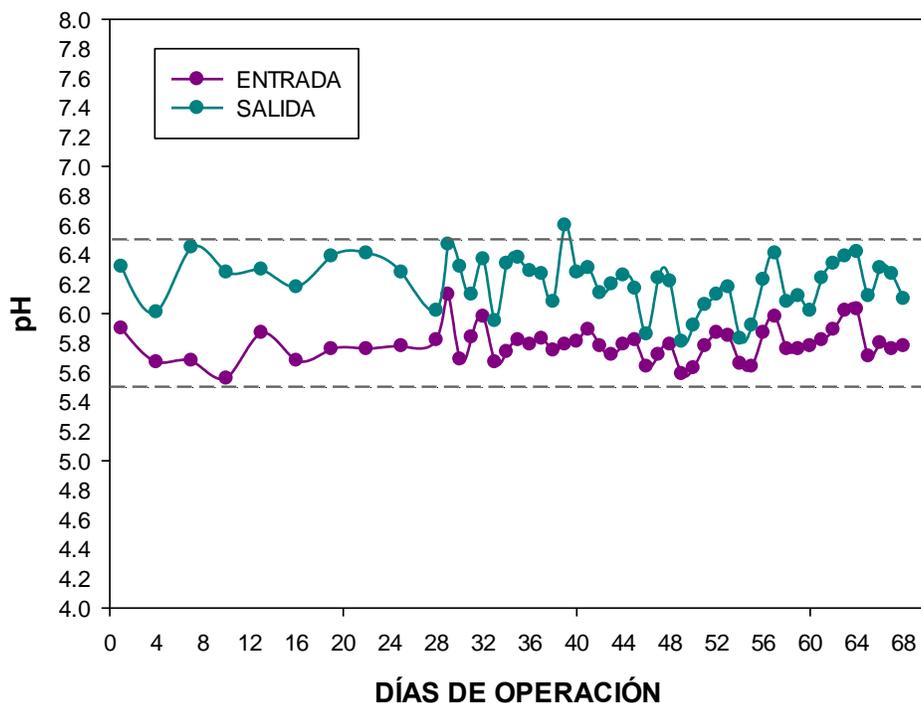


Figura 3.27 Monitoreo de pH en el RBA.

3.7.5 Remoción de Demanda Química de Oxígeno en el Humedal Construido

En el segundo tratamiento se mantuvo una operación de 37 días, como se mencionó en el apartado 2.8 fue necesaria una dilución del efluente de salida del RBA debido que se obtuvieron valores de concentración de 8 g DQO/L.

Las plantas tuvieron una adaptación con agua natural antes de iniciar el tratamiento y después se acondicionaron a una concentración de 1 g DQO/L en el HCMi, una vez adaptadas se incrementó la concentración a 3 g DQO/L, para esto se utilizaron aproximadamente 54 Litros del efluente del RBA para la alimentación y se llevaron al volumen total de 270 L para alimentar las celdas del humedal.

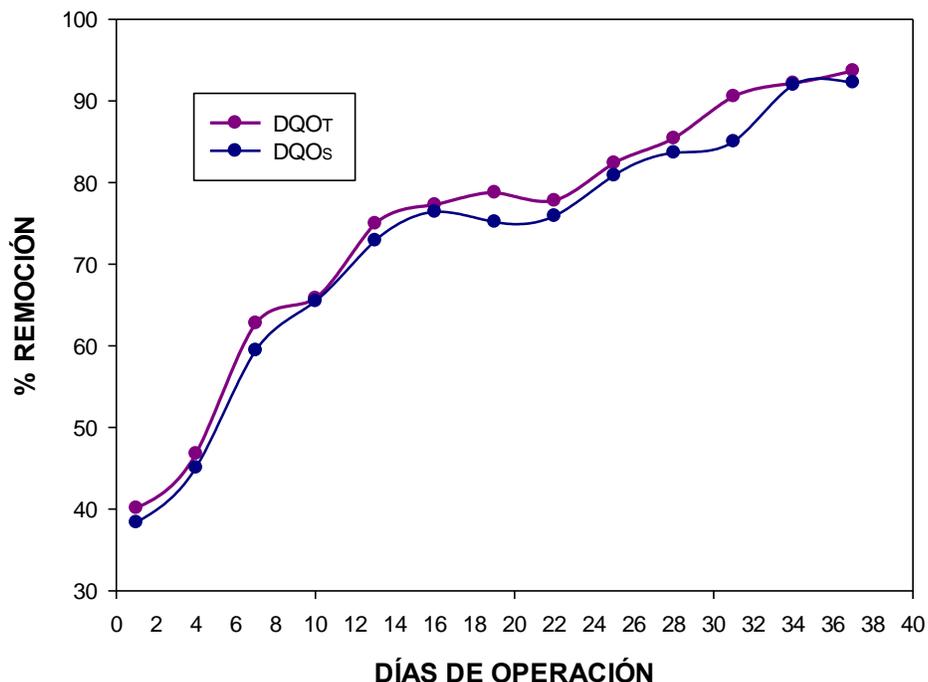


Figura 3.28 Porcentaje de remoción de DQOT y DQOS en el HCMe.

En la Figura 3.28 se observan los valores obtenidos durante los 37 días de tratamiento en el Humedal debido a que los soportes utilizados en este sistema eran de un material poroso los resultados desde el inicio eran favorables ya que se comenzó con remociones del 42 % los resultados se mantuvieron casi estables y no hubo muchas variaciones, logrando obtener remociones de hasta el 95 % en DQO_T obtenido una concentración de salida final de 0.35 g DQO/L aproximadamente. En cuanto a los valores de DQO_S se obtuvieron remociones de 93 % como se observa no existe mucha variación entre los resultados esto se debe a que el Humedal logro retener la mayor cantidad de sólidos.

3.7.6 Remoción de Sólidos Totales y Sólidos Totales Volátiles en el Humedal Construido

En la Figura 3.29 se muestran los valores obtenidos en remociones de sólidos totales y Sólidos Totales Volátiles, como se mencionó en el apartado anterior los valores

iniciales fueron favorables y debido a la porosidad del material de soporte como es el tezontle los sólidos con componentes orgánicos pudieron ser retenidos en el soporte y así ser aprovechados de una manera fácil para las plantas. Se obtuvieron remociones de hasta el 90 % en sólidos totales, y en sólidos rotales volátiles se lograron remociones del 60 %.

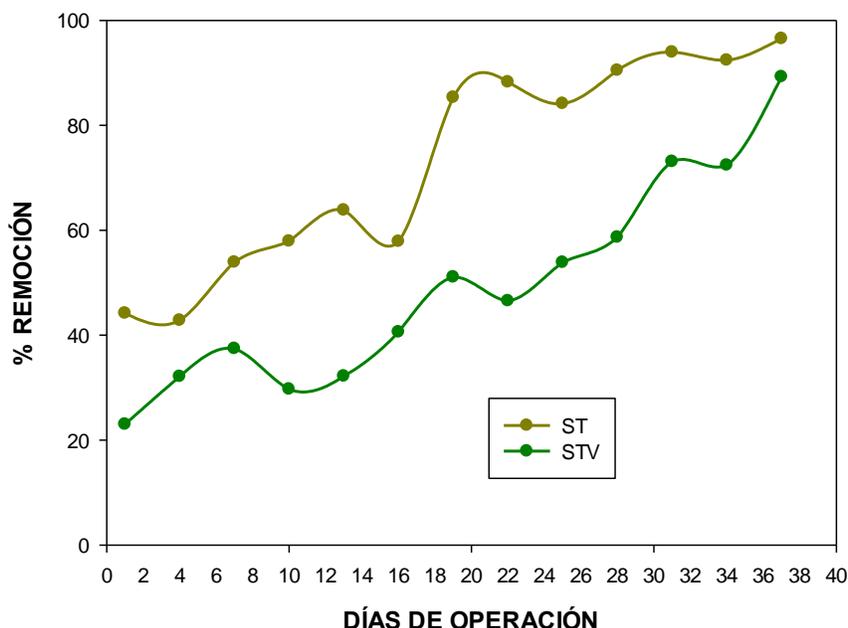


Figura 3.29 Porcentaje de remoción de ST y STV en el HCMe.

3.8 Monitoreo de las especies vegetales

Se utilizaron las especies *Typha spp.*, *Spathiphyllum* y *Canna hybrids*. De estas las primeras dos son plantas de ornato las cuales no son comunes en humedales debido a que logran formar una flor, necesitan de fuentes de nitrógeno y fósforo para lograrlas. La tercera especie mencionada es una planta común en humedales.

3.8.1 *Typha spp.*

La especie *Typha spp.* se sembró con 3 ejemplares en la última celda, con una altura de 50 cm aproximadamente, debido a la manipulación que se realizó la especie se marchitó a los 2 días de ser sembrada, después de 3 días nacieron 2 brotes nuevos

como se muestra en la Figura 3.30. Las características de crecimiento de la especie se muestran en la Tabla 3.3

Tabla 3.3 Características de crecimiento (*Typha spp.*).

Celda	Ejemplares por especie	Longitud de hoja (cm)		Ancho de hoja (cm)		Total de especies	
		Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Marchitas	Brotes
3	3	5	2	1	0.5	3	2

Vymazal, 2011 describe que *Typha spp.* es una de las especies comúnmente más usadas a nivel tropical y subtropical en humedales construidos subsuperficiales por su efecto positivo en soportar altas cargas de nutrientes. Marín-Muñiz, 2016 utilizó *Typha spp.* con aguas residuales domésticas y reporto valores de remoción del 80 % en DBO₅ utilizando esta especie por su fácil adaptación. En cuanto a este reporte no tuvo un crecimiento favorable debido a que en los primeros 10 días de alimentación la celda con esta especie no se llenaba lo suficiente debido a la configuración del humedal por ello se registraron valores bajos de remoción en DQO como se muestra en la Figura 3.33.

3.8.2 *Spathiphyllum*

La especie *Spathiphyllum* se sembró en la celda intermedia y desde el comienzo tuvo una adaptación favorable debido a que no mostro ningún cambio en la coloración de sus hojas desde los primeros días de sembrada, en esta especie de 3 ejemplares sembrados logro florecer a los 20 días de ser sembrada como se muestra en la Figura 3.31, esta especie logro remociones en DQO del 94 %.



Figura 3.30 *Typha* spp.



Figura 3.31 *Spathiphyllum*.

La Tabla 3.4 muestra las características de crecimiento que se obtuvieron durante los 37 días de monitoreo.

Tabla 3.4 Características de crecimiento (*Spathiphyllum*).

Celda	Ejemplares por especie	Longitud de hoja (cm)		Ancho de hoja (cm)		Total de especies	
		Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Marchitas	Brotes
2	6	14	12	4.5	3	1	2

3.8.3 *Canna hybrids*

La primera especie en ser sembrada fue la *Canna hybrids*, esta especie inicio con una altura de casi 40 cm y con 1 brote de flor, debido a la manipulación y las características de floreado, la especie se marchito a los 7 días de ser sembrada, pero a los 10 días nacieron brotes nuevos y sin ningún problema de crecimiento o cambio e su coloración, durante los 37 días de monitoreo la panta tuvo una adaptación favorable y un crecimiento constante como se observa en la Figura 3.32

Figura 3.32 *Canna hybrids*.

A diferencia de las otras dos especies, esta planta tiene características diferentes, la principal, es que crecen hasta más de 1 m, presentan una mayor cantidad de forraje y debido a esto requieren de mayor contenido de componentes orgánicos para poder florear. La Tabla 3.5 muestra las características de crecimiento y brotes que crecieron durante en los 37 días de monitoreo

Tabla 3.5 Características de crecimiento (*Canna hybrids*).

Celda	Ejemplares por especie	Longitud de hoja (cm)		Ancho de hoja (cm)		Total de especies	
		Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Marchitas	Brotes
3	3	5	2	1	0.5	3	2

La Figura 3.32 muestra los porcentajes de remoción que se obtuvieron por cada una de las celdas, se observa cada una de las especies sembradas y las remociones que alcanzaron durante los 37 días del tratamiento. En la Figura 3.32 se observa que durante los primeros 4 días hubo variaciones en las tres especies, esto se debe a la que en esos días las especies se comenzaron a adaptar al agua residual como sustrato de alimentación, se logra apreciar que la especie que obtuvo mejores resultados y removió mayor cantidad de materia orgánica fue la *Canna hybrids* alcanzando casi el 95 % de remoción, en cuanto a la *Spathiphyllum* fue la que obtuvo menores remociones durante los primero 10 días, pero a partir del día 28 las 3 especies comenzaron a incrementar la remoción.

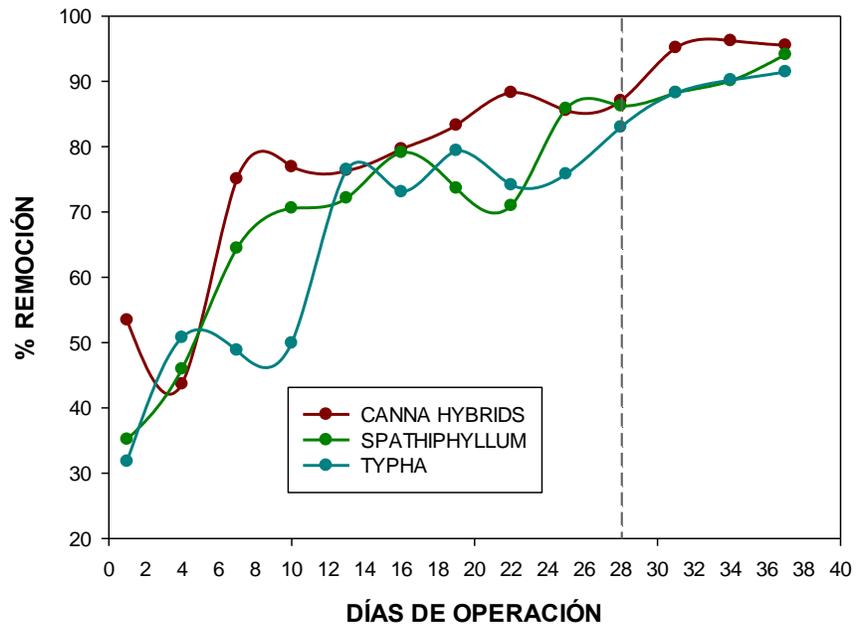


Figura 3.33 Porcentaje de remoción por celda y especie.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo se deduce que el tratamiento en el sistema híbrido del agua residual de la industria azucarera obtuvo resultados favorables. En el Reactor de Biopelícula Anaerobio se alcanzaron remociones del 64 % en valores de DQO_T durante un periodo de 40 días de operación en cuanto al Humedal Construido se obtuvieron valores de remoción del 95 % en DQO. La concentración inicial del tratamiento en el sistema fue de 650 g DQO y el efluente final después del segundo tratamiento fue de 54 g DQO obteniendo así una remoción del 91 % utilizando el sistema completo. Los sistemas combinados con sistemas ecológicos promueven el ahorro energético y se obtiene un beneficio en cuanto a costos debido a que evitan el uso de equipos que utilizan energía.

El panel de soporte en el RBA utilizando las fibras de nylon poliéster permitió retener el material orgánico que se encuentra dentro del reactor, de esta manera es de fácil consumo para las bacterias que se generan en el material. A pesar del corto tiempo de operación se logró una adaptación mantenido los TRH a 12 horas y logrando la remoción de contaminantes en el agua residual.

En el Humedal Construido se obtuvieron resultados favorables desde los primeros días de alimentación, debido a los soportes utilizados como el tezontle rojo que por sus características porosas logra retener la materia orgánica beneficiando a las especies vegetales sembradas, así también la piedra de río y el PET fueron de ayuda para las remociones de contaminantes. En específico el PET utilizado como soporte ayuda a reducir el impacto que genera en el medio ambiente.

De acuerdo a las especies utilizadas la *Canna hybrids* fue la que obtuvo mejores resultados de remoción logrando por si sola el 95 % en DQO, de las tres especies utilizadas fue la que presentó un crecimiento constante durante los 31 días de operación en el humedal, esta especie no es común utilizada en humedales, así como

la *Spathiphyllum* que logró remociones del 94 %, estas especies presentan una floración y esto representa un beneficio económico en el uso de humedales construidos.

La *Typha spp* a pesar de ser una especie común en humedales no obtuvo un crecimiento favorable, no logró adaptarse a las condiciones del humedal, pero aun así presentó brotes nuevos, aunque el crecimiento fue bastante lento se obtuvieron remociones del 80 % en la celda utilizada.

Los humedales ya sean naturales o construidos son sistemas que no requieren de cuidados estrictos como se mostró en este trabajo debido a que las plantas realizan su trabajo consumiendo la materia orgánica del agua residual retenida en los materiales de soporte sin requerir de cuidados estrictos.

RECOMENDACIONES

En cuanto al RBA es conveniente aumentar la concentración de alimentación debido a las remociones favorables que presentó, de igual manera es conveniente cambiar la manguera de alimentación por otro material para evitar acumulación de sólidos que impidan la corriente de flujo. En cuanto a los TRH puede aumentarse a 24 horas.

En el humedal construido podría cambiarse la alimentación por partes, esto es utilizando el efluente de salida de la primera celda para alimentar la segunda y el efluente de esta alimentaria a la tercera, para esto se requeriría cambia el orden de las especies.

**REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS**

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguilar-Rivera, N., Galindo, G. M., Fortanelli, J. M., y Contreras, C. S. (2009). ¿Por qué diversificar la agroindustria azucarera en México?. *Journal of Globalization, Competitiveness & Governability/Revista de Globalización, Competitividad y Gobernabilidad/Revista de Globalização, Competitividade e Governabilidade*, **3**(1).
2. Albuja, Y. R. F., Araujo G. P. A., y López., K. A. C. (2011). Obtención de un biofertilizante a partir del residuo ultra fino de *Spirulina Platensis*, mediante degradación anaerobia en fase hidrolítica. *Boletín técnico. Departamento de Ciencias de la vida Ing. en Biotecnología*.
3. Almeida, A., Nafarrate Rivera, E., Alvarado, A., y Cervantes Ovalle, A. (2011). Expresión genética en la digestión anaerobia: un paso adelante en la comprensión de las interacciones tróficas de esta biotecnología. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*. **3**(6):14-34.
4. Alvarado-Lassman, A., Sandoval-Ramos, A., Flores-Altamirano, M. G., Vallejo-Cantu, N. A., & Mendez-Contreras, J. M. (2010). Strategies for the startup of methanogenic inverse fluidized-bed reactors using colonized particles. *Water Environment Research*, **82**(5), 387-391.
5. Anastopolus, I., Bhatnagar, A., Hameed, B. H., Ok, Y. S. y Omirou, M. (2017). A review on waste-derived absorbents from sugar industry for pollutant removal in water and wastewater. *Journal of Molecular Liquids*, **240**, 179-188.
6. Araneda-Gallardo, I. (2016). Humedales construidos para tratamiento sustentable de aguas grises: Efecto del acople a una celda de combustible microbiana. Tesis de Maestría. Santiago de Chile, Chile: Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y matemáticas.

7. Arvin, A., Hosseini, M., Amin, M. M., Darzi, G. N., y Ghasemi, Y. (2019). A comparative study of the anaerobic baffled reactor and an integrated anaerobic baffled reactor and microbial electrolysis cell for treatment of petrochemical wastewater. *Biochemical Engineering Journal*.
8. Chen, J. L., Ortiz, R., Steele, T. W., y Stuckey, D. C. (2014). Toxicants inhibiting anaerobic digestion: a review. *Biotechnology advances*, **32**(8):1523-1534.
9. Cisneros, E., Rivas, H. A., Díaz, M. J., y A, C. (2011). Tratamiento de las aguas residuales del Ingenio Casasano en un humedal de flujo intermitente. México.
10. CONADESUCA, (2016). Reduccion del consumo de agua en los procesos productivos del ingenio. SAGARPA. Boletín Tecnico Informativo. México.
11. Conagua (2010). Statistics on Water in Mexico, 2010 edition. México: Ministry of Environment and Natural Resources.
12. Corrales, L. C., Romero, D. M. A., Macías, J. A. B., y Vargas, A. M. C. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*, **13**(24):55-81.
13. Díaz-Acero C. A. (2014). Tratamiento de agua residual a través de humedales. V Congreso Internacional de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás Seccional Tunja.
14. Díaz-Jiménez, P., (2016) Biología floral y reproductiva de *Spathiphyllum cochlearispathum* (Liebm.) Engl. y *Spathiphyllum orgiesii* Regel (araceae) en la región de Los Tuxtlas, Veracruz, México. Tesis de Maestría. Universidad Veracruzana.
15. Díaz-de los Ríos, M., Eng-Sánchez, F., Herrera-Díaz, Y., y Lorenzo-Acosta, Y. (2016). El manejo de los residuales líquidos de la industria de azúcar y sus

- derivados en Cuba, en el contexto de las legislaciones ambientales actuales. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, **50**(3):59-63.
16. Dominguez-Manjarrez C. A., Bravo-Álvarez H., y Sosa-Echeverría R. (2014). Prevención, minimización y control de la contaminación ambiental en un ingenio azucarero de México. *Ingeniería, investigación y tecnología*, **15**(4), 549-560.
17. García-Serrano, J., y Corzo Hernandez, A. (2008). Depuración con humedales construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona España.
18. Hernández A, María E. (2016). Humedales ornamentales con participación comunitaria para el saneamiento de aguas municipales en México. RINDERESU (Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable), **1**(2):01-12.
19. Heynes-Silerio, S. A., del Socorro González-Elizondo, M., Ruacho-González, L., González-Elizondo, M., y López-Enríquez, I. L. (2017). Vegetación de humedales del municipio de Durango, Durango, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, **88**(2):358-364.
20. IFC. Corporación Financiera Internacional (2007). Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad. Fabricación de Azúcar.
21. Jain, S., Jain, S., Wolf, I. T., Lee, J., & Tong, Y. W. (2015). A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **52**, 142-154.

22. Jayabalan, T., Matheswaran, M., & Mohammed, S. N. (2018). Biohydrogen production from sugar industry effluents using nickel based electrode materials in microbial electrolysis cell. *International journal of hydrogen energy*, 1-8.
23. Kadlec, R. H., y Wallace, S. D. (2009). Treatment wetland. Taylor y Frnaxis Group, LLC.
24. Karadag, D., Koroglu, O. E., Ozkaya, B., y Cakmakci, M. (2015). A review on anaerobic biofilm reactors for the treatment of dairy industry wastewater. *Process Biochemistry*, **50**(2):262-271.
25. Kushwaha, J. P. (2013). A review on sugar industry wastewater: sources, treatment technologies, and reuse. *Desalination and Water Treatment*, **53**(2):37-41.
26. Marín-Muñiz, J. I. (2016). Remoción de contaminantes de aguas residuales por medio de humedakkes artificiales establecidos en el municipio de Actopan, Veracruz, México. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, **15**(2):553-563.
27. Montoya, J. I., Ceballos, L., Casas, J. C., y Morató, J. (2013). Estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial usando tres especies de macrófitas. *Revista EIA*, **7**(14):75-84.
28. Morales, G., López, D., Vera, I., & Vidal, G. (2013). Humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas. *Constructed wetlands with ornamental plants for removal of organic matter and nutrients contained in sewage. Theoria*, **22**(1): 33-46.
29. Orduña-Gaytan, F. Alvarado-Lassman, A. Vallejo-Cantú, N. A. y Sandoval-Herazo, L. C. (2018). Evaluation of the removal of pollutants in monocultate and polycultural artificial wetlands using as a substrate residual waters treated in

- anaerobic reactors. Memorias del XXI Biochemical Engineering National Congress.
30. Parra-Huertas, R. A. (2010). Digestión Anaerobia de Lactosuero: Efecto de Altas Cargas Puntuales. Revista facultad Nacional de Agronomía Medellín, **63**(1), 5385-5394.
31. Romero-Aguilar, M., Colín-Cruz, A., Sánchez-Salinas, E., y Ortiz-Hernández, M. A. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. Revista internacional de contaminación ambiental, **25**(3):157-167.
32. Saeed, T., y Sun, G. (2012). A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. Journal of Environmental Management, **112**:429-448.
33. Sahu, O., Rao, D. G., Gopal, R., Tiwari, A., y Pal, D. (2017). Treatment of wastewater from sugarcane process industry by electrochemical and chemical process: Aluminum (metal and salt). Journal of water process engineering, **17**:50-62.
34. Sandoval, L., Marín-Muñiz, J., Zamora-Castro, S., Sandoval-Salas, F., y Alvarado-Lassman, A. (2019). Evaluation of Wastewater Treatment by Microcosms of Vertical Subsurface Wetlands in Partially Saturated Conditions Planted with Ornamental Plants and Filled with Mineral and Plastic Substrates. International Journal Environmental Research and Public Health, **16**(2):1-15.
35. Suárez-Velázquez, G. A. (2012). Plan de manejo de residuos en la industria azucarera caso de estudio: Ingenio Adolfo López Mateos, Oaxaca. Tesis de Maestría . Mexico D.F. UNAM

36. Vymazal, J. (2013). The use of hybrid constructed wetlands for wastewater treatment with special attention to nitrogen removal: A review of a recent development. *Water Research*, **47**(14):4795-4811.
37. Wu, H., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., y Liu, H. (2015). A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: design and operation. *Bioresource technology*, **175**:594-601.
38. Zhang, D. Q., Jinadasa, K., Richard M., G., Yu, L., y Wung, J. (2014). Application of constructed wetlands for wastewater treatment in countries. A review of recent developments. *Journal of Environmental Management*, **141**:116-131.