



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

Efecto del cambio de configuración en la alimentación de un sistema híbrido reactor anaerobio de biopelícula-humedal construido (RAB-HC) en el tratamiento de un efluente azucarero

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA QUÍMICA**

PRESENTA:

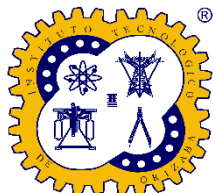
I.Q. Carlos Iván Gutiérrez González

DIRECTOR DE TESIS:

*MIQ. Norma Alejandra Vallejo
Cantú*

CO-DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Alejandro Alvarado Lassman



Orizaba, Veracruz, 16/marzo/2023
Dependencia: División de Estudios de
Posgrado e Investigación
Asunto: Autorización de Impresión
OPCION: I

C. CARLOS IVÁN GUTIÉRREZ GONZÁLEZ
Candidato(a) a Grado de Maestro(a) en:
CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA
PRESENTE.-

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros e Institutos Tecnológicos Federales del Tecnológico Nacional de México, de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

" Efecto del cambio de configuración en la alimentación de un sistema híbrido reactor anaerobio de biopelícula-humedal construido (RAB-HC) en el tratamiento de un efluente azucarero".

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

Cuahtémoc Sánchez R.

Dr. CUAUHTÉMOC SÁNCHEZ RAMÍREZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



OG-13-F06





Orizaba, Veracruz, **15/febrero/2023**
Asunto: Revisión de trabajo escrito

C. CUAUHTÉMOC SÁNCHEZ RAMÍREZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E.-

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

CARLOS IVÁN GUTIÉRREZ GONZÁLEZ

La cual lleva el título de:

"Efecto del cambio de configuración en la alimentación de un sistema híbrido reactor anaerobio de biopelícula-humedal construido (RAB-HC) en el tratamiento de un efluente azucarero."

Y concluyen que se acepta.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: MIQ. NORMA ALEJANDRA VALLEJO CANTÚ


FIRMA

SECRETARIO: DR. ALEJANDRO ALVARADO LASSMAN


FIRMA

VOCAL: DR. JUAN MANUEL MÉNDEZ CONTRERAS


FIRMA

VOCAL SUP.: DRA. OFELIA LANDETA ESCAMILLA


FIRMA

TA-09-18



Declaración de originalidad y cesión de derechos

Orizaba, Veracruz, el día 16 del mes de MARZO del año 2023.

El que suscribe

C. Carlos Iván Gutiérrez González

Declaro que esta tesis, que tiene una extensión de 77 hojas cuartillas, ha sido escrita por mí y constituye el registro escrito del trabajo de la tesis titulada “Efecto del cambio de configuración en la alimentación de un sistema híbrido reactor anaerobio de biopelícula-humedal construido (RAB HC) en el tratamiento de un efluente azucarero “ del programa: Maestría en Ciencias en Ingeniería Química bajo la asesoría y dirección de (la) MCIQ. Norma Alejandra Vallejo Cantú y Dr. Alejandro Alvarado Lassman y no ha sido sometida en ninguna otra institución previamente.

Todos los datos y las referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal y, en los casos que así lo requieran, cuento con las debidas autorizaciones de quienes poseen los derechos patrimoniales. Por lo tanto, me hago responsable de cualquier litigio o reclamación relacionada con derechos de propiedad intelectual, exonerando de toda responsabilidad al Tecnológico Nacional de México campus Orizaba.

También declaro que, al presentar esta tesis, cedo los derechos del trabajo al Tecnológico Nacional de México campus Orizaba para su difusión, con fines académicos y de investigación, 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.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y del director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: depi_orizaba@tecnm.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este.

Nombre y firma
Carlos Iván Gutiérrez González



AGRADECIMIENTOS

A Dios

Agradecido con él por haberme dado una gran familia, llena de felicidad, que siempre me ha brindado apoyo, comprensión a lo largo de mi vida, gracias, porque en ningún momento de mi vida estuve solo.

A mis Asesores

Agradezco a mis asesores la MIQ. Norma Alejandra Vallejo Cantú y al Dr. Alejandro Alvarado Lassman por su gran orientación, dedicación y gran apoyo brindado en la elaboración de este proyecto, además de su motivación en clases, amistad, experiencias las cuales significan para mí un aporte invaluable, no solamente en el desarrollo de este proyecto, también en mi formación personal.

De igual manera agradezco al Dr. Juan Manuel Méndez Contreras por las facilidades de utilizar sus instalaciones del Laboratorio y de su gran apoyo moral en este tiempo.

A mi Madre y Hermano

Por ser el pilar más importante en mi vida, por apoyarme en todo momento, con su motivación constante, ejemplos de perseverancia y constancia que tanto los caracterizan, pero sobre todo por su amor incondicional. Así mismo sabiendo que no exista una forma de agradecerle toda una vida de sacrificios y esfuerzos.

A mis Amigos

Francisco Orduña Gaytán, Israel de Jesús Balderas Caballero, Oscar Marín, Solmaría Mandi Pérez Guzmán, Luz Yadira Sánchez, Fernanda Castillo Vargas y Elizabeth Marcelino Celiseo por ser los mejores en su área de trabajo y por su invaluable tiempo, de verdad gracias amigos.

RESUMEN

Efecto del cambio de configuración en la alimentación de un sistema híbrido reactor anaerobio de biopelícula-humedal construido (RAB-HC) en el tratamiento de un efluente azucarero

Elaborado por: I.Q. Carlos Iván Gutiérrez González

Dirigido por: M.I.Q. Norma Alejandra Vallejo Cantú

Dr. Alejandro Alvarado Lassman

El vertido de Aguas Residuales de la Industria Azucarera (ARIA) genera alteraciones al ecosistema debido a la falta de tratamientos adecuados. Actualmente, las tecnologías de tratamiento buscan brindar alternativas económicamente viables mitigando el impacto ambiental en regiones tropicales como Brasil, India y México. Por lo tanto, este estudio presenta 2 configuraciones realizadas en diferentes condiciones de operación en las cuales se obtuvieron resultados de remoción muy favorables. Configuración 1 Humedales Construidos en Paralelo (HCP), este sistema híbrido se operó en dos etapas: etapa 1) Reactor de Biopelícula Anaerobio (RBA) y etapa 2) HCP. El RBA fue alimentado por lotes de 10 L de ARIA con una $C_{va} = 15$ g DQO/L.d, $TRH = 24$ h y $pH = 5.5 \pm 2$, el efluente resultante se alimentó al HCP con $TRH = 72$ h sin ajustes de pH. En la primera etapa las mejores remociones fueron de 70 % de DQO_T , 69 % DQO_S , 72 % ST, 60 % STV, respectivamente y el HCP alcanzó 45 % de remociones de DQO_T , 40 % DQO_S , 69 % ST, 68 % STV para los mismos parámetros. La configuración 2 Humedales Construidos en Serie (HCS) se alimentó mediante lotes consecutivos de 70 L con una concentración de 7.09 gDQO de acuerdo con la configuración correspondiente por permutación. Las celdas fueron sembradas con monocultivo de las plantas ornamentales (A) *Canna Indica* L., (B) *Spathiphyllum Willisii* y la última celda de la especie nativa de humedales (C) *Typha Latifolia* L. Las seis permutaciones fueron las siguientes ABC, BAC, BCA, CBA, CAB, ACB; utilizando como soporte Grava Volcánica Roja (GVR); con flujo de alimentación de 48.61 mL/min, sin ajustes de pH y $TRH = 24$ h. En general la configuración 5 (CAB) presentó los mejores resultados. La remoción de materia orgánica medida como DQO_T logró hasta un 78.09 % de remoción. Además, para otros parámetros medidos el HCS registró un 63.66 % para ST, 70.50 % NO_3^- y 86.97 % PO_4^{3-} .

ABSTRACT

Effect of the configuration change in the feeding of a hybrid anaerobic reactor biofilm-wetland system (RAB-HC) in the treatment of a sugar effluent

By: I.Q. Carlos Iván Gutiérrez González

Advisor: M.I.Q. Norma Alejandra Vallejo Cantú

Dr. Alejandro Alvarado Lassman

The discharge of sugar industry wastewater (SIW) generates alterations to the ecosystem due to the lack of adequate treatment. Currently, treatment technologies seek to provide economically viable alternatives by mitigating the environmental impact in tropical regions such as Brazil, India and Mexico. Therefore, this study presents 2 configurations carried out under different operating conditions in which very favorable removal results were obtained. Configuration 1 Parallel Constructed Wetlands (PCW) This hybrid system was operated in two stages: stage 1) Anaerobic Biofilm reactor (ABR) and stage 2) PCW. THE ABR was fed with 10 L of SIW in batch operation with $OLR = 15 \text{ g COD/L.d}$, $HRT = 24 \text{ h}$ and $pH = 5.5 \pm 2$, the resulting effluent was fed to the PCW with $TRH = 72 \text{ h}$ without pH adjustments. In the first stage, the best removals were 70% COD_T , 69% COD_S , 72% TS, 60% TVS, and the PCW reached 45% COD_T removals, 40% COD_S , 69% TS, 68% TVS, for the same parameters. Configuration 2 Serially Constructed Wetlands (SCW) was fed by consecutive batches of 70 L with a concentration of 7.09 gCOD according to the corresponding configuration by permutation. The cells were seeded with monoculture of the ornamental plants (A) *Canna Indica* L., (B) *Spathiphyllum Willisii* and the last cell of the native wetland species (C) *Typha latifolia* L. The six permutations were as follows ABC, BAC, BCA, CBA, CAB, ACB; using Red Volcanic Gravel (RVG) as support; with a feeding flow of 48.61 mL/min, without pH adjustments and $HRT = 24 \text{ h}$. In general, configuration 5 (CAB) presented the best results. The removal of organic matter measured as DQO_T achieved up to 78.09 % removal. In addition, for other measured parameters, the HCS registered 63.66 % for TS, 70.50 % NO_3^- and 86.97 % PO_4^{3-} .

INDICE

LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTADE TABLAS.....	VII
NOMENCLATURA.....	VIII
INTRODUCCIÓN.....	1
JUSTIFICACIÓN.....	2
OBJETIVOS.....	3
Capítulo 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	
1.1 La industria azucarera en México.....	5
1.1.1 Exportación de azúcar al mercado mundial	6
1.1.2 Producción de azúcar	7
1.2 Contaminación de la industria azucarera	9
1.2.1 Distribución de aguas residuales industriales	9
1.2.2 Efluente de la industria azucarera.....	10
1.3 Tratamiento de aguas residuales de la industria azucarera	11
1.4 Digestión anaerobia	12
1.5 Bioconversión	14
1.5.1 Biogás	14
1.6 Reactores anaerobios de biopelícula.....	15
1.7 Humedales.....	16
1.7.1 Beneficios de los humedales	17
1.7.2 Humedales construidos	17
1.8 Clasificación de humedales construidos.....	18
1.8.1 Humedales construidos de flujo superficial	18
1.8.2 Humedales construidos de flujo subsuperficial.....	18
1.9 Plantas ornamentales utilizadas en humedales construidos	21
1.9.1 Spathiphyllum Willisii.	22
1.9.2 Canna Indica L.	23
1.9.3 Typha Latifolia L.....	23
1.10 Sistema híbrido de tratamiento a nivel planta piloto.....	24
1.11 Antecedentes.....	25
Capítulo 2 Materiales y métodos.....	
2.1 Descripción de la metodología.....	31
2.2 Evaluación del sistema hibrido de tratamiento.....	32
2.3 Caracterización del efluente azucarero hidrolizado	32
2.3.1 Intensidad Lumínica.....	34
2.3.2 Carga Volumétrica Aplicada (Cva).....	34
2.3.3 Tiempo de Retención Hidráulica (TRH).....	35
2.4 Operación del sistema de tratamiento	35
2.4.1 Operación del Reactor de Biopelícula Anaerobio.....	36
2.4.2 Operación en paralelo del humedal construido	37
2.4.3 Cambio de configuración para operación en serie del HC	37
2.4.4 Monitoreo del sistema de híbrido de tratamiento.....	38
2.5 Evaluación de las eficiencias del sistema en serie y en paralelo.....	38
Capítulo 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
3.1 Obtención del agua residual de la industria azucarera	41
3.2 Caracterización del efluente azucarero hidrolizado.....	41

3.2.1 Intensidad Lumínica.....	43
3.2.2 Carga Volumétrica Aplicada (Cva).....	43
3.2.3 Tiempo de retención hidráulica (TRH)	47
3.2.4 Operación del Sistema de Tratamiento	47
3.2.5 Operación del Reactor de Biopelícula Anaerobio.....	48
3.2.6 Operación en Paralelo del Humedal Construido	51
3.2.7 Cambio de configuración para operación en serie del HC	54
3.2.8 Monitoreo del sistema de híbrido de tratamiento.....	56
3.3 Evaluación de las eficiencias del sistema en serie y en paralelo.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Producción por cultivo (Cultivos perennes) (CONADESUCA, 2022)	5
Figura 1.2 Superficie sembrada por cultivo (CONADESUCA, 2022).....	6
Figura 1.3 Distribución de aguas residuales industriales en México	10
Figura 1.4 <i>Canna Indica</i> L. (Royal Botanic Gardens, Kew. 2022).	23
Figura 1.5 <i>Typha Latifolia</i> L. (Royal botanic Gardens, kew. 2022).	24
Figura 2.1 Metodología del proyecto.	31
Figura 2.2 Reactor de biopelícula anaerobio.....	37
Figura 2.3 Celdas y línea de alimentación	38
Figura 3.1 Humedal construido (RBA-HC)	42
Figura 3.2 Reactor anaerobio de biopelícula (RBA).	42
Figura 3.3 Alimentación de efluente al humedal construido (HC).	44
Figura 3.4 Remoción de DQO_T por las tres especies de plantas.	45
Figura 3.5 Remoción de ST por las tres especies de plantas.	46
Figura 3.6 Diagrama de operación HCP.	48
Figura 3.7 Remoción de DQO por RBA.	49
Figura 3.8 Concentración de Nitratos en el RBA.....	49
Figura 3.9 Concentración de fosfatos en el RBA.....	50
Figura 3.10 Remoción de sólidos en el RBA.....	50
Figura 3.11 pH de entrada y salida.	51
Figura 3.12 Porcentaje de remoción DQO en el HCP.	52
Figura 3.13 Monitoreo de Nitratos en HCP.	52
Figura 3.14 Monitoreo de fosfatos en el HCP.	53
Figura 3.15 Ensayos de operación del HCP.	53
Figura 3.16 Diagrama alimentación HCS celda 1.....	54
Figura 3.17 Diagrama alimentación HCS celda 2.....	55
Figura 3.18 Monitoreo de DQO_T en el HCS.	57
Figura 3.19 Ensayos de operación DQO_s del HCS.....	58
Figura 3.20 Ensayos de operación ST del HCS.	59
Figura 3.21 Ensayos de operación STV del HCS.....	60
Figura 3.22 Ensayos de operación PO_4^{3-} del HCS.....	61
Figura 3.23 Ensayos de operación NO_3^- del HCS.	62
Figura 3.24 Monitoreo de crecimiento de especies en el HCP.....	65
Figura 3.25 Monitoreo de Biomasa en el HCP-HCS.	66
Figura 3.26 Gráfica de intervalos de medias de Remociones y tratamiento del HCS.	67
Figura 3.27 Gráfica de comparaciones simultaneas de Tukey en el HCS.	68
Figura 3.28 Gráfica de Comparaciones múltiples del HCS sin control de Hsu.....	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Exportación de azúcar de México al mercado mundial.	7
Tabla 1.2 Principales Productores de caña de azúcar a nivel mundial (2018-2021).....	8
Tabla 1.3 Características estudiadas de aguas residuales de la industria azucarera.	11
Tabla 1.4 Clasificación de humedales construidos.....	19
Tabla 2.0.1 Parámetros fisicoquímicos y métodos de prueba.	32
Tabla 3.1 Caracterización fisicoquímica del efluente azucarero en trabajos previos y este trabajo.	41
Tabla 3.2 Condiciones ambientales promedio en el HC.....	43
Tabla 3.3 Remoción de materia orgánica a diferentes cargas volumétricas (Cva).....	43
Tabla 3.4 Remoción de DQO _T	45
Tabla 3.5 Remoción de sólidos suspendidos totales.....	46
Tabla 3.6 Permutaciones y clave de especies.	56
Tabla 3.7 Adaptación y supervivencia de las especies usadas.....	63

NOMENCLATURA

Nomenclatura	Significado
DA	Digestión anaerobia
Cva	Carga volumétrica Aplicada
HC	Humedal Construido
HCP	Humedal Construido en Paralelo
GVR	Grava Volcánica Roja
ARIA	Agua Residual de la Industria Azucarera
HCS	Humedal Construido en Serie
TRH	Tiempo de Retención hidráulica
RBA	Reactor de Biopelícula Anaerobio
ST	Sólidos Totales
STV	Sólidos Totales volátiles

INTRODUCCIÓN

La industria azucarera utiliza como materia prima la caña de azúcar, la producción nacional de esta especie vegetal se realiza en 873 978 ha que generan 56,300,000 ton de materia prima y surten a un poco más de 55 ingenios o fábricas azucareras ubicado en 15 estados de nuestro país, estos datos son para la zafra del año 2019 (INEGI, 2019). Esta agroindustria depende de un abastecimiento de agua adecuado, ya que la utiliza en su proceso como materia prima y para el sistema de enfriamiento de equipos o para limpieza de estos y como un componente de algunos de sus productos (CONADESUCA, 2016). Debido a que la normatividad y sustentabilidad requieren que los procesos químicos respeten las regulaciones ecológicas vigentes, es deseable la integración de sistemas ecológicos que funcionen como operaciones unitarias en el diseño de procesos; por ejemplo, los humedales construidos (HC) para el tratamiento de aguas residuales (Aleissa y Bakshi, 2021). Los HC pueden emplearse como un tratamiento primario ó secundario de bajo costo, en su operación como en su mantenimiento (Saeed *et al.*, 2018). Los HC se han empleado para dar tratamiento a las aguas residuales de casa habitación, agrícolas, lixiviados, descargas de efluentes de la industria de papel, textiles, de alimentos, petroleras entre otras. 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. El rendimiento de un humedal construido depende de diversos factores entre los que se pueden destacar, el tipo de humedal, la vegetación utilizada, la carga hidráulica a tratar y el medio utilizado como soporte o lecho (Parde *et al.*, 2020).

JUSTIFICACIÓN

Existen diferentes tecnologías que presentan ventajas y desventajas dependiendo del contexto, entre ellas se encuentran los humedales artificiales o contruidos (Marín y Correa, 2010). Los humedales forman parte de los recursos naturales definidos como ecosistemas que comparten características terrestres y acuáticas, diferenciados por la presencia de agua, suelo y vegetación (herbácea y/o arbórea) adaptada a vivir en tales condiciones de suelos húmedos (Mitsch y Gosselink, 2007; Moreno-Casasola e Infante, 2010). En México, en los últimos años ha habido un aumento en el inventario nacional ya que se identificaron 6331 humedales naturales, los cuales representan el 50 % de la superficie nacional, en comparación a los 142 registrados por la lista Ramsar en 2017 (CONAGUA, 2018). Por otro lado, se ha demostrado que las funciones de los humedales pueden ser definidas por la composición y distribución de las comunidades microbianas e influenciadas por el estado de la contaminación del entorno, siendo esto, una parte esencial para la comprensión de la interrelación entre la distribución microbiana y el estado de la contaminación de los humedales para la evaluación del humedal construido (Cao *et al.*, 2017).

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el efecto del cambio de configuración (en serie en vez de en paralelo) en tres celdas de humedales construidos, las cuales contienen diversas especies vegetales para el tratamiento de un efluente de la industria azucarera.

Objetivos específicos

- 1.- Evaluar el sistema de tratamiento híbrido reactor de biopelícula anaerobio-humedal construido en configuración en paralelo.
- 2.- Evaluar la configuración del humedal construido para su operación en serie.
- 3.- Evaluar las permutaciones de las tres celdas del humedal construido.
- 4.- Realizar una comparación de la eficiencia de remoción de la materia orgánica del sistema en ambas configuraciones.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS

TEÓRICOS

1.1 La industria azucarera en México

La caña de azúcar es la materia prima de la industria azucarera y su participación económica alcanza los 34 mil millones de pesos, La producción nacional de caña se realiza en 873 978 ha (Figura 1.2) que generan 53 315 792 T (Figura 1.1) de materia prima de las cuales se destinan poco más de 6 millones a la producción de azúcar en 57 ingenios o fábricas azucareras localizados en los estados de Campeche, Chiapas, Colima, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sinaloa, Tabasco, Tamaulipas y Veracruz (INEGI, 2019).

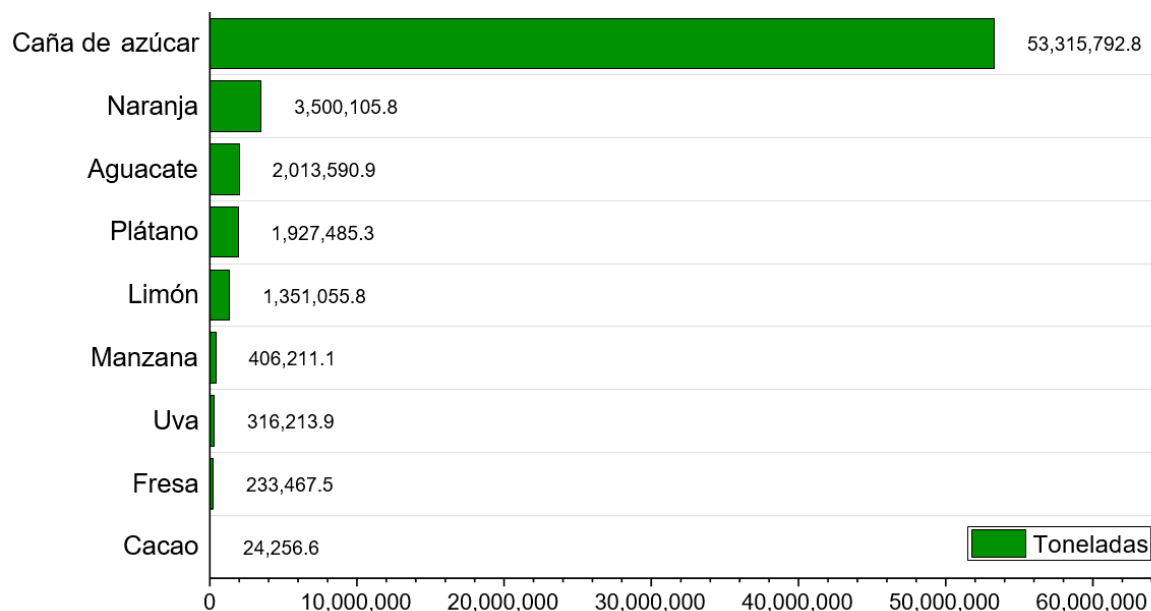


Figura 1.1 Producción por cultivo (Cultivos perennes) (CONADESUCA, 2022)

En la Figura 1.2 se muestran la superficie sembrada por cultivo en México (CONADESUCA, 2022), respecto a los cultivos perennes la caña de azúcar es el cultivo que más superficie tiene sembrada, seguido de la naranja con 443174 ha, la alfalfa con 397487.9 ha, el aguacate con 213422.1 ha y el cultivo con menos superficie es la fresa 13821.2 ha.

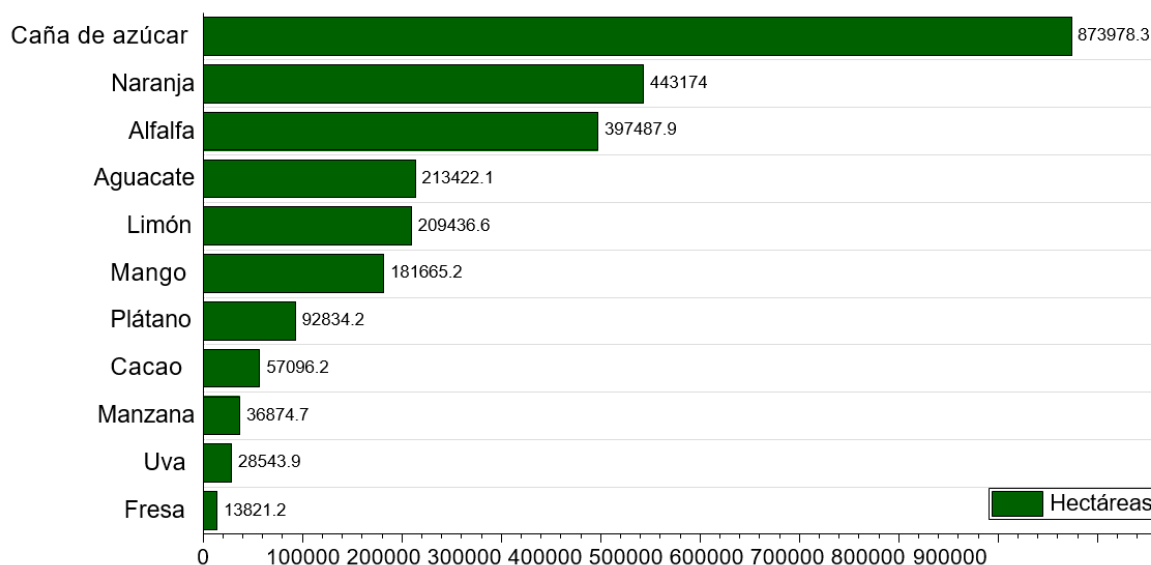


Figura 1.2 Superficie sembrada por cultivo (CONADESUCA, 2022)

1.1.1 Exportación de azúcar al mercado mundial

En enero del año 2022 México exportó azúcar al mercado mundial aproximadamente 37,485 Tm a países como la República de Georgia, Marruecos, Camerún, Benín, Hong Kong, entre otros, como se muestra en la Tabla 1.1 (CONADESUCA, 2022).

Como se aprecia en la gráfica, la industria azucarera es muy importante en nuestro país, el mes de febrero del 2022 fue el mes con mayor exportación a nivel mundial registrando 55,759 Tm exportadas, República de Georgia fue el país al que más se exportó con un total de 33,000 Tm solo en ese mes, del mes de octubre del año 2021 al mes de febrero del 2022 el total de azúcar exportado a nivel mundial fue de 125,113 Tm.

Se puede apreciar una gran demanda de exportación por lo cual es una materia prima de suma importancia para nuestro país.

Tabla 1.1 Exportación de azúcar de México al mercado mundial.

Exportación de azúcar de ingenios y otras empresas al mercado mundial (Tm)						
País	2021			2022		Total
	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	
Republica de Georgia	-	-	-	-	33,000	33,000
Marruecos	-	-	-	31,330	-	31,330
Camerún	-	2,160	3,780	3,780	3,780	13,500
Benín	270	540	2,970	1,350	5,292	10,422
Hong Kong	-	-	-	0.02	10,000	10,000
Kazajstán	-	10,000	-	-	-	10,000
Trinidad y Tobago	2,000	2,500	-	-	500	5,000
Canadá	567	183	629	485	547	2,411
Colombia	-	2,160	-	-	-	2,160
Costa de Marfil	-	-	1,620	-	270	1,890
Togo	540	1,080	-	-	-	1,620
Gambia	-	-	-	-	1,350	1,350
Madagascar	-	-	270	540	270	1,080
Jamaica	-	-	-	-	750	750
Chile	600	-	-	-	-	600
Total	3,977	18,623	9,269	37,485	55,759	125,113

1.1.2 Producción de azúcar

En México, la industria azucarera es una de las mayores del sector agroindustrial, lo ubica como el sexto país productor de caña de azúcar en el mundo (Tabla 1.2) (Güereca *et al.*, 2022).

Tabla 1.2 Principales Productores de caña de azúcar a nivel mundial (2018-2021)

País	Producción (Toneladas)
Brasil	743,450,827
India	390,305,083
China	108,067,550
Tailandia	101,830,637
Pakistán	75,803,352.5
México	56,403,397.2
Australia	31,834,781.8
Estados Unidos	30,755,605
Indonesia	30,025,000
Colombia	29,265,773

Recuperado de: Food and Agriculture Organization (FAO), 2022

El proceso de obtención del azúcar se realiza en 6 etapas como se muestra a continuación (Domínguez-Manjarrez *et al.*, 2014):

1. Preparación de la caña: la caña es transportada desde las zonas de cultivo a las fábricas y es descargada en mesas alimentadoras y se conduce hacia cuchillas rotatorias donde se cortan los tallos y se desmenuza la caña.
2. Molienda: se realiza la extracción del jugo de la caña en molinos con agua a alta temperatura.
3. Clarificación: se remueven impurezas en el jugo de caña utilizando óxido de calcio, que ayuda a neutralizar y sirve como coagulante para que se precipiten los sólidos suspendidos presentes en el jugo, en la etapa de clarificación se llevan a cabo dos etapas de calentamiento a alta temperatura.
4. Filtración: Los lodos obtenidos en la etapa de clarificación se separan del jugo clarificado mediante filtros rotativos a vacío.
5. Evaporación: el jugo clarificado contiene agua en aprox. 85 %, de esta agua el 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:** el producto obtenido se lleva a cristalización, la cual tiene lugar en evaporadores a vacío de simple efecto conocidos como “tachos”, donde la miel se evapora hasta su punto de saturación, formándose así los cristales. Finalmente se lleva a cabo la etapa de secado y envasado con sistemas de calidad.

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 emplearan para convertirlos en productos con valor agregado, se minimizaría 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).

1.2.1 Distribución de aguas residuales industriales

La distribución del consumo de agua se distribuye en seis ramas industriales: azucarera, química, petróleo, celulosa y papel, textil y bebidas lo cual corresponde aproximadamente al 80 % del consumo total. Es utilizada en un 50 % para enfriamiento, 35 % en procesos, 5 % en calderas y 10 % en servicios (Castelán, 2000). En la Figura 1.3 se observa que la agroindustria azucarera, sólo en el procesamiento de la caña cortada hace uso de la mayor cantidad de

agua en el sector industrial en México, y por consiguiente, es la que más aguas residuales descarga al ambiente, devolviendo el líquido residual a los ríos principalmente, por tanto desde el punto de vista ambiental, la gestión racional del uso de agua en la industria debe ser considerada como una parte esencial del proceso productivo (Ingaramo *et al.*, 2004).

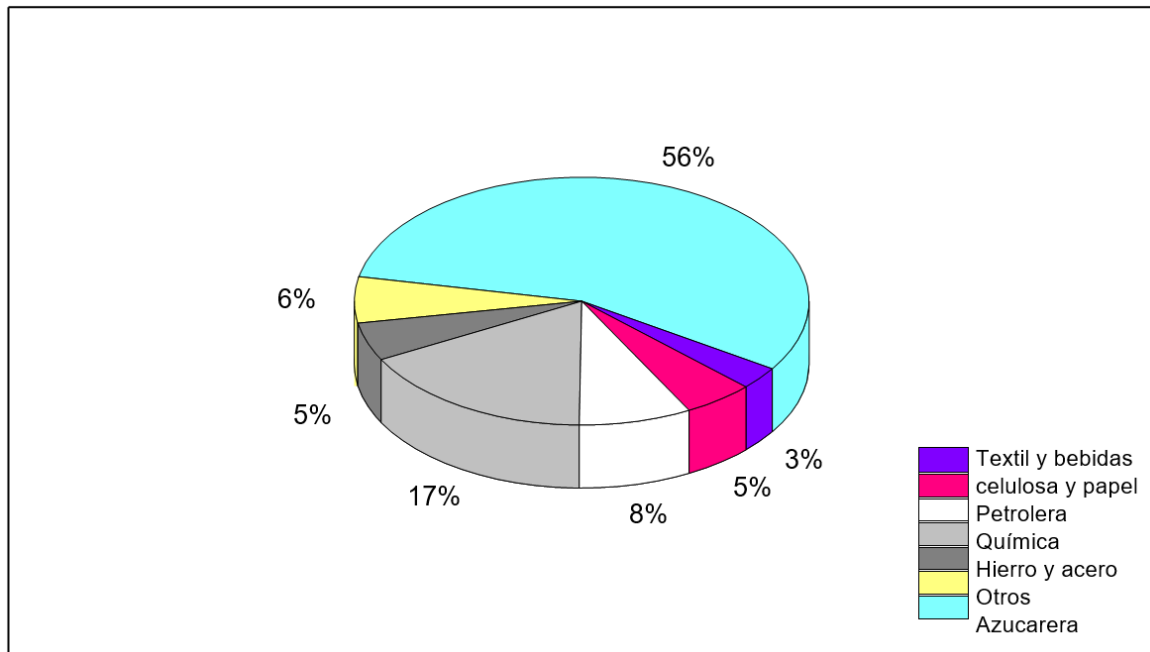


Figura 1.3 Distribución de aguas residuales industriales en México

1.2.2 Efluente 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).

En la Tabla 1.2 se muestran las características principales que se encuentran en las aguas residuales de la industria azucarera. Los datos 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).

Tabla 1.3 Características estudiadas de aguas residuales de la industria azucarera.

Características	Valores promedio de agua residual (Díaz-de los Ríos <i>et al.</i>, 2016)	Valores promedio de agua residual (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

1.3 Tratamiento de aguas residuales de la industria azucarera

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).

1.4 Digestión anaerobia

La Digestión Anaerobia (DA) es un proceso bioquímico que se lleva a cabo por la acción combinada de un grupo de varios tipos de microorganismos, que metabolizan los compuestos orgánicos en una mezcla gaseosa que consiste principalmente en metano y dióxido de carbono (biogás) en condiciones anaeróbicas. La DA es ampliamente utilizada para reducir de manera rentable el volumen de biomasa, como la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos, estiércol y biomasa lignocelulósica, y capturar energía en forma de metano

(Weiland, 2010). Las plantas de tratamiento de aguas residuales generan una gran cantidad de lodo, que es costoso de incinerar. Sin embargo, la digestión anaerobia reduce significativamente los costos de tratamiento de lodos mientras reduce efectivamente su volumen y recupera energía renovable en forma de biogás (Uçkun-Kiran *et al.*, 2016).

El metano obtenido del biogás generalmente se mejora y es enviado a una red de gas natural. También se puede utilizar directamente para la producción de electricidad, calor y combustible. El digestato final se utiliza como un acondicionador de suelo y fertilizante. La digestión anaerobia también brinda importantes beneficios ambientales, como el control de patógenos a través del saneamiento, la prevención de la putrefacción y acidificación de la biomasa, la reducción de la contaminación del aire y del agua y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero al estabilizar y controlar la biomasa residual (Cuéllar y Webber, 2008).

Por lo tanto, el interés en las aplicaciones de la DA aumenta en muchos países y está respaldado por la legislación, particularmente en la Unión Europea. Se estima que al menos el 25 % de la bioenergía se derivará del biogás en la Unión Europea para 2020 (Holm-Nielsen y Oleskowicz-Popiel, 2008). Por ejemplo, la producción de electricidad a partir de biogás pasaría de 25,2 TWh en 2009 a 63,3 TWh en 2020 en la Unión Europea. En China, la construcción de plantas de biogás cuenta con el apoyo del gobierno y la producción de biogás aumentó drásticamente de 10 500 millones de m³ a 248 000 millones de m³ (anualmente) entre 2007 y 2010 (Deng *et al.*, 2014; Wellinger, 2011).

También hay un interés en la investigación de la DA para mejorar la eficiencia del proceso. La mayoría de los investigadores estudian la optimización de parámetros del proceso, el diseño del digestor y los tipos de sustrato (Morita y Sasaki, 2012; Palatsi *et al.*, 2009; Parawira *et al.*, 2005). Desafortunadamente, los microorganismos en la digestión anaerobia son sensibles a las variaciones en los parámetros del proceso, como la temperatura, el pH, los tipos de sustrato e inóculo, la proporción de carga orgánica, etc. Por lo tanto, el proceso debe monitorearse y controlarse adecuadamente para evitar cualquier inestabilidad.

El monitoreo en línea de los parámetros del proceso, en particular los intermediarios metabólicos, como los AGV y el amoníaco libre, es muy importante para comprender lo que sucede en el digestor y detectar cualquier inestabilidad futura en una planta de biogás y prevenirla (Bernhard, 2013). Las características de la materia prima también son muy importantes, algunas materias primas son difíciles de manejar mientras que otras inhiben la DA. El pretratamiento de la materia prima para hacerla más manejable y/o su codigestión con otras materias primas para tener un medio bien balanceado son las principales estrategias para superar cualquier desafío relacionado con las materias primas (El-Mashad y Zhang, 2010; Zheng *et al.*, 2011, 2014).

1.5 Bioconversión

La bioconversión, también conocida como biotransformación, es la conversión de materiales orgánicos, como desechos vegetales o animales, en productos utilizables o fuentes de energía mediante procesos o agentes biológicos, como ciertos microorganismos. Un ejemplo de bioconversión es la conversión de materiales orgánicos, como desechos vegetales o animales, en productos utilizables o fuentes de energía mediante procesos o agentes biológicos, como ciertos microorganismos, algunos detritívoros o enzimas.

El bioprocesamiento combina las disciplinas de ingeniería química, microbiología y bioquímica. Los nuevos procesos de conversión de etanol celulósico han permitido que la variedad y el volumen de materia prima que se puede bioconvertir se expanda rápidamente. La materia prima ahora incluye materiales derivados de desechos vegetales o animales, como papel, llantas, telas, materiales de construcción, desechos sólidos municipales (RSU), lodos, aguas residuales, etc. (Diener, 2009).

1.5.1 Biogás

El biogás es un gas que se genera en medios naturales o en dispositivos

específicos, por las reacciones de biodegradación de materia orgánica, mediante la acción de microorganismos (bacterias metanogénicas, etc.), y otros factores, en ausencia de oxígeno (esto es, en un ambiente anaeróbico). El producto resultante es una mezcla constituida por metano (CH_4) en una proporción que oscila entre un 40 a un 70 % y dióxido de carbono (CO_2), conteniendo pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S).

La producción de biogás por descomposición anaeróbica es en cierto modo considerado útil para tratar residuos biodegradables ya que produce un combustible de valor además de generar un efluente que puede aplicarse como acondicionador de suelo o abono genérico. Este gas se puede utilizar para producir energía eléctrica mediante turbinas o plantas generadoras de gas, o para generar calor en hornos, estufas, secadoras, calderas u otros sistemas de combustión a gas, debidamente adaptadas para tal efecto

1.6 Reactores anaerobios de biopelícula

El tratamiento anaerobio tiene varias ventajas en comparación con el tratamiento aerobio, como bajos costos de capital y operación, menos necesidad de energía, menos producción de lodo, diseño y operación más simples y la conversión de materia orgánica a biogás y bioenergía (Arvin *et al.*, 2019).

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).

1.7 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).

Los elementos más importantes de los humedales son el agua, el suelo o sustrato, y las comunidades biológicas (Mitsch y Gosselink. 2007), siendo el agua el principal elemento que controla la vida vegetal y animal relacionada

con el ecosistema.

1.7.1 Beneficios de los humedales

Los beneficios de los humedales comprenden una gran variedad de bienes, servicios, usos y funciones de valor para la sociedad, la flora y fauna silvestre y para el mantenimiento de sistemas y procesos naturales.

La conservación, la recuperación y el manejo sostenible de los ecosistemas de humedal son prioritarios por varias razones:

- Por su alta importancia biológica, definida por la riqueza y diversidad de especies, la productividad, la presencia de fenómenos biológicos y hábitats únicos de fauna y flora con diversos grados de amenaza (Ortiz et ál., 2005).
- Por su importancia socioeconómica al dotar de líquido vital a muchos acueductos rurales y municipales, por ser fuente de recursos pesqueros y forestales y de generación de ingresos a comunidades asentadas en los alrededores, principalmente pescadores. Los ecosistemas de humedal son, en primer lugar, sistemas naturales de soporte vital, y base de actividades productivas y socioculturales basadas en el uso de muchas especies animales y vegetales como economías extractivas.

1.7.2 Humedales contruidos

Los humedales contruidos son sistemas que han sido diseñados para el tratamiento de aguas residuales mediante procesos naturales, 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 contruido 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 contruidos 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.

1.8 Clasificación de humedales construidos

1.8.1 Humedales construidos de flujo superficial

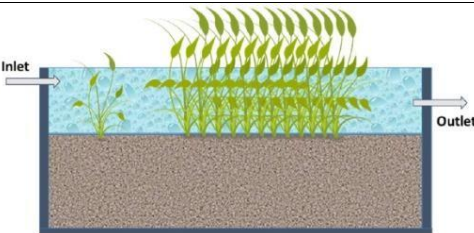
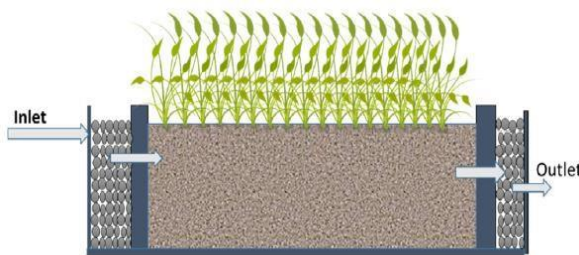
Los humedales de flujo superficial son similares a los humedales naturales, con un flujo superficial de aguas residuales sobre un sustrato de suelo saturado (Wu *et al.*, 2015). Son cuencas poco profundas con agua en la superficie, los procesos de tratamiento se producen a través de complejas interacciones 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).

1.8.2 Humedales construidos de flujo subsuperficial

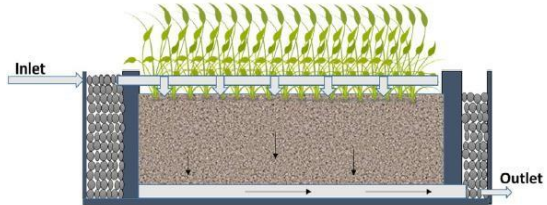
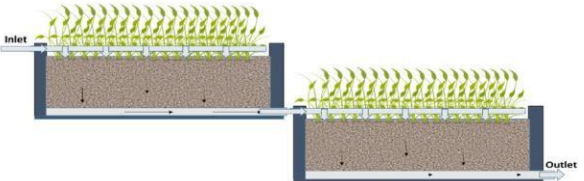
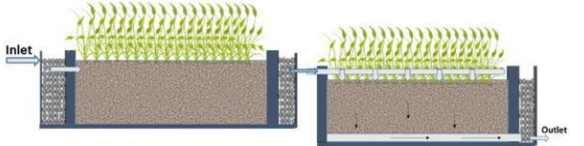
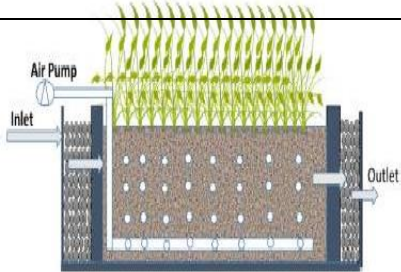
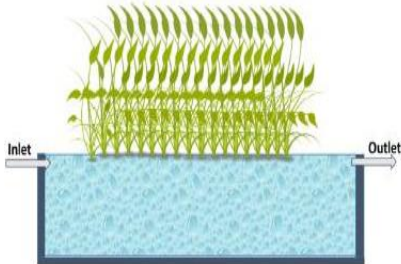
Emplean principalmente grava como los principales medios para apoyar el crecimiento de las plantas; las aguas residuales fluyen vertical u horizontalmente a través del sustrato, donde entran en contacto con microorganismos, que viven en las superficies de las raíces de las plantas y el sustrato (Saeed *et al.*, 2012).

Los humedales construidos 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 *et al.*, 2012) (Tabla 1.3) (Tabla 1.4) (Tabla 1.5).

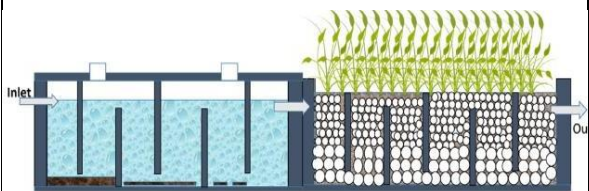
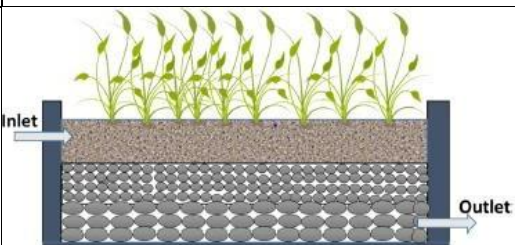
Tabla 1.4 Clasificación de humedales construidos.

Clasificación	Descripción	Referencias	Figuras
Humedal artificial de superficie de agua libre	Es un humedal natural en el que las aguas residuales fluyen sobre la superficie.	Saba <i>et al.</i> (2014)	
Humedal construido de flujo horizontal (HFCW).	También conocido como sistema de lecho de juncos. Las aguas residuales fluyen horizontalmente en el lecho del humedal.	Saeed <i>et al.</i> (2012)	

Continuación Tabla 1.3

Clasificación	Descripción	Referencias	Figuras
Humedal construido de flujo vertical (VFCW).	Humedal en el que las aguas residuales se alimentan desde la parte superior y se drenan por la parte inferior.	Saeed <i>et al.</i> (2012)	
Humedal construido vertical francés.	Es un humedal construido de flujo vertical de dos etapas dispuesto de manera paralela y funciona en serie.	Saeed <i>et al.</i> (2018)	
Humedal construido híbrido.	Es un sistema que tiene una etapa de tratamiento múltiple, lo que significa una combinación de HFCW y VFCW.	Saeed <i>et al.</i> (2012)	
Humedal construido aireado.	La eficiencia del humedal construido se mejora mediante el uso de aireadores en el humedal.	(Sánchez-Monedero <i>et al.</i> , 2008).	
Humedal construido Multi-trópico de flujo libre.	Utiliza plantas acuáticas flotantes que producen más biomasa que puede usarse como combustible, fertilizante o alimento para animales.	Kanani and Patel (2017)	

Continuación Tabla 1.3

Clasificación	Descripción	Referencias	Figuras
Tecnología Phytorid	Diseñada y patentada por el Instituto Nacional de Investigación en Ingeniería Ambiental (NEERI), Nagpur. Tiene tres unidades independientes, es decir, la unidad de filtrado avanzado (AFC), la celda de tratamiento de fitóridos (PTC) y la celda de recolección final (FCC). (Biswas et al., 2020).	Balpande & Mhaske (2017)	
Tecnología biológica del suelo	SBT es un sistema aeróbico único que incluye procesos físicos, químicos y biológicos.	Kanani & Patel (2017)	

1.9 Plantas ornamentales utilizadas en humedales construidos

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

- Promover el asentamiento y la retención de sólidos en suspensión.
- Proporcionar superficie para el desarrollo de biopelículas microbianas.
- 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.

1.9.1 *Spathiphyllum Willisii*.

El género *Spathiphyllum* comprende 50 especies, de las cuales, 47 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). Es una planta epífita (termino atribuido a cualquier planta que crece sobre otro vegetal u objeto usándolo solamente como soporte, pero que no lo parasita nutricionalmente); su tallo puede llegar a 10 cm de largo, 2 cm de diámetro; tiene raíces moderadamente numerosas, descendentes, de color gris verdoso, prominentemente pubescentes, gradualmente ahusadas y alargadas, de 3-5 mm de diámetro; flores de 1.8 a 2.2 mm de largo, de 1 a 1.2 mm de ancho, los lados sigmoides de lisos a dentados; 7-12 flores visibles en espiral principal, pistilos algo emergentes, mate, amarillo pálido, polen de color amarillo pálido que se desvanece a blanco cremoso (Royal Botanic Gardens, Kew. 2022).

1.9.2 *Canna Indica* L.

Son plantas de rizoma corto y robusto que pueden alcanzar los 3 m de altura como se observa en la Figura 1.4 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). Su morfología en su hábitat es de hasta 2 m de altura, la morfología de sus hojas es elíptica, agudas; de 45 cm de largo (Royal Botanic Gardens, Kew. 2022).



Figura 1.4 *Canna Indica* L. (Royal Botanic Gardens, Kew. 2022).

1.9.3 *Typha Latifolia* L.

Son plantas de pantano perennes y robustas con rizomas ramificados simpodiales cubiertos por catafilos dísticos y que tienen brotes erectos terminales con hojas inferiores transicionales, de hoja corta; hojas superiores con una vaina larga que envuelve estrechamente el tallo, a menudo con aurículas en la unión con la lámina, y una lámina lineal obtusa o aguda que se ensancha gradualmente desde una base subpeciolar angosta, de sección semicilíndrica a lenticular, a veces aquillada debajo. 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 (Figura 1.5) (Vymazal, 2011).



Figura 1.5 *Typha Latifolia* L. (Royal botanic Gardens, kew. 2022).

1.10 Sistema híbrido de tratamiento a nivel planta piloto

El sistema híbrido de tratamiento se encuentra en las instalaciones del TecNM / Instituto Tecnológico de Orizaba, a continuación, se describen el reactor de película anaerobio y el humedal construido.

El RBA está construido en fibra de vidrio con resina epóxica, está conformado en su interior de un material de soporte a base 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, el reactor tiene una altura de 50 cm, tiene un volumen total de 70 L y un volumen útil de 50 L.

El humedal construido consta de tres celdas construidas de acrílico las cuales fueron instaladas con una configuración en paralelo. se utilizaron las especies *Canna Indica* L., *Spathiphyllum Willisii* y *Typha Latifolia* L.

1.11 Antecedentes

Tilak *et al.*, (2016) estudiaron la eficiencia del tratamiento de aguas residuales domésticas mediante dos humedales construidos de flujo subterráneo bajo diferentes tasas de carga hidráulica. Los resultados mostraron que la demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales, nitrógeno y eliminación total de fosfato en el primer y segundo humedal durante un período de tres meses promedió 42 %, 74 %, 39 % y 41 % y 34 %, 82 %, 14 % y 35 % respectivamente. Ambos humedales mostraron tasas similares de eliminación de sólidos suspendidos totales independientemente del tipo de especies de plantas de humedales. Durante el período de tres meses, la DQO promedio, el nitrógeno total y las remociones de fosfato fueron mayores en el primer humedal en comparación con el segundo humedal, estos resultados confirman la eficacia de los humedales construidos de flujo subterráneo para mejorar la calidad de las aguas residuales domésticas en comunidades rurales de países en desarrollo como la India.

Kanani *et al.*, (2017) utilizaron suelo aluvial, lombrices de tierra *Eisenia foetida* y planta de aloe vera para tratar las aguas residuales domésticas de la aldea de Shertha, Gandhinagar, India. Los análisis de las aguas residuales domésticas y el agua tratada se realizaron mediante los métodos IS: 3025. El agua tratada por la planta de biotecnología de suelo cumple con las normas de descarga del tablero de control de contaminación. Los resultados muestran que la biotecnología del suelo logra un buen desempeño en la remoción de impurezas. El tratamiento fue rentable, sin olores, muy simple de operar y mantener, no requiere mano de obra calificada, bajo requisito de energía. El agua tratada a través de la biotecnología de suelo se puede utilizar para riego, recarga de agua subterránea, procesos industriales, jardinería, lavado, construcción, lavado de carreteras / autos, etc.

Mishra *et al.*, (2018) realizaron un estudio para tratar aguas residuales primarias y secundarias para reutilizarlas en actividades de riego, enriquecimiento de suelos y acuicultura. El estudio consistió en el tratamiento de estas aguas residuales a través de un lecho filtrante de grava horizontal alimentado por gravedad subsuperficial con un área de 35 m². Los humedales construidos por gravedad y los sistemas de desinfección impulsados por energía solar fueron evaluados por su capacidad de tratamiento para diversos parámetros fisicoquímicos y biológicos. El humedal eliminó el 84 % del nitrato (NO³⁻) y el 77 % del fosfato (PO⁴³⁻). La demanda biológica de oxígeno a cinco días se redujo de 48 mg/L a 10 mg/L de las aguas residuales tratadas secundariamente. El humedal fue capaz de eliminar el 65-70 % de las bacterias en las aguas residuales, mientras que el sistema de desinfección AO eliminó el contenido bacteriano por debajo del límite de detección. La implantación de los sistemas proporcionará una opción adecuada para el tratamiento de aguas residuales de una forma muy económica y sostenible. Se descubrió que el agua finalmente tratada se desinfectaba a niveles que permiten una reutilización segura en aplicaciones de agua de proceso. Se encontró que parámetros como DBO₅, DQO, TDS, acidez y alcalinidad son adecuados para cualquier uso, como riego, enriquecimiento del suelo, servicios de acuicultura, fines de limpieza y aplicaciones de proceso. La solución propuesta ha demostrado ser viable para el tratamiento de aguas residuales en regiones remotas, especialmente cuando la disponibilidad de energía es una fuente limitante, como suele ser el caso en las zonas rurales de la India.

Yazdani *et al.*, (2019) realizaron un estudio aplicando aguas residuales de lácteos empleando tres humedales artificiales con flujo vertical descendente. En donde el primer lecho permaneció sin plantar como un control o blanco, mientras que los lechos 2 y 3 se sembraron carrizos (*Phragmites australis*) y juncos (*Juncaceae spp.*), respectivamente. Las aguas residuales de los productos lácteos se cargaron en lechos en régimen saturado realizando un muestreo diario. Se alcanzó una reducción de 67.62 %, 93.62 % y 92.33 % en la Demanda Química de Oxígeno, y 78.50 %, 86.04 % y 84.18 % en sólidos suspendidos totales para los lechos número 1, 2 y 3, respectivamente. Además, la turbidez disminuyó de 246 a 74,7 NTU, 51,8 y 40,7 con una eficiencia de 69.63 %, 78.94 % y 83.46 % para los lechos

número 1, 2 y 3, respectivamente. El pH inicial fue 7.83 y disminuyó a 6.86 para el lecho número 1 y aumentó a valor alcalino, ya que el pH final fue 8.45 y 8.71 para el lecho 2 y el lecho 3, este rango de pH es el rango óptimo para el proceso de remoción de nitrógeno para ambos humedales artificiales plantados. Este método proporciona un tratamiento eficaz y rentable, también demostró el importante papel de las plantas en los humedales artificiales.

Orduña, (2018) diseñó, construyó y operó un humedal artificial (HA) con monocultivo y policultivo de la especie *Hippeastrum* y *Spathiphyllum* para la evaluar la eficiencia de remoción de materia orgánica, eliminación de patógenos y nutrientes en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Orizaba, Veracruz, México, con residuos obtenidos del Mercado Emiliano Zapata en la misma ciudad, los cuales consistieron principalmente de frutas y verduras. Se obtuvo la fracción líquida mediante un pretratamiento y posteriormente se alimentó a un sistema de Digestión Anaerobia en dos etapas para posteriormente alimentar el efluente a las celdas de HA. 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, sin embargo, fue necesaria una dilución debido a la alta carga orgánica promedio de 20 gDQO/L y pH de 6.5-7, siendo que estos sistemas resisten cargas de 4 gDQO/L (Pelissari *et al.*, 2017). Por lo tanto, se alimentó con cargas de 1 a 8 gDQO/L con tiempos de residencia hidráulica de 3 días, con una carga volumétrica aplicada de 2.6181 gDQO/L, excediendo así el doble de la carga registrada en la bibliografía. De acuerdo con los datos anteriores, son posibles los tratamientos secundarios, que complementan la degradación de materia orgánica en aguas residuales obteniendo remociones de hasta 95% para DQO y hasta un 90% para sólidos totales y volátiles, excediendo el doble de la cantidad presentada en otros estudios.

Sandoval *et al.*, (2019) realizaron una evaluación del tratamiento de aguas residuales por microcosmos de humedales subterráneos verticales en zonas parcialmente saturadas con plantas ornamentales, lleno de sustratos minerales y plásticos de humedales con condiciones parcialmente saturadas, los desechos de PET son una forma potencialmente válida de medio de sustrato que funciona de manera similar al PRS, un material más común utilizado en AQ. Las plantas se adaptaron fácilmente en

sustrato PET y los porcentajes de remoción de contaminantes fueron similares a los detectados en medio PRS. Se demostró que el uso de *Anthurium sp.*, *Zantedeschia aethiopica* y *Spathiphyllum wallisii* en los sistemas de tratamiento aumenta la eficiencia de remoción de los sistemas hasta en un 30% en los principales parámetros evaluados, en comparación con unidades sin plantas, al tiempo que proporciona un valor estético a los sistemas, permitiendo así su inserción en paisajes de una manera estéticamente agradable. Además, la producción de flores comerciales permitiría compensar los trabajos de mantenimiento con un incentivo económico a los cuidadores y manipuladores de los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Adicionalmente, el agua tratada podría ser utilizada para espacios verdes y agricultura, ya que este efluente cumple con los parámetros de calidad que se consideran aceptables para estos fines, la funcionalidad del PET como material de sustrato puede indicar la posibilidad de una reducción significativa de costos si se implementa en lugar de utilizar otros materiales que requieren mayores costos de inversión. (hasta un 80 % menos). También puede representar una contribución considerable a la reducción del impacto del PET en el medio ambiente. Por lo tanto, al considerar los beneficios potenciales tanto del uso de sustratos de PET como de la producción de flores en humedales artificiales, se debe considerar el uso de PET y especies ornamentales en los diseños futuros de ingeniería paisajística que trate las aguas residuales municipales.

Solano de la Cruz et al., (2020) realizaron un tratamiento a un efluente azucarero por medio de un sistema híbrido en dos etapas de tratamiento. La primera etapa consistió en un Reactor de Biopelícula Anaerobio (RBA) en donde se llevó 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 Indica* L., *Spathiphyllum Willisii* y *Typha Latifolia* L. 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 %.

Lo consultado en la literatura demuestra que los humedales artificiales en sus diferentes aplicaciones y tecnologías tienen niveles de remoción de materia orgánica aceptables a las normativas vigentes para cada caso de estudio, en donde los criterios de diseño, evaluación y aplicación dependieron de la región, los recursos disponibles y el tipo de efluente a tratar. Se ha demostrado que para efluentes domésticos, industriales o lácteos los humedales son eficaces, por lo que, al ser aplicado a un efluente azucarero, se espera una remoción eficiente de contaminantes una vez tratado.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y

MÉTODOS

2.1 Descripción de la metodología

En este capítulo se describen los procedimientos para la realización del proyecto, la Figura 2.1 es un diagrama de los procedimientos a seguir.

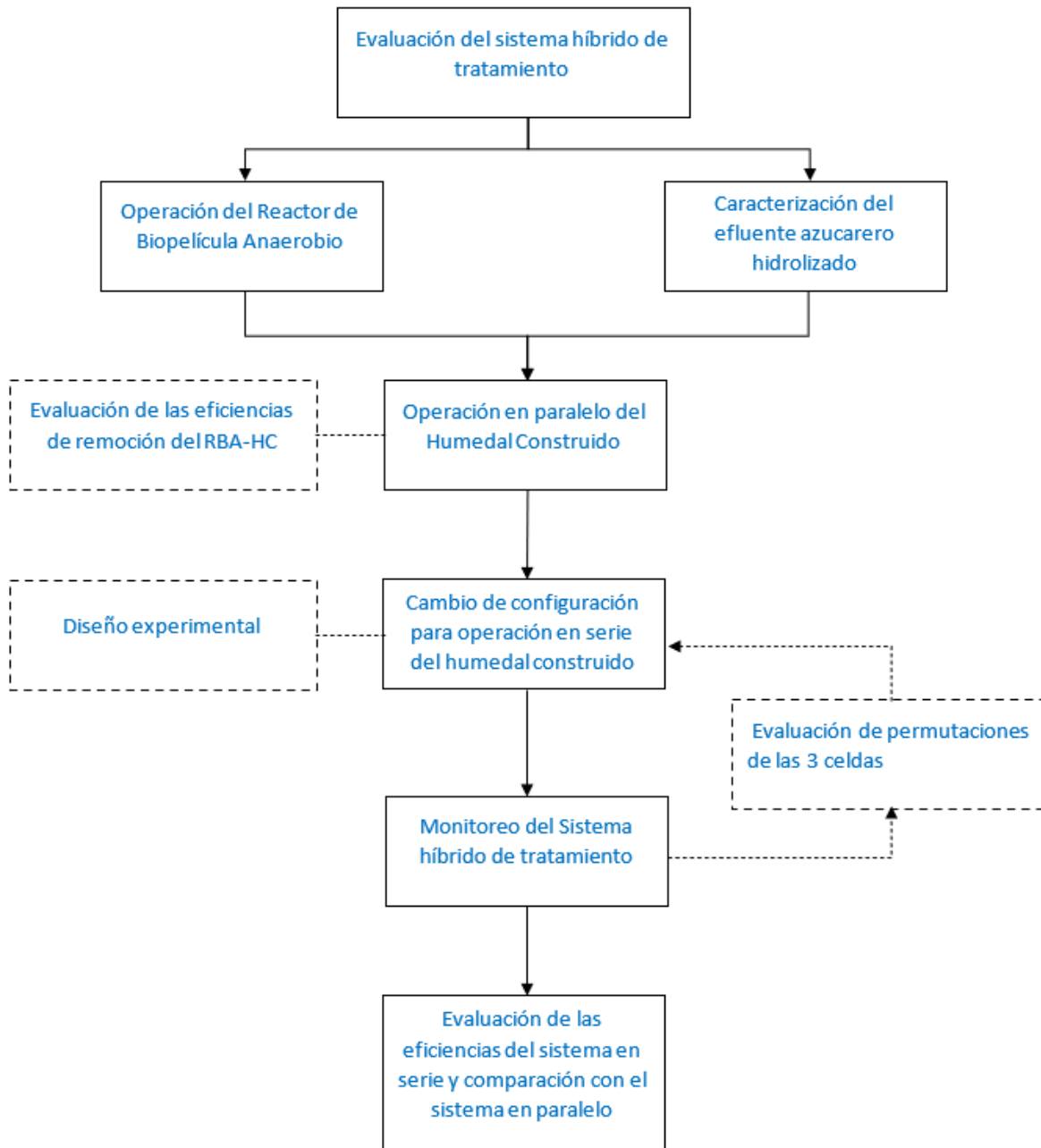


Figura 2.1 Metodología del proyecto.

2.2 Evaluación del sistema híbrido de tratamiento

Se recolectó el efluente de la industria azucarera en recipientes de plástico con tapa con capacidad de 20 L a temperatura ambiente, se transportó al Laboratorio de Ingeniería Ambiental I y se mantuvo en refrigeración a 4 °C. Se realizó la caracterización del efluente, determinando los siguientes parámetros DQO_T, DQO_S, STV, ST, Fósforo y Nitratos (Tabla 2.1), Temperatura y pH. Este efluente se alimentó al Reactor de Biopelícula Anaerobio donde se realizará la hidrólisis.

Tabla 2.0.1 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
Nitratos NO ₃ ⁻	g/L	Método de reducción de cadmio Standard Methods
Fosfatos PO ₄ ³⁻	mg/L	Método de aminoácidos Standard Methods

2.3 Caracterización del efluente azucarero hidrolizado

A la salida del Reactor de Biopelícula Anaerobio se tendrá el efluente azucarero hidrolizado, a este efluente también se realizaron las siguientes determinaciones: caracterización del efluente, determinando los siguientes parámetros DQO_T, DQO_S, STV, SV, Fosfatos, Nitratos, Temperatura y pH (Tabla 2.1) e Intensidad Lumínica; empleadas en laboratorio para la operación y monitoreo del sistema híbrido.

Determinación de DQO_T y DQO_S

La determinación de DQO total (DQO_T) y soluble se efectuó mediante el método colorimétrico 5220 de los *Standard Methods* donde se calcula el porcentaje de remoción como lo marca la ecuación 2.1 con ayuda del espectrofotómetro marca HACH MOD. DR/2500 que se muestra en la Figura 2.2.

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

Determinación de ST y STV

Se determinaron los Sólidos Totales (ST) y Sólidos Totales Volátiles (STV) por el método gravimétrico de acuerdo con la Norma NMX-AA-034-SCFI-2001, empleando la mufla MARLA y la estufa RIOSA como se puede observar en las figuras 2.2 y 2.3. El porcentaje de remoción de ST se calculó con la ecuación 2.2 y los STV con la ecuación 2.3.

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

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

Determinación de pH

Se determinó el pH empleando un potenciómetro OAKTON pH 700 mostrado en la Figura 2.5 para las muestras de la Entrada del Reactor de Biopelícula Anaerobio (RBA_E), Salida del Reactor de Biopelícula Anaerobio (RBA_S), Entrada del Humedal Construido (HC_E), Celda 1 (C₁), Celda 2 (C₂) y Celda 3 (C₃) con el fin de conocer las condiciones de operación actuales y normales del sistema.

Determinación de Nitratos

Los nitratos son medidos por ultravioleta a una longitud de onda de 220 nm, en un espectrómetro marca HACH MOD. DR/2500 mediante el método colorimétrico 4500 de los *Standard Methods*. Está dirigido fundamentalmente para verificar el cumplimiento de la legislación vigente para aguas de consumo humano y uso doméstico. Las interferencias más comunes se deben a la turbiedad y a la materia orgánica; pueden atenuarse mediante filtración o centrifugación.

Determinación de Fosfatos

Se determinaron los fosfatos en las muestras por medio de un colorímetro portátil de mano para fosfato intervalo alto, mostrado en la Figura 2.6, marca Checker®HC MOD. HI 717 de acuerdo con los *Standard Methods*. Cuenta con un intervalo de 0.0 a 30.0 ppm (mg/L), una resolución de 0.1 ppm y ± 1.0 ppm (mg/L) ± 5 % de precisión de lectura. Con fuente de luz LED de 525 nm y fotocelda de silicio. El fosfato es importante para el crecimiento y desarrollo de las raíces de las plantas. Sin embargo, las altas concentraciones de fosfato son perjudiciales para el medio ambiente. Por esta razón, es objeto de una estricta vigilancia en las aguas naturales y municipales.

2.3.1 Intensidad Lumínica

Se midió la intensidad lumínica con un medidor digital de luminosidad (Luxómetro) marca STEREN con un sensor a foto diodo de silicio con filtro como detector óptico, para conocer la cantidad de luz percibida por las especies vegetales con la finalidad de analizar el área más favorable para la reubicación de las celdas del HC.

Conocer la cantidad de luz es importante, ya que las plantas usan parte de la energía radiante que emite el sol para la fotosíntesis. Los niveles de luz afectan directamente a la transpiración, la absorción de agua, el florecimiento, la germinación, el crecimiento intermodal, etc. dentro de la planta.

2.3.2 Carga Volumétrica Aplicada (Cva)

La Cva se controló mediante los datos de volumen útil del reactor, volumen de alimentación y concentración del sustrato alimentado por medio de su DQO como se muestra en la ecuación 2.4. Es indispensable conocer este valor para poder realizar los cálculos de la relación sustrato-agua a alimentar y de este modo mantener constante la concentración de entrada a los humedales para no provocar la muerte de las plantas ornamentales o las colonias formadas.

$$CVA = \frac{\text{Volumen de alimentación } \left(\frac{L}{d}\right) * DQO_T \left(\frac{g}{L}\right)}{\text{Volumen util (L)}} = \frac{gDQO_T}{L} * d \quad (2.4)$$

2.3.3 Tiempo de Retención 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) en las celdas de HC. Este se calculó mediante la ecuación 2.5.

$$TRH = \frac{\text{Volumen útil (L)}}{\text{Volumen de alimentación } \left(\frac{L}{d}\right)} = d \quad (2.5)$$

2.4 Operación del sistema de tratamiento

El Sistema de Tratamiento Híbrido (STH) consta de dos etapas:

La etapa uno consta de un reactor alimentado por lotes, construido de fibra de vidrio con resina epóxica y pintura antirreflejante, el cual está compuesto en su interior de cuatro paneles de aluminio con fibras de nylon polyester como soporte para favorecer el desarrollo de la biopelícula bacteriana en el material poroso.

Dicho reactor se encuentra en una base de metal ptr, a la altura de 1.1 m con la finalidad de disponer correctamente las válvulas de alimentación, toma de muestras y recirculación, así como la bomba peristáltica de recirculación.

La etapa dos la conforman tres celdas de acrílico reforzado, con dimensiones de 1.20

m de largo, 0.45 m de ancho y 0.60 m de altura. Como soporte se emplea piedra de río, trozos de polietileno, pet reciclado y tezontle tamaño medio. Las celdas se encuentran elevadas para evitar inundaciones por escorrentías, así como plagas entomológicas y roedores. En la C₁ se encuentran seis ejemplares de *Canna Indica*, planta que necesita una cantidad de luz solar unas pocas horas al día, preferentemente en semisombra. Algunas personas la mantienen a plena luz del sol, pero solo en aquellos lugares donde el clima es templado como Orizaba con un rango de temperatura de 18 a 22 °C.

La C₂ cuenta con 6 ejemplares de *Spathiphyllum Willisii*, a esta planta hay que darle una humedad alta y una temperatura constante de entre 18 y 25°C, evitando que el sustrato se seque con riego abundante y de ser posible, una buena cantidad de luz. Mientras que la C₃ tiene 6 *Typha Latifolia* L, las cuales crecen como plantas emergentes en áreas templadas subtropicales y tropicales en todos los continentes, en regiones pantanosas, estanques y acequias. Suelen ser de las primeras especies en colonizarlos y florece de mediados a fines del verano.

Dichas celdas son alimentadas por un tanque de alimentación con un volumen total de 450 L y un volumen útil de 300 L, siendo 100 L el volumen útil por celda. Este sistema de tratamiento de aguas residuales simula a un humedal real de flujo subsuperficial con alimentación vertical por goteo, es por ello que cuenta con una tubería en forma de “S” dispuesta al final de cada celda, la cual conecta a un recipiente recolector del efluente con un volumen de 100 L, este recipiente tiene una tapa sellada para la toma de muestra del efluente a la salida del tratamiento.

El STH se presenta con su vista superior y lateral en la Figura 2.8 y 2.9 conformando la disposición inicial del reactor de biopelícula anaerobio con la mesa para la bomba peristáltica y el recolector de biogás, el tanque de alimentación, las 3 celdas y los tanques de recolección del agua tratada.

2.4.1 Operación del Reactor de Biopelícula Anaerobio

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, el reactor tiene una altura de 50 cm, tiene un volumen total de 70 L y un volumen útil de 50 L como se muestra en la Figura 2.2.



Figura 2.2 Reactor de biopelícula anaerobio

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, se continuará operando el RBA con la misma concentración en el efluente de alimentación.

2.4.2 Operación en paralelo del humedal construido

El humedal construido consta de tres celdas construidas en acrílico, las cuales fueron instaladas con una configuración en paralelo (como se muestra en la Figura 2.3). Se utilizaron las especies *Canna Indica L.*, *Spathiphyllum Willisii* y *Typha Latifolia L.*

El humedal se operará durante 30 días con la configuración en paralelo para estudiar su comportamiento.

2.4.3 Cambio de configuración para operación en serie del HC

Con base al diseño anteriormente empleado y con los resultados de remoción de

contaminantes, se realizarán 6 permutaciones de diseño de múltiples comparaciones sin control (esto debido a que no se tendrá una celda de control), la variable de respuesta será el porcentaje de remoción y se mantendrá constante el flujo de alimentación, la concentración del sustrato y el tiempo de residencia hidráulica.

2.4.4 Monitoreo del sistema de híbrido de tratamiento

Para observar el comportamiento se realizarán pruebas de DQO_T , DQO_s , ST, STV y pH diarios. El tratamiento se 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 segundo tratamiento en el humedal, se realizarán las mismas determinaciones a la salida de cada permutación.

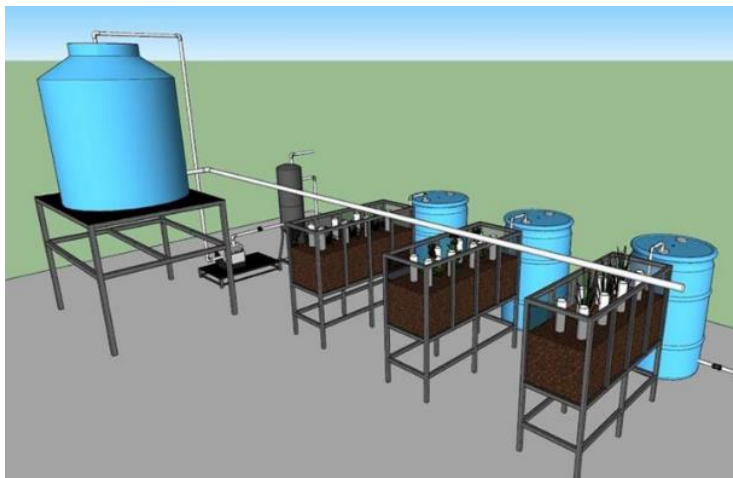


Figura 2.3 Celdas y línea de alimentación

2.5 Evaluación de las eficiencias del sistema en serie y en paralelo

Con los resultados obtenidos en trabajos previos y los resultados que se observarán en esta tesis durante los 60 días de operación del sistema híbrido con el humedal en paralelo se compararán con cada una de las 6 permutaciones que se van a estudiar.

Adaptación y supervivencia de las plantas

Las plantas supervivientes fueron monitoreadas visualmente cada mes, todas las plantas fueron numeradas para tener el control de su supervivencia y a la descendencia de las plantas a las que se les asignó una nueva numeración mes tras mes para dar un

seguimiento adecuado a su desarrollo, así como su producción de flores. Como control los mismos parámetros fueron medidos en 3 plantas de la misma edad de madurez plantadas en suelo de su estado natural plantadas en las mismas características iniciales de tamaño que las que están en los HC y el mismo tiempo de monitoreo que fue usado.

Medidas del desarrollo de las plantas

El desarrollo de las plantas fue medido durante los seis meses usando una cinta métrica para medir, grabando el 100 % de la maduración y a los nuevos especímenes de cada especie, se midió altura, largo de la hoja, número de hojas, ancho de las hojas y toda esta información fue procesada para obtener promedios y establecer futuros volúmenes de biomasa no destructivos. Como control los mismos parámetros fueron medidos en 3 plantas de la misma edad de madurez plantadas en suelo en su estado natural con las mismas características que aquellas que empezaron en los HC en términos de tamaño y tiempo de monitoreo.

Medidas de Biomasa Destructiva

Tres plantas maduras de *Typha latifolia* L., *Canna Indica* L. y *Spathiphyllum Willisii* respectivamente fueron sacrificadas para determinar el área y subsuelo de biomasa se tuvo que separar la planta de su raíz y lavándola con agua fresca para remover la presencia de sólidos en la raíz que podría interferir con los resultados de biomasa. Fueron inmediatamente colocadas en un horno a 100 °C por 72 h para tener un peso constante para calcular la biomasa. Las plantas fueron pesadas en una balanza digital analítica de gran precisión. Subsecuentemente los resultados de ambos sobre suelo y subsuelo fueron resumidos, los resultados de los individuos de cada especie de planta fueron promediados para calcular el promedio de 1 g de biomasa al tamaño de la planta.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Obtención del agua residual de la industria azucarera

El Agua Residual de la Industria Azucarera (ARIA) se recolectó de 3 distintos ingenios azucareros se muestreo el Rio la Antigua ubicado en la ciudad de Cardel, el Rio Manzinga ubicado en Amatlán y por último en el Rio Cuautlapan de la región de las altas montañas.

3.2 Caracterización del efluente azucarero hidrolizado

El agua residual del ingenio azucarero se obtuvo de distintos lugares muestreados, en galones de plástico de 20 L, se almacenó dentro del laboratorio de Investigación de Ambiental I, donde se mantuvo en refrigeración a una temperatura de $4 \pm 2^{\circ}\text{C}$ para su posterior análisis. El sustrato se utilizó para alimentar el reactor de biopelícula anaerobio (RBA) como se presenta en la Figura 3.2, el efluente de salida del reactor fue con el que se alimentó el humedal construido (HC) de la celda 1 (C1), celda 2 (C2) y celda 3 (C3) sembradas con monocultivos de las especies ornamentales *Canna Indica* L., *Spathiphyllum Willisii* y *Typha Latifolia* L. esta última nativa de humedales naturales respectivamente como se presenta en la Figura 3.1 Humedal construido (RBA-HC)

Tabla 3.1 Caracterización fisicoquímica del efluente azucarero en trabajos previos y este trabajo.

Parámetro	Solano, 2020	Resultado Castro, 2022	Este trabajo
DQO _T [g/L]	19.092	21.15	23.16
DQO _s [g/L]	11.2	15.06	17.10
ST [g/L]	9.01	7.31	9.42
STV [g/L]	8.55	5.56	6.03
pH	5.39	4.60	5.10
T(°C)	---	45	45

Los datos obtenidos de la caracterización inicial se encuentran en la Tabla 3.1 Solano *et al.*, (2020) obtuvieron valores similares en concentración de DQO con 19.092 g los

valores reportados constituyen valores promedios de diversas industrias durante varios años. Castro *et al.*, (2022) los valores son similares a los obtenidos anteriormente y con las pruebas actuales se puede observar resultados en los parámetros esperados.



Figura 3.1 Humedal construido (RBA-HC)



Figura 3.2 Reactor anaerobio de biopelícula (RBA).

3.2.1 Intensidad Lumínica

El HCP y HCS instalados en el vivero bajo sombra y sol dependiendo de la hora, percibió la cantidad de luz necesaria para promover la fotosíntesis de las especies de plantas (Alsanius *et al.*, 2019), el rango promedio durante los ensayos de experimentación fue de 4538 hasta 6124 Luxes, lo que promovió el desarrollo de las 3 especies de plantas del HC, este último resultado de cantidad de luminosidad final fue gracias a la reubicación de las 3 celdas del HC, como punto máximo a las 12 del día.

Tabla 3.2 Condiciones ambientales promedio en el HC.

Parámetro	Unidad	Celda 1	Celda 2	Celda 3	General
Temperatura ambiente	°C	28.2	28.2	28.2	28.2
Temperatura de alimentación	°C	25.2	25.2	25.2	25.2
Temperatura interna de las celdas	°C	26.2	26.6	26.1	-
Humedad	%	59	59	59	59
Luz	Lx	4538	5850	6124	-
Temperatura del efluente	°C	24.8	25.2	25.7	25.3

3.2.2 Carga Volumétrica Aplicada (Cva)

Se evaluaron las condiciones de operación iniciales del reactor comparando los datos obtenidos por Castro, 2022 obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 3.3 Remoción de materia orgánica a diferentes cargas volumétricas (Cva).

Cva (gDQO/L*d)	Concentración del hidrolizado azucarero (gDQO/L) _{Prom}	Concentración inicial (gDQO/L)	pH	% DQO _T rem	% DQO _S Re m
-------------------	--	--------------------------------------	----	------------------------------	----------------------------------

6	19.21	4.36	5.9	87.29	79.86
9	23.8	5.4	5.8	54.84	65.59
15	36.66	8.33	5.8	41.34	48.96
21	90.9	20.65	5.6	30.01	27.32

Con lo anterior se observa que la mejor remoción de material orgánico se lleva a cabo con un Cva de 6 gDQO/L*d en el humedal, sin embargo, se operara el HC con una Cva de 15 gDQO/L*d debido a que bajo estas condiciones de operación en el RBA se obtiene un efluente hidrolizado con una menor concentración, por lo tanto las condiciones de operación del humedal se fijan utilizando el efluente resultante con esta carga en la Figura 3.3 se puede observar la alimentación a cada una de las celdas del HC.

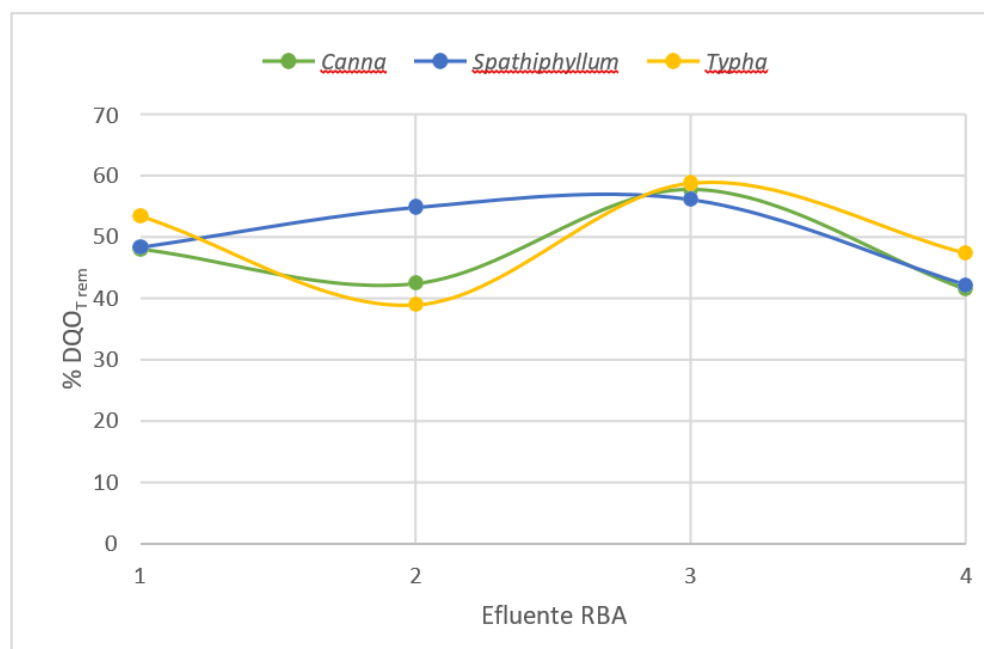


Figura 3.3 Alimentación de efluente al humedal construido (HC).

Tabla 3.4 Remoción de DQO_T .

alimentación del RBA	<i>Canna Indica</i> L.	<i>Spathiphyllum Willisii</i>	<i>Typha Latifolia</i> L.
1	48.11	48.4	53.48
2	42.54	54.94	39.12
3	57.79	56.22	58.86
4	41.55	42.18	47.47

En la tabla 3.4 se puede observar que con la Cva de 15 en las 3 celdas del humedal se obtuvieron las mejores remociones de DQO_T correspondientes al 57.79, 56.22 y 58.86 %, tal y como se muestra en la figura 3.4.

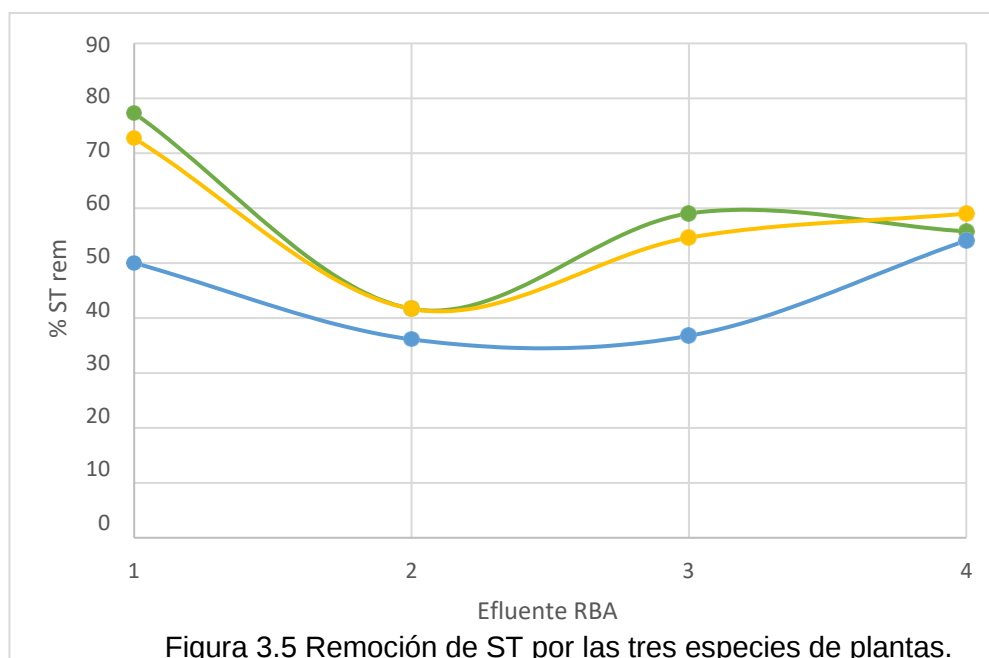
Figura 3.4 Remoción de DQO_T por las tres especies de plantas.

Por otra parte, de acuerdo con el monitoreo realizado se presentan las remociones de los ST con una Cva de 15 y se observa una disminución en las 3 celdas, estos datos son el promedio de los datos obtenidos en un periodo de 30 días.

Tabla 3.5 Remoción de sólidos suspendidos totales.

Alimentación del RBA	<i>Canna Indica</i> L.	<i>Spathiphyllum</i> <i>Willisii.</i>	<i>Typha</i> <i>Latifolia</i> L.
1	77.27	50	72.73
2	41.67	36.11	41.67
3	59.02	36.75	54.63
4	55.74	54.1	59.02

Se representa la Figura 3.5 en la cual se observa el porcentaje de remoción de ST, en la primera alimentación se alcanzan remociones del 80, 75 y 48 % de remoción.



3.2.3 Tiempo de retención hidráulica (TRH)

El humedal construido (HC) se puso en marcha con un periodo de acondicionamiento de las 3 especies vegetales de cada celda, con una alimentación de agua por 30 días, al término del periodo se suministró efluente del reactor anaerobio para alcanzar una concentración más baja para alimentar el sistema con un TRH de 3 días.

3.2.4 Operación del Sistema de Tratamiento

El inicio de la operación constó de 2 etapas.

Etapas 1: Operación del RBA con $C_{va}=15$ gDQO/L.d, se mantuvo una concentración promedio en el reactor de 75 g DQO/L, cumpliendo un tiempo de TRH de 24 horas, es necesario un sustrato de mayor concentración, pero de características similares; por lo que se emplea un efluente de un trapiche, el cual contiene azúcares no cristalizables, residuos de cachaza, vinazas y residuos orgánicos del triturado de caña; con los resultados obtenidos caracterizando este segundo efluente (DQO= 154.38 g/L ; ST= 52.26 g/L ; STV= 33.06 g/L ; pH= 4.47) se realiza una combinación de sustratos de alimentación para cumplir con las condiciones de operación. La combinación de ambos efluentes da como resultado el Agua Residual de la Industria Azucarera (ARIA), para esto es necesario agregar 9.1059 L de agua residual de los ingenios azucareros y 0.8941 L de agua residual del trapiche, con dicho sustrato se alimentan los 10 L al RBA.

Etapas 2: El HCP se mantendría alimentando de acuerdo con la remoción alcanzada por el RBA de 1.56 gDQO/L.d con un TRH de 72 horas con una velocidad de alimentación de 23.14 mL/min como se muestra en el diagrama. El efluente del reactor se agregó a las celdas HCP a través del tanque de distribución diluyendo los 10 L provenientes de la etapa anterior con 290 L de agua fresca. Cada prueba corresponde a un nuevo lote del reactor para asegurar el acondicionamiento y estabilización de las especies de plantas bajo condiciones de inundaciones prolongadas. Las celdas del HCP se inundaron completamente con efluente parcialmente digerido del reactor con un caudal de alimentación de 33 mL/min durante 72 h sin ajustes de pH hasta que el efluente tratado saliera por completo de las unidades experimentales, es decir 100 L

por celda. Esto se realizó con la finalidad de determinar el comportamiento del sistema de tratamiento y asegurar su efectividad. De igual forma se tomaron muestras a la entrada y salida del HCP para su análisis. La fase de remoción de nutrientes se realiza mediante el complemento de este dispositivo, donde el valor de entrada de NO_3^- y PO_4^{3-} es monitoreado, a continuación, se muestra la Figura 3.6 Diagrama de operación HCP.

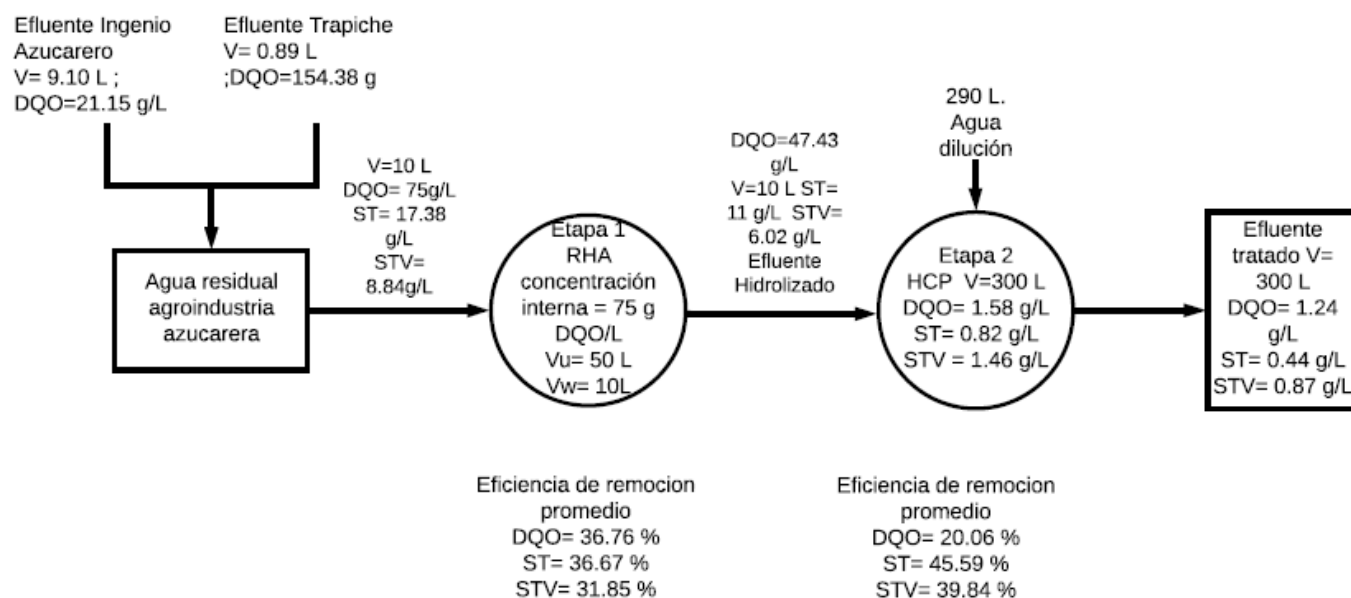


Figura 3.6 Diagrama de operación HCP.

3.2.5 Operación del Reactor de Biopelícula Anaerobio

En la Figura 3.7 se puede observar el monitoreo de los 30 lotes alimentados al RBA, la concentración disminuye en un rango de 18 a 16, hasta un 70 % para la DQO total y soluble. Cabe resaltar que posteriormente a los 15 días de operación se presentó una perturbación dentro del reactor durante los cambios en el sustrato de operación fue muestreado disminuyendo las remociones, alcanzando concentraciones de 30 g DQO/L.d , es posible que esto se debió a un desprendimiento de la biopelícula bacteriana en los paneles de fibra, alterando la materia orgánica disuelta a causa del flujo de recirculación; sin embargo, posteriormente la remoción se estabiliza nuevamente, por lo que el RBA fue capaz de asimilar por acción microbiana el material orgánico a partir del ensayo 18.

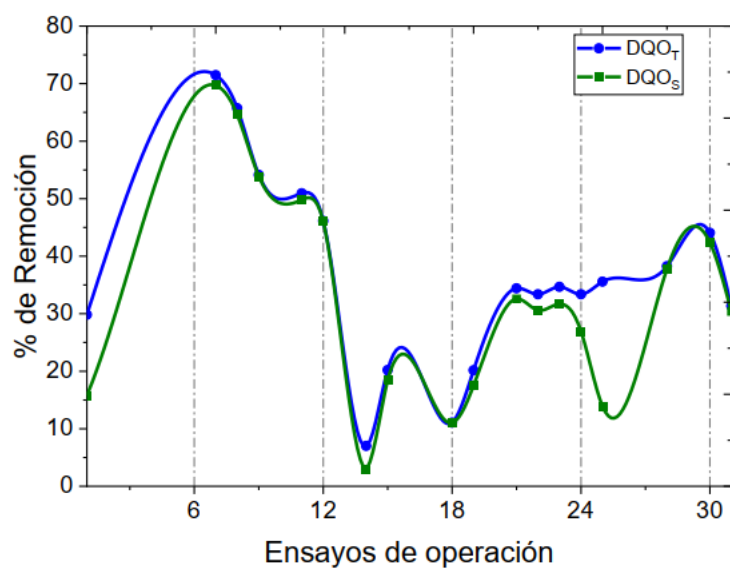


Figura 3.7 Remoción de DQO por RBA.

Debido a las dinámicas de nitrificación y desnitrificación, se presentó un aumento en la concentración de nitrógeno medido en forma de NO_3^- , tal y como se puede observar en la Figura 3.8, iniciando en una concentración de 0.21 mg/L hasta llegar a un valor cercano a los 0.40 mg/L, observándose que son concentraciones muy bajas.

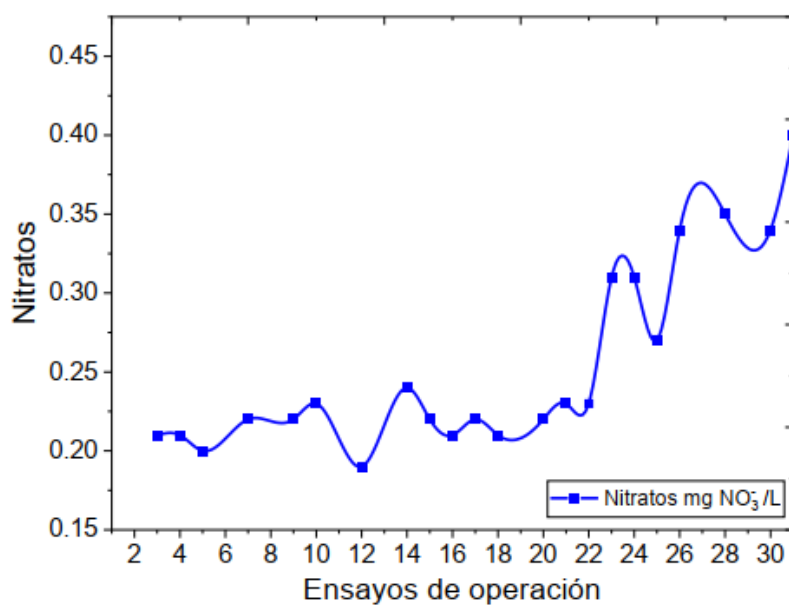


Figura 3.8 Concentración de Nitratos en el RBA.

A diferencia de los nitratos, el comportamiento de los fosfatos al interior del RBA presentó

oscilaciones considerables con una tendencia marcada que rondan de los 0.55 a 0.65 mg/L, como se muestra en la Figura 3.9.

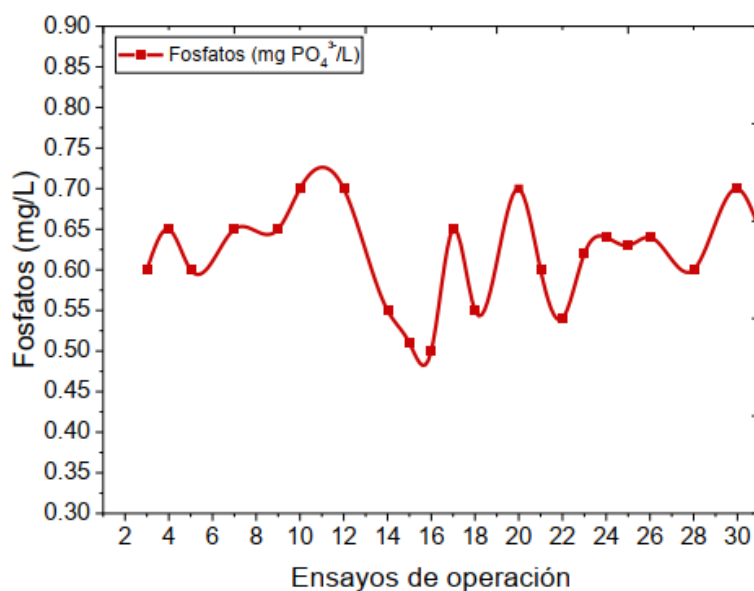


Figura 3.9 Concentración de fosfatos en el RBA.

En la operación inicial, se presentan remociones de sólidos del 21 %, mientras que en el día 21 de operación alcanzó una remoción del 70 % de ST y del 60 % de STV, tal como se muestra en la Figura 3.10

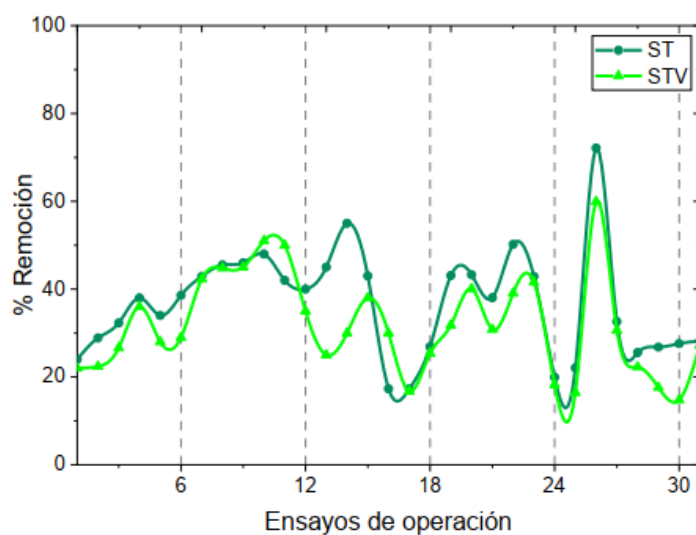


Figura 3.10 Remoción de sólidos en el RBA.

Se puede observar el monitoreo del pH en la Figura 3.11, mostrándose un valor ácido característico de la hidrólisis anaerobia, con un rango de operación de 5 a 5.5. El pH de salida del RBA presenta una acidificación, con un efluente resultante de 4.5 a 5.5, esto se debe al TRH y el proceso de la hidrólisis como primera etapa de la digestión anaerobia.

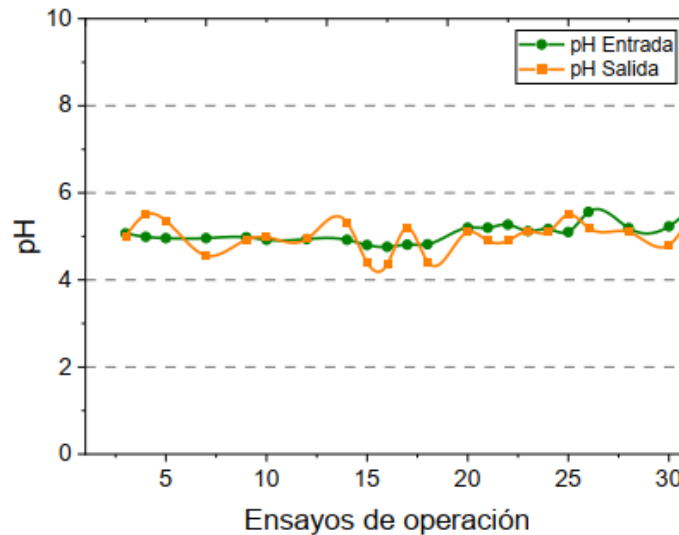


Figura 3.11 pH de entrada y salida.

3.2.6 Operación en Paralelo del Humedal Construido

Posteriormente, después del arranque y operación continua del RBA, se realizó la operación en la configuración de paralelo correspondiente a la etapa 2. A partir de esto se construye el gráfico de la Figura 3.12 observando una remoción inicial del 10 % y en aumento exponencial hasta el día 9 alcanzando una remoción máxima del 45 %, coincidiendo con lo reportado por Castro, 2022. Posteriormente después de algunas variaciones, las remociones disminuyeron alcanzando remociones del 15 %, coincidiendo a la reubicación del STH, y por ende del RBA a condiciones bajo techo a únicamente bajo sombra con malla del vivero de la planta piloto.

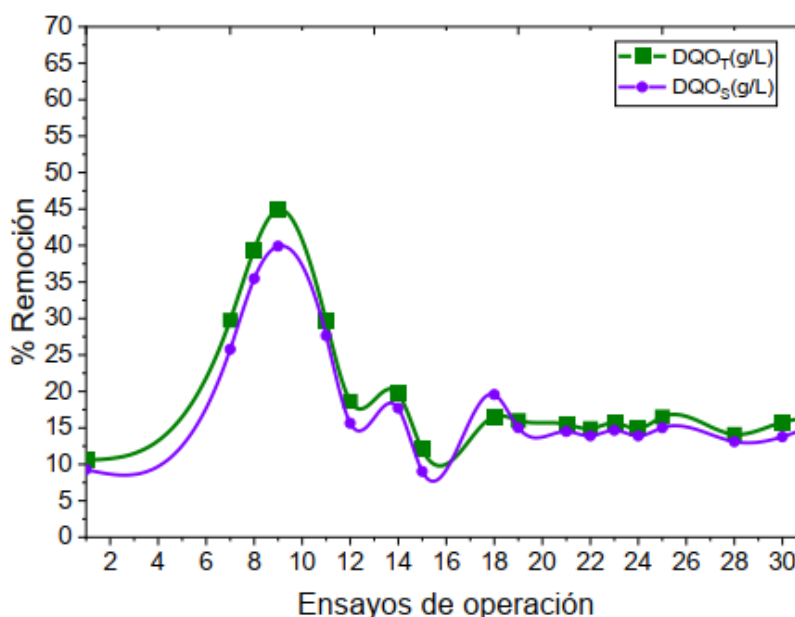


Figura 3.12 Porcentaje de remoción DQO en el HCP.

En la Figura 3.13 se puede observar como a partir de una concentración de alimentación de 0.40 mgNO₃⁻/L (día 1); posteriormente la concentración a la salida del HCP disminuye progresivamente. Sin embargo, en el día 11 de operación esta concentración de salida aumento, por el rendimiento de la remoción que alcanzó en promedio 15 mg PO₄³⁻.

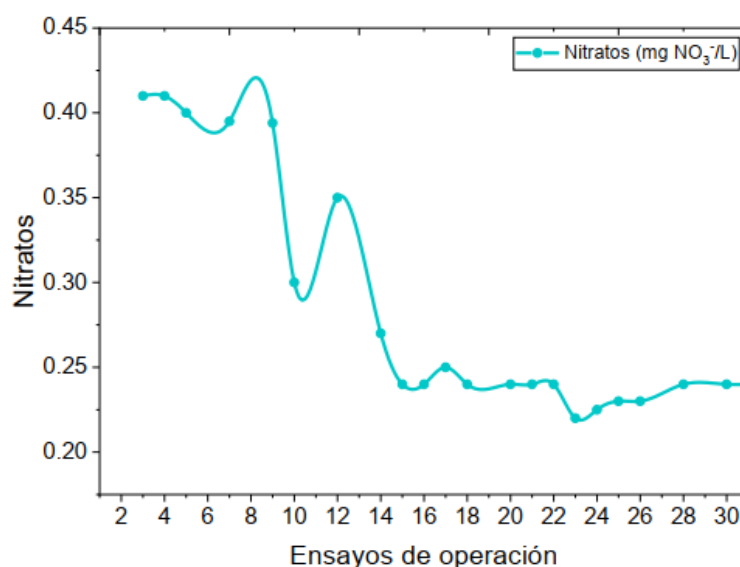


Figura 3.13 Monitoreo de Nitratos en HCP.

La absorción de fósforo varía considerablemente, de acuerdo con, la Figura 3.14 para la concentración de salida de Fosfatos, donde se presenta una remoción nula de los días 10 al 12. Por otra parte, las concentraciones de salida menores se presentaron a los 15 días

de operación del sistema con una remoción del 28 % correspondiente a un efluente de salida con concentración de $50 \text{ PO}_4^{3-}\text{mg/L}$.

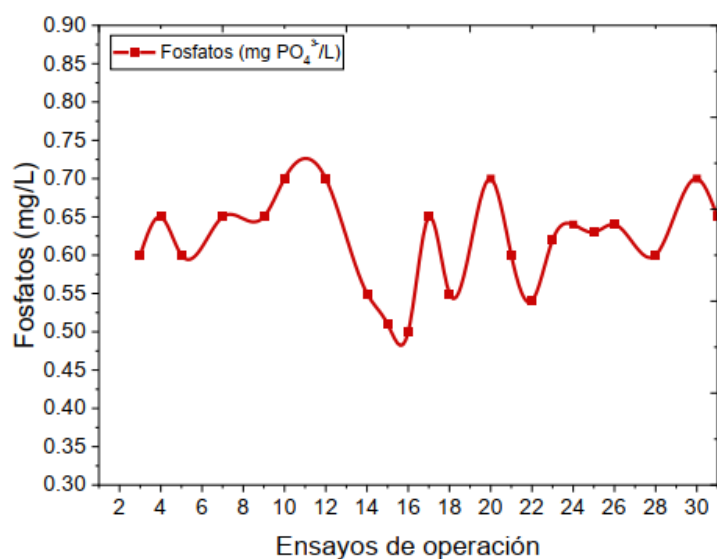


Figura 3.14 Monitoreo de fosfatos en el HCP.

La remoción de salida de material orgánico disuelto en forma de ST y STV, se presenta en la Figura 3.15 algunas alteraciones provocadas por la velocidad de recirculación y el desprendimiento de la biopelícula, pero a diferencia de la remoción de nutrientes, esta presenta una tendencia al aumento de las remociones alcanzando en el mejor de los casos una remoción cercana al 70 % para ambos casos.

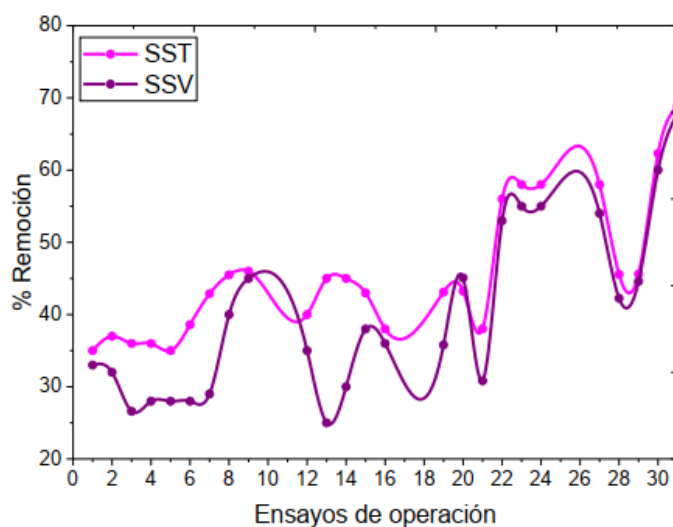


Figura 3.15 Ensayos de operación del HCP.

3.2.7 Cambio de configuración para operación en serie del HC

Para el cambio de configuración y operación en serie se modificó la línea de salida de las celdas para su recirculación, la dilución de alimentación ahora solo utilizando 70 L de agua fresca, cabe resaltar que se disminuyeron 220 L en comparación con la operación en paralelo. esto debido a la remoción alcanzada por las 3 celdas de los humedales, se instalaron 3 bombas comerciales sumergibles para alimentar en flujo lento cada una de las celdas. A continuación, se muestra el diagrama de operación del HCS.

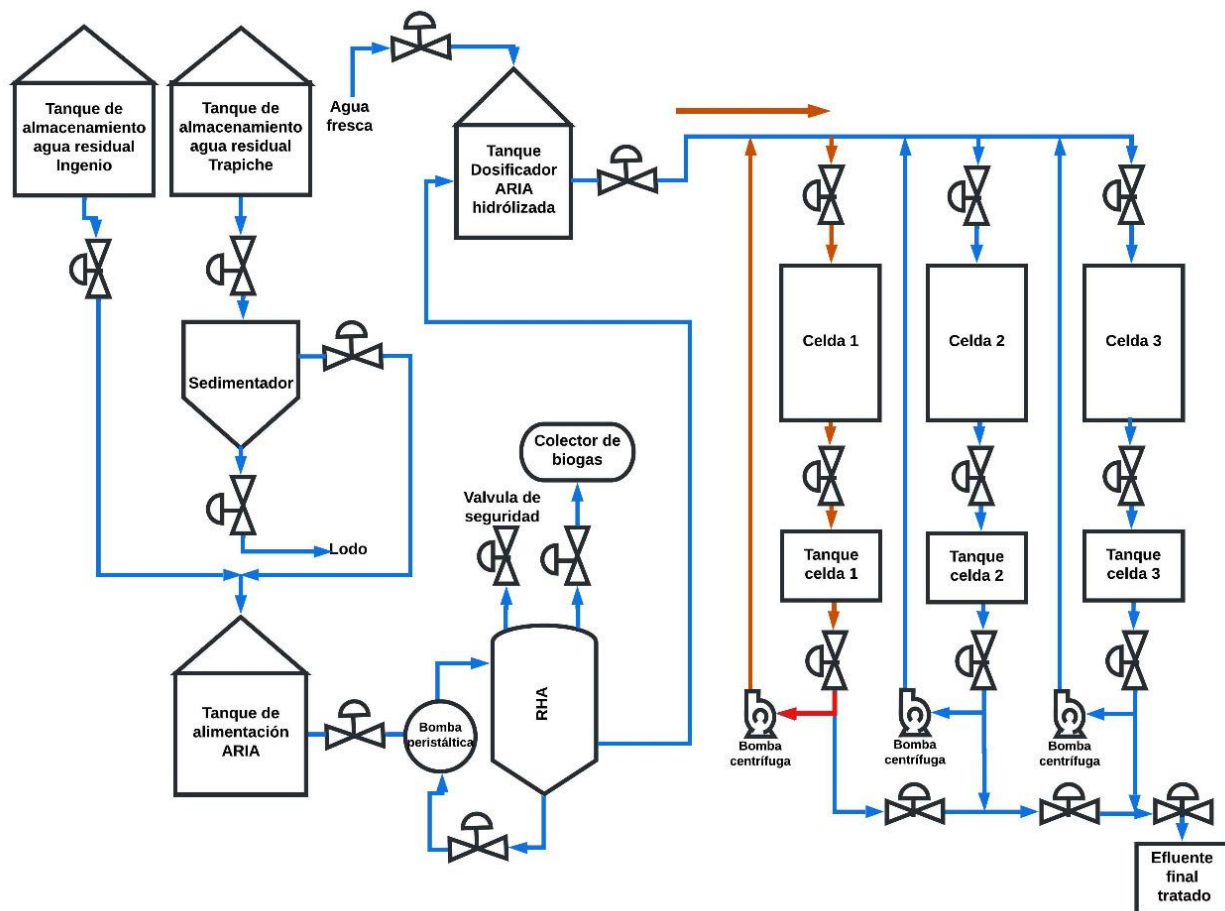


Figura 3.16 Diagrama alimentación HCS celda 1.

Se puede observar en la Figura 3.16 la alimentación a las celdas del HCS, se abre la válvula de paso para alimentar la celda 1, este efluente será recolectado en el tanque de salida de la celda 1, se procede a prender la bomba comercial sumergible y se recircula a la celda 2 como se muestra en la Figura 3.17 diagrama alimentación celda 2, hasta alimentar de acuerdo con la clave de cada una de las permutaciones correspondientes.

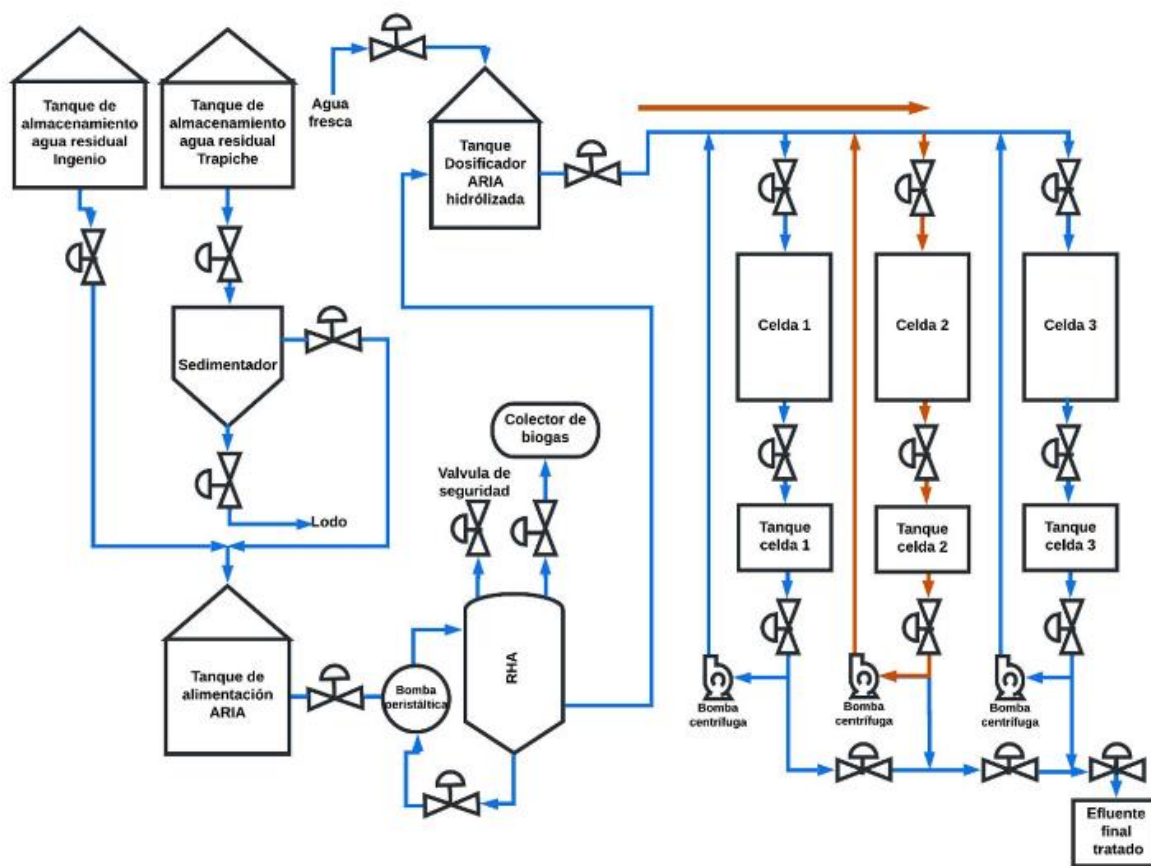


Figura 3.17 Diagrama alimentación HCS celda 2.

Se dosificó ARIA hidrolizada diluida proveniente de un Reactor de Biopelícula Anaerobio, mediante lotes consecutivos (7.09 gDQO_T) de acuerdo con la configuración correspondiente por cada permutación de las tres celdas. Las celdas están sembradas con monocultivo de las plantas ornamentales (A) *Canna Indica* L., (B) *Spathiphyllum Willisii* y la última celda de la especie nativa de humedales (C) *Typha latifolia* L. Las seis permutaciones se presentan en la tabla

Especies A: *Canna Indica* L.

B: *Spathiphyllum Willisii*.

C: *Typha latifolia* L.

Tabla 3.6 Permutaciones y clave de especies.

Permutación	Clave	Celda
1	ABC	C1»C2»C3
2	BAC	C2»C1»C3
3	BCA	C2»C3»C1
4	CBA	C3»C2»C1
5	CAB	C3»C1»C2
6	ACB	C1»C3»C2

3.2.8 Monitoreo del sistema de híbrido de tratamiento

con base a los parámetros de operación y al cambio de configuración ahora en serie, el monitoreo se mantuvo más estricto debido a la alta concentración de alimentación a las celdas, la dilución es muy importante ya que se eleva de 1.56 a los 7.75 gDQOT/L·d las especies de las celdas pueden cambiar su comportamiento, por lo [cual que el sistema](#) debe ser monitoreado constantemente.

3.3 Evaluación de las eficiencias del sistema en serie y en paralelo

Monitoreo DQO_T

En la Figura 3.18 se presentan las remociones alcanzadas por el HCS donde se observa que la permutación 1 con una entrada de 7.75 gDQO_T fue la mayor concentración de trabajo logrando una remoción de materia orgánica del 34 %, durante los ensayos de operación se puede notar como al inicio de operación en serie de la permutación 2 el porcentaje de remoción se eleva hasta el 97 % de remoción debido a la adaptación de las especies con el incremento de concentración en comparación con las alimentaciones realizadas en los ensayos en paralelo. Debido a la operación continua en cada uno de los ensayos, las remociones se mantienen entre el 94 y 98% en el resto de las permutaciones. Sin embargo, la mayor remoción se alcanzó en el ensayo 38 correspondiente a la permutación 5 con un 97.91 %. Es decir, el mejor desempeño del HCS se lleva a cabo cuando el efluente del RBA se ingresa primero a la celda numero 3 sembrado con la especie nativa de humedales

Typha latifolia L., posteriormente a las especies ornamentales en la celda 2 con *Canna Indica* L y por último a la celda 3 con *Spathiphyllum Willisii*. Estos resultados son similares a lo reportado por Rousoo *et al.*, (2019) que utilizo un humedal híbrido con la especie *T. domingensis* con TRH de 3 a 5 días alcanzando una remoción del 98 %. De igual forma empleando un FSSH sembrado con *Iris pseudacorus* se alcanzan remociones que rondan del 70 al 90 % (Ma *et al.* 2019). El uso del HCS configurado en la permutación 5 supera el desempeño de los humedales de flujo superficial libre, horizontal, vertical e híbrido, los cuales únicamente alcanzan el 73 % de remoción de DQO cuando se utilizan efluentes domésticos, industriales y de agricultura (Liu *et al.*, 2008).

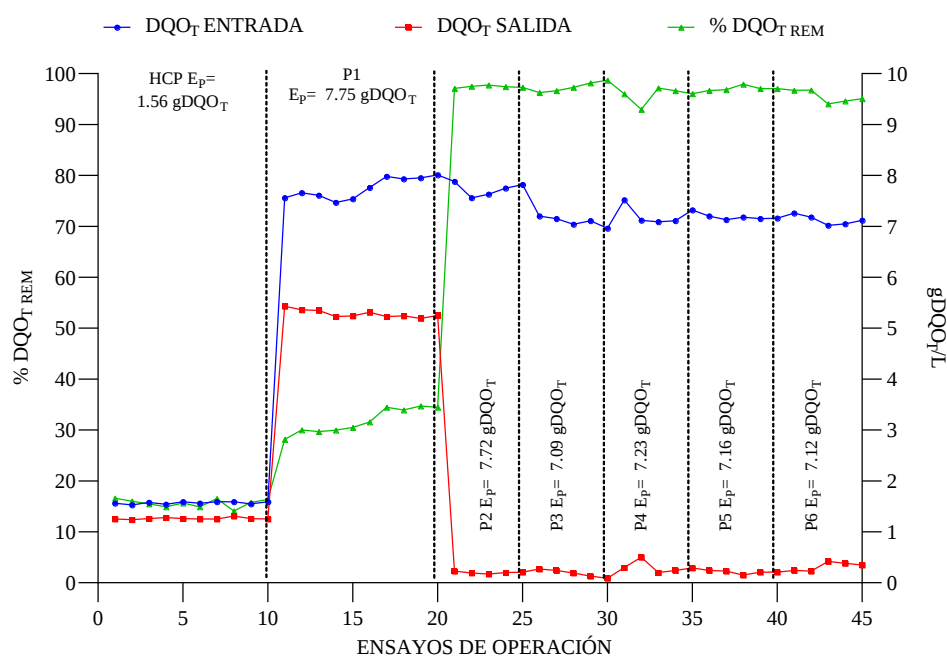


Figura 3.18 Monitoreo de DQO_T en el HCS.

En la Figura 3.19 se presentan las remociones de la DQO_s, donde se observan las alimentaciones de entrada con un promedio de 7.16 gDQO_s. en la Figura se observa un comportamiento similar en la entrada de la DQO_s en la permutación 1, 5 y 6 debido a la remoción alcanzada por el RBA; de igual forma la permutación 5 presenta los porcentajes de remoción más alto alcanzando el 98% con una entrada promedio de 7.12 g/L la celda de entrada en esta permutación fue en la celda 3 con la especie *Typha latifolia* L, los resultados son similares a lo reportado por Saeed *et al.*, (2012) utilizando un humedal híbrido sembrado con la especie *Phragmites australis* alcanzando remociones del 98 %,

por otra parte, cuando se emplea el monocultivo de *Typha latifolia* L se alcanzan remociones del 57 % en humedales construidos de flujo horizontal de acuerdo con Calheiros *et al.*, (2007), ambos utilizando aguas residuales de curtiduría. Además, cuando se siembran humedales con *Canna* únicamente es posible alcanzar remociones promedio del 54.31 % de DQO. Recientemente, se han evaluado algunas especies ornamentales para el tratamiento de aguas residuales porcícolas, donde han presentado un buen desempeño de adaptación y aún más importante de remoción de material orgánico medido en forma de DQO. Sandoval-Herazo *et al.*, (2021) ha reportado que el uso de la especie ornamental *Canna* y *Typha* pueden alcanzar remociones del 83.6 y 79.4 % de DQO en humedales construidos en zonas con clima tropical.

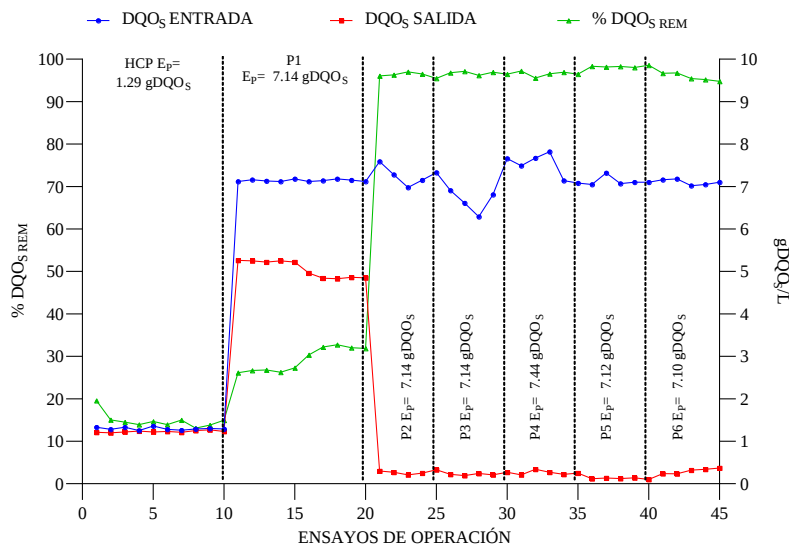


Figura 3.19 Ensayos de operación DQO_s del HCS.

El comportamiento de los ST se observa en la Figura 3.20, la cual presenta resultados muy similares en las tres primeras permutaciones. En la permutación N° 1 (Celda 1 → Celda 2 → Celda 3) los ST de entrada en promedio fueron de 1.17 g/L, alcanzando hasta un 52 % de remoción de ST. Cabe resaltar que en el ensayo 30, correspondiente a la permutación 4 aumenta considerablemente hasta alcanzar en el ensayo 35 un 97 % ST_{REM} en la permutación número 5. En la cual se aprecia notablemente la diferencia de remoción superando a lo reportado por García-Ávila *et al.* (2019) utilizando un HC de flujo subsuperficial vertical con TRH de 1 a 12 días sembrando con las especies *P. australis* y

Cyperus papyrus. Registrando remociones del 33 al 63 % de ST. Cabe destacar que la implementación de este tipo de sistemas configurados en serie puede promover el aumento en la efectividad del tratamiento, disminuyendo el TRH y el agua de dilución.

Vymazal (2019) reporta que el uso de humedales de flujo subsuperficial horizontal sembrados con policultivo de las especies ornamentales *Phalaris arundinacea*, *australis* y *Typha latifolia* entrega remociones del 88.3 % sin embargo no reporta TRH alguno. Yazdania y Golestanib (2019) trataron residuos lácticos en un HC de flujo vertical sembrados con la especie nativa de humedales *Juncaceae spp* con remociones del 84.18 % utilizando como material de soporte piedra, grava y arena.

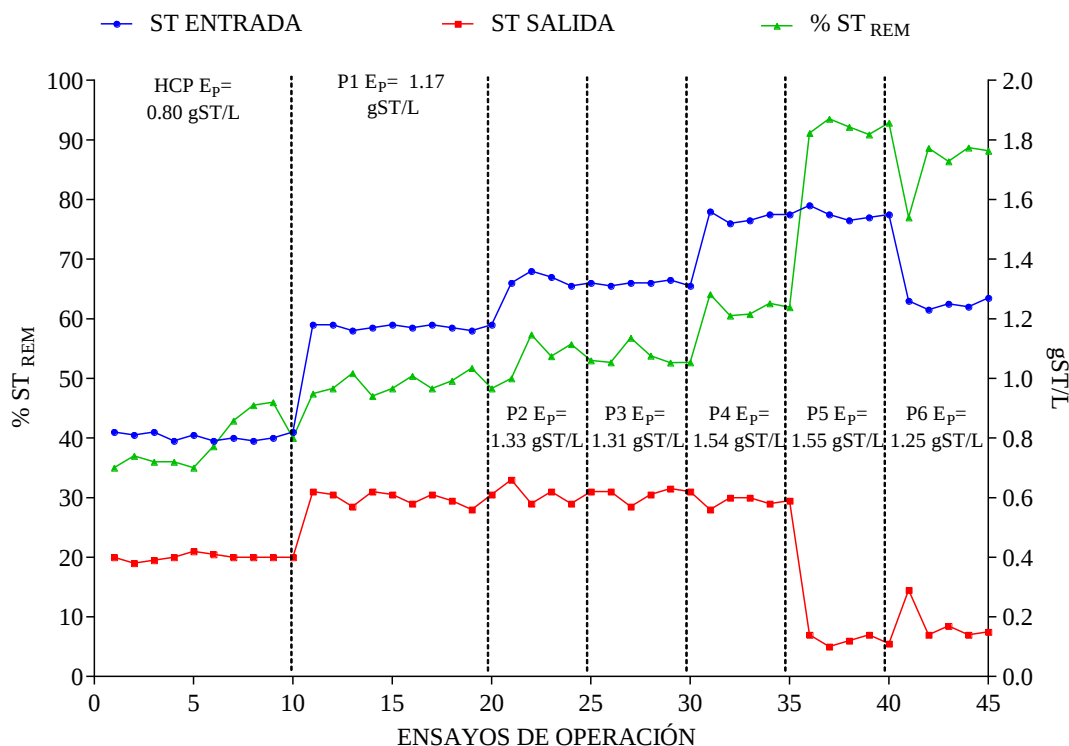


Figura 3.20 Ensayos de operación ST del HCS.

El monitoreo de los STV se observa en la Figura 3.21, donde en el ensayo número 10 inicia la permutación 1 aumentando de manera considerable en comparación en la configuración en paralelo, donde se mantiene un promedio del 72 % de remociones de STV. En el ensayo 31 correspondiente a la permutación 4 donde la alimentación de entrada es a través de la Celda 3 → Celda 2 → Celda 1 los STV se mantienen estables, alcanzando una remoción

promedio del 48.58 %. En el mejor de los casos se registró el mayor porcentaje de STV removidos al final de la permutación 5 con el 74.80 %; es decir que el mejor desempeño del HCS se lleva a cabo cuando la alimentación proveniente del RBA ingresa a la celda numero 3 sembrado con la especie *Typha latifolia* L., por último, a las especies ornamentales en la celda 2 con *Canna Indica* L y celda 3 con *Spathiphyllum willisii*. En cuanto a la remoción de material suspendido de residuos municipales se ha empleado el uso de HC de flujo horizontal, flujo vertical y humedales híbridos sembrados con caña y *Phragmites australis* utilizando grava de soporte se logra obtener un desempeño similar con remociones del 74.4 % de acuerdo con Ghrabi *et al.*, (2011).

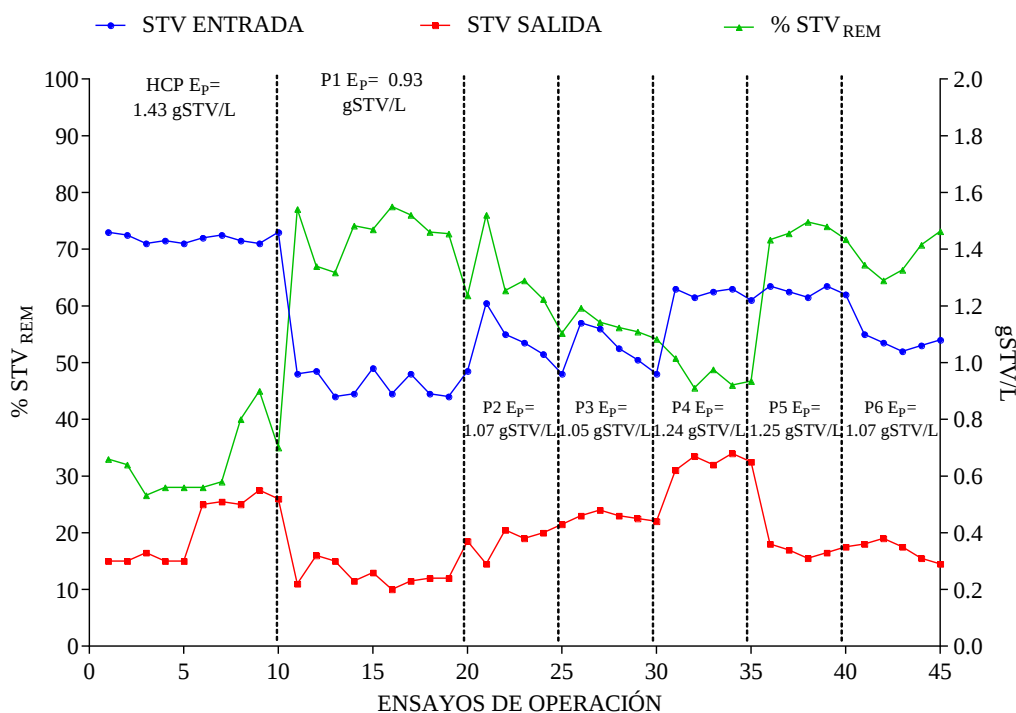


Figura 3.21 Ensayos de operación STV del HCS.

En la Figura 3.22 se observa el monitoreo de PO_4^{3-} y el desempeño en el comportamiento en la configuración del HC en paralelo y en serie. En el ensayo numero 10 al inicio de la operación del HCS se logra una remoción de fosforo en forma de PO_4^{3-} registrando remociones de manera constante. Sin embargo, en el ensayo 23 correspondiente a la permutación 2 donde el efluente del reactor se ingresa al HCS por medio de las celdas

sembradas con la especie con *Spathiphyllum willisii*, *Canna Indica* L y *Typha latifolia* L respectivamente la remoción disminuye al 66 % registrando oscilaciones conforme los días de operación van transcurriendo. A pesar de esto, los mejores resultados se observan en los ensayos 35 al 40 con una remoción del 95 %.

Algunos HC de flujo horizontal tratan aguas domesticas mediante el uso de piedra de rio y grava sembrada con caña de azúcar logrando remover hasta el 41.9 % de PO_4^{3-} ; mientras que utilizando el policultivo de las especies vegetales *Typha latifolia* - *Lemon Grass* y *Hybrid napier* - *Paragrass* la remoción ronda entre el 1.93 y 19.06 % de PO_4^{3-} removidos (Avzar et al., 2007; Tilak et al., 2016).

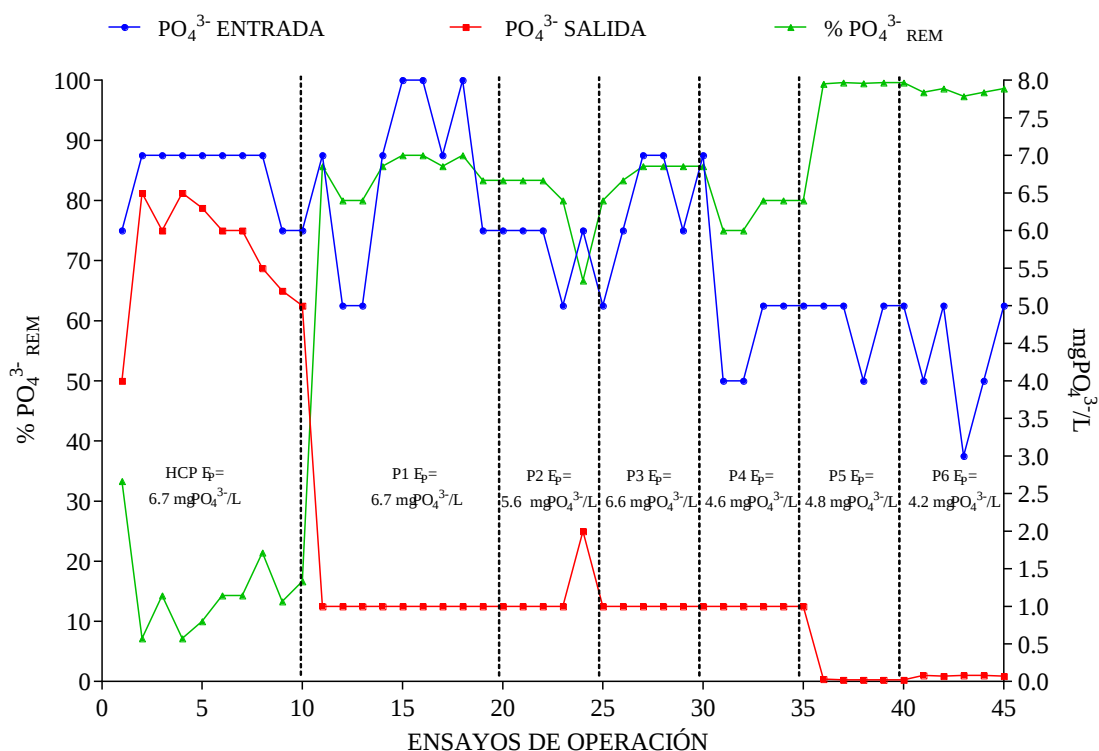


Figura 3.22 Ensayos de operación PO_4^{3-} del HCS.

En algunos casos la absorción de nitrógeno disminuye con el aumento de la carga orgánica aplicada, aun así, el HCP alcanza remociones no mayores al 30%, tal y como se observa en la Figura 3.23 para el monitoreo de nitrógeno en forma de NO_3^- . Algunos estudios han reportado que el uso de HC híbridos conectados con HC de flujo vertical logran remover el 53 % de NO_3^- cuando estos son sembrados con las especies *Canna India* que trata aguas

residuales de rastros porcícolas (Borin *et al.*, 2013).

De igual forma que la materia orgánica medida en forma de DQO y sólidos el HCS sembrado con monocultivo consigue remover de manera más efectiva los contaminantes. En este caso, sucede de manera similar la remoción de nutrientes; durante los ensayos correspondientes a la permutación 5 el promedio de $\%NO_3^-_{REM}$ es de 98.58, cuando la concentración de entrada promedio es de 0.50 mg NO_3^- . De igual forma, las especies *Typha domingensis* y *Schoenoplectus californicus* han probado ser buenas opciones de tratamiento removiendo del 30-78 y 11-47% de N_{total} y P_{total} respectivamente, sin embargo, presentan una desventaja teniendo TRH demasiado prolongados de hasta 12 días en HC de flujo horizontal (Rigotti *et al.* 2020).

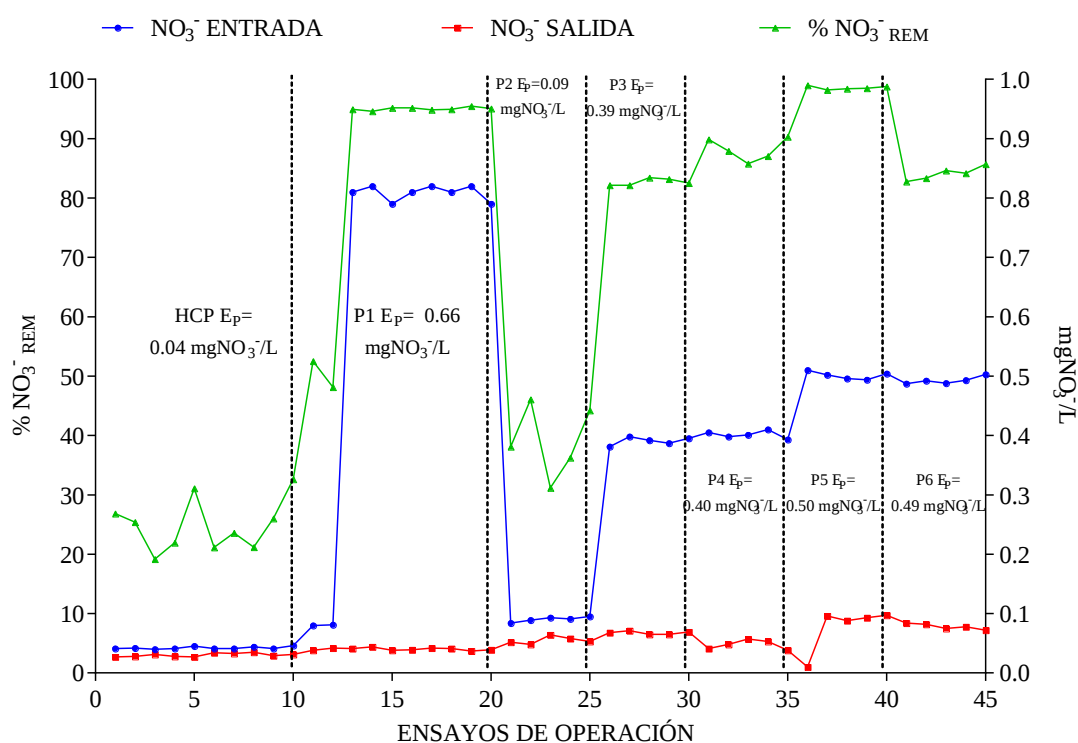


Figura 3.23 Ensayos de operación NO_3^- del HCS.

Biomasa vegetal en el Humedal Construido

Durante la evaluación de este HCP se notó que la producción de biomasa (tallos nuevos) aumento de manera acelerada sin importar las condiciones de operación, sin embargo,

estas plantas morían rápidamente en el sistema. La Tabla 3.6, se presenta la adaptación y supervivencia de las especies utilizadas en cada celda del HCP.

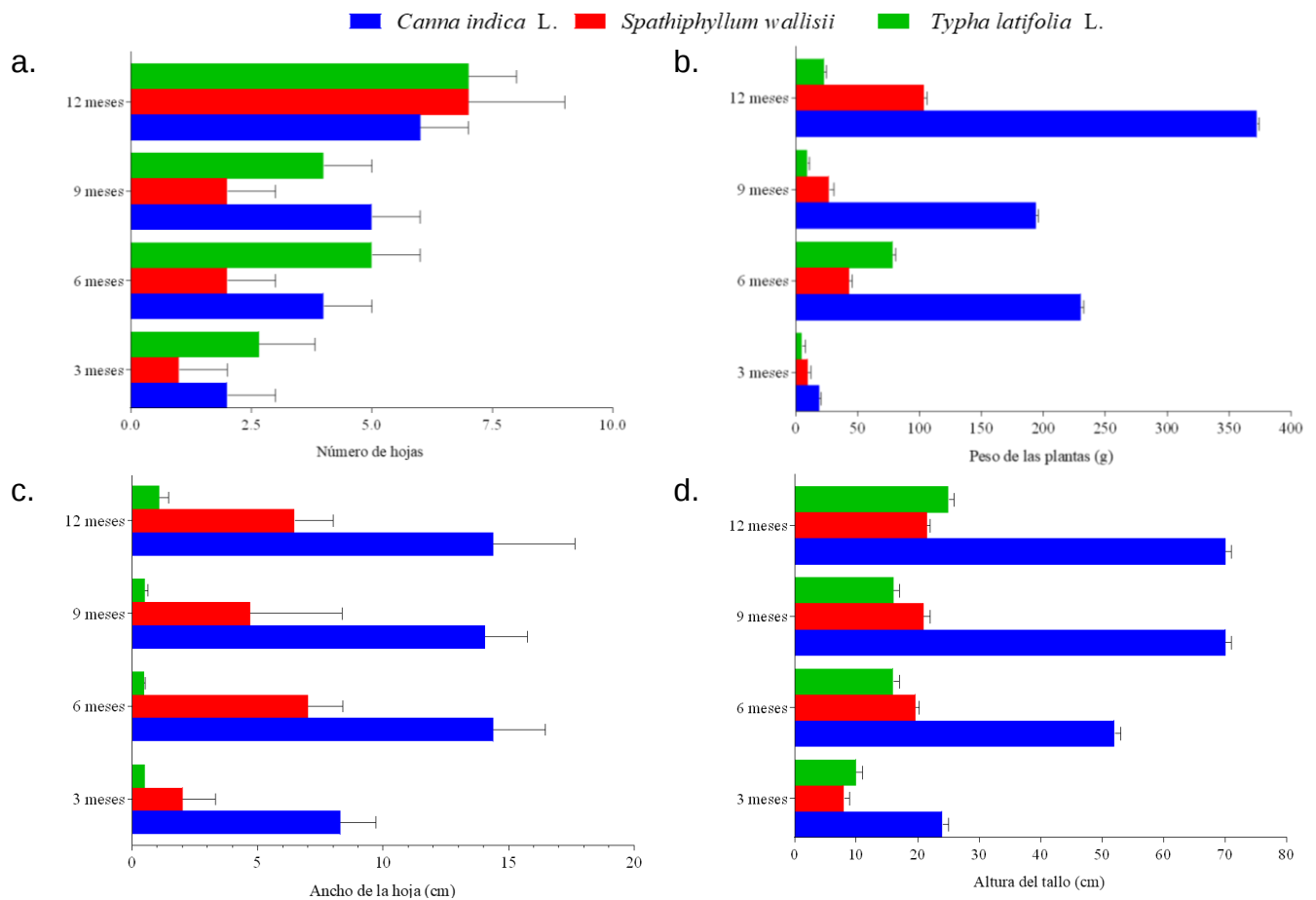
Tabla 3.7 Adaptación y supervivencia de las especies usadas.

Especies	Número de tallos por mes					Altura Promedio de la planta (m) al final del estudio
	Mes	1	2	3	4	
<i>Typha Latifolia</i> L.	Iniciales	30	27	45	76	0.25
	Muertas	3	5	0	0	-
	Nuevas	0	23	31	20	0.05
<i>Canna Indica</i> L.	Iniciales	30	28	40	54	0.70
	Muertas	2	3	0	0	-
	Nuevas	0	15	14	20	0.15
<i>Spathiphyllum Willisii</i>	Iniciales	30	25	42	65	0.22
	Muertas	5	4	0	0	-
	Nuevas	0	21	23	20	0.08

Con lo anterior, se construye la Figura 3.24, donde se observa la tendencia de crecimiento y desarrollo de nuevos tallos presentes sembrados en el HC. Por otra parte, conforme al monitoreo de las especies presentado en la Figura 3.24c, el ancho de la hoja en la *Canna indica* L., fue el más grande de las tres plantas. Mientras que en el largo de la hoja entre las tres especies fue la *Typha latifolia* L., tal y como se muestra en la Figura 3.24e.

En la altura del tallo la especie *Canna indica* L. fue la que mayor promedio tuvo de las tres especies con 70 cm, como se presenta en la Figura 3.24d, lo que indica que, esta especie ornamental es un organismo útil para la producción de biomasa en plantas mientras que la especie que mejora la calidad de agua en los Humedales Construidos es la *Spathiphyllum Willisii*. En los humedales construidos la presencia de biomasa es importante, ya que representa una mejor remoción de contaminantes, empleando una carga considerable de ARIA.

Las plantas tienen un mayor efecto de purificación, lo que sugiere que la cosecha de estas plantas es una estrategia válida para la depuración, pero también es importante evaluar cuando realizar la poda y posible venta de estas especies. La biomasa de Humedal es usada generalmente como forraje, acondicionador de suelo o fertilizante debido a su contenido en nutrientes, pero también podría ser cosechado como producción de bioenergía. En plantas ornamentales, el incremento de biomasa no representa un problema.



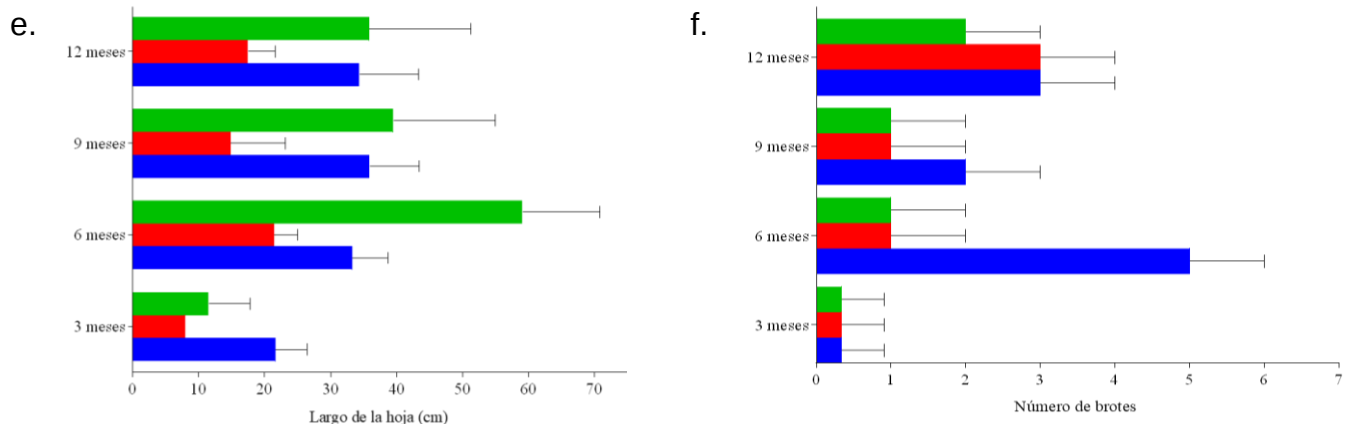
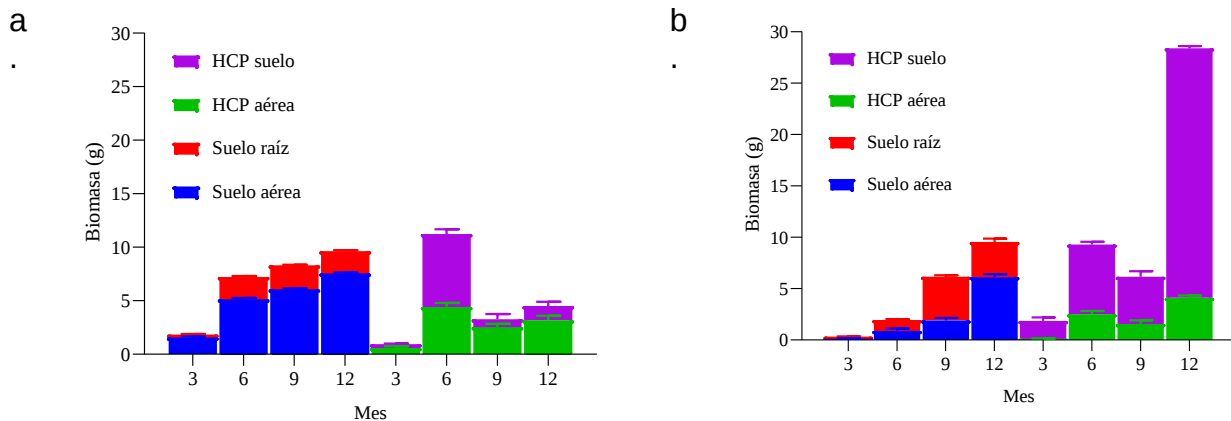


Figura 3.24 Monitoreo de crecimiento de especies en el HCP. a. Numero de Hojas, b. Peso de planta, c. Ancho de hoja, d. Altura del tallo, e. Largo de hojas, f. Numero de brote.

Por último, se presenta en la producción de biomasa por g de planta en la Figura 3.25 para las especies sembradas en el HCP comparadas con un control sembrado en suelo. A partir de esto se puede observar que en la Figura 3.25a la especie *Typha Latifolia* L., tuvo un comportamiento similar, sin diferencias significativas con al menos 10 gBiomasa/gPlanta. Sin embargo la especie de la celda 2, tuvo un mejor desarrollo (verde/morado), alcanzando un valor de biomasa de 28 g. Por último, nuevamente la especie *Typha Latifolia* L. tuvo un comportamiento similar con 50 g de biomasa al igual que en las sembradas en el sustrato de suelo natural.



C.

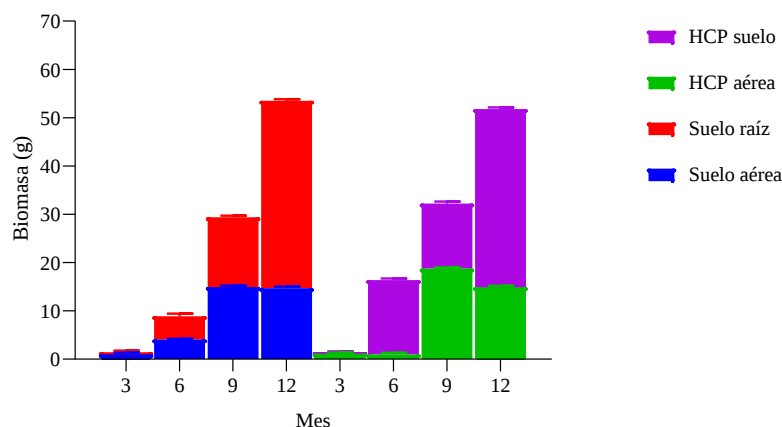


Figura 3.25 Monitoreo de Biomasa en el HCP-HCS.

En los humedales construidos la presencia de biomasa es importante, ya que representa una mejor remoción de contaminantes, aun cuando en el tratamiento se usó poca carga de aguas residuales, las plantas tienen un mayor efecto de purificación que en agua normal. Esto sugiere que la cosecha de estas plantas es una estrategia válida para la dilución de agua, pero también es importante cuando se puede llevar a cabo. La biomasa de Humedal es usada generalmente como forraje, acondicionador de suelo o fertilizante debido a su contenido en nutrientes, pero también podría ser cosechado como producción de bioenergía. En plantas ornamentales, el incremento de biomasa no representa un problema ya que la poda puede llevarse a cabo continuamente y las plantas pueden comprarse.

Análisis de Eficiencia de Remoción

A partir de los datos obtenidos en el apartado anterior, se procedió a realizar el ANOVA mediante el programa Minitab 17, analizando con comparaciones múltiples los tratamientos (Permutaciones) del HC (P1, P2, P3, P4, P5 y P6) con variable de respuesta las medias de Remoción de DQO, debido a que es el parámetro de respuesta medible más rápido para la toma de decisiones y puede otorgar un valor confiable de la calidad del efluente tratado. Por lo tanto, se obtuvo con 95 % de nivel de confianza lo siguiente.

One-way ANOVA: REMOCIÓN versus TRATAMIENTO

Method

Null hypothesis All means are equal

Alternative hypothesis At least one mean is different
Significance level $\alpha = 0.05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
TRATAMIENTO	6	P1, P2, P3, P4, P5, P6

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
TRATAMIENTO	5	30083.5	6016.71	2324.50	0.000
Error	29	75.1	2.59		
Total	34	30158.6			

A partir de lo anterior, de acuerdo con el Valor-P se puede establecer que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. Por lo que se puede decir que el utilizar el HCS claramente es mejor que el HCP, sin embargo, las permutaciones posibles no afectan considerablemente el tratamiento. De igual forma, una vez interpretado el ANOVA, se realiza la comparación mediante Tukey y MCB de Hsu. En la Figura 3.26 se muestra la gráfica de intervalos, donde claramente se observan que la permutación 1 es la que presenta menores eficiencias de remoción y, por otro lado, la Permutación 2 (LETRAS ABC) seguida de la Permutación 5 (LETRAS) presenta las mayores remociones alcanzando el 97.41 y 97.11 respectivamente.

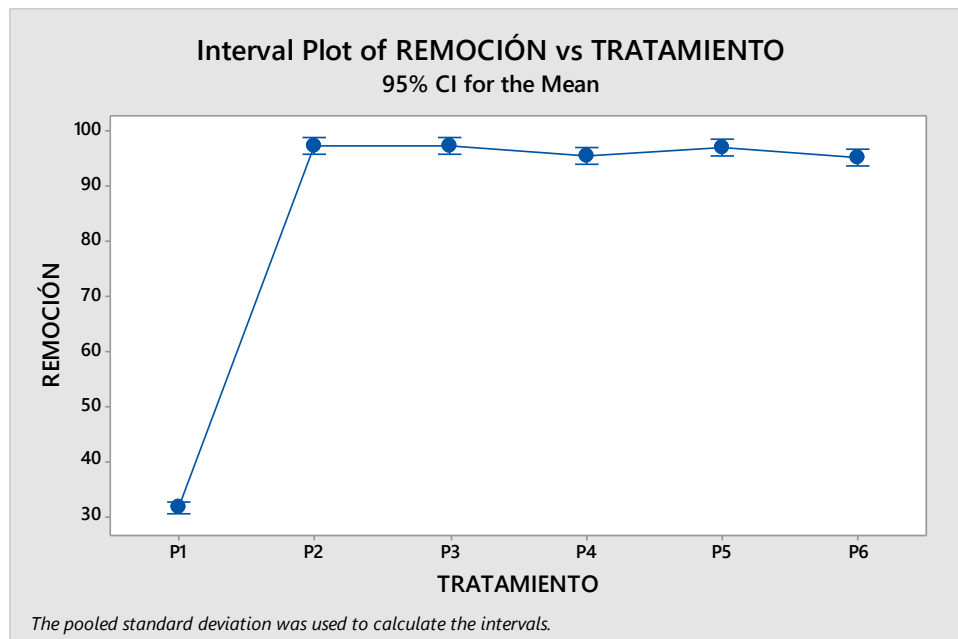


Figura 3.26 Gráfica de intervalos de medias de Remociones y tratamiento del HCS.

En la Figura 3.27 se corrobora que la Permutación 1 (ABC) presenta las medias significativamente diferentes, debido a que es la configuración en serie con eficiencias de remociones más bajas. Además, los intervalos de las Permutaciones 2 a 6 contienen cero, por lo que no presentan diferencias significativas.

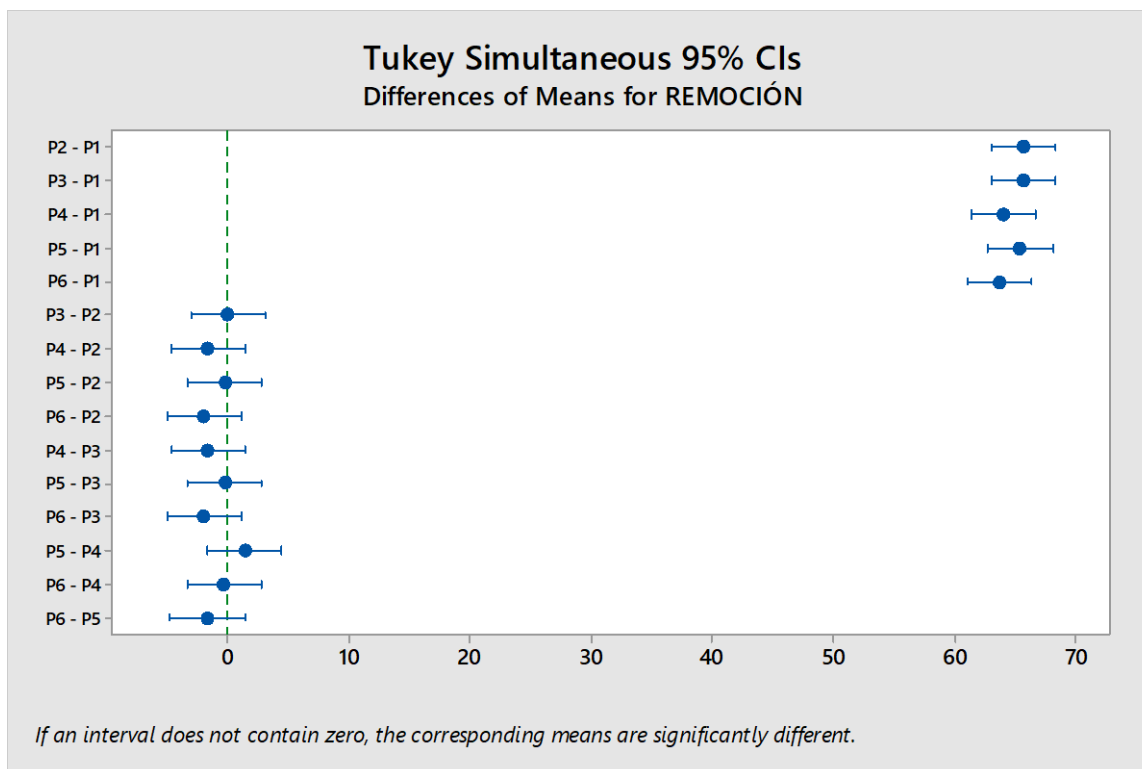


Figura 3.27 Gráfica de comparaciones simultaneas de Tukey en el HCS.

Por otro lado, de manera practica es necesario identificar que Tratamiento (Permutación) puede alcanzar remociones más altas, por lo que, a partir de la Grafica de MCB de Hsu mostrada en la Figura 3.28, estableciendo que la media más alta (mejor remoción de DQO) es el mejor tratamiento, se puede establecer que, si un intervalo tiene cero como punto final, las medias correspondientes son significativamente diferentes, por lo que la Permutación 1 y posiblemente la Permutación 6. Por lo que, se recomienda evaluar nuevamente la permutación 2, 5 y 6 para corroborar los datos obtenidos y definir de manera precisa si no existen diferencias significativas entre las configuraciones del HCS, se puede inferir que la configuración que tiene mayores resultados en general es la Permutación 5 tomando en cuenta los demás parámetros de ST, STV, y nutrientes.

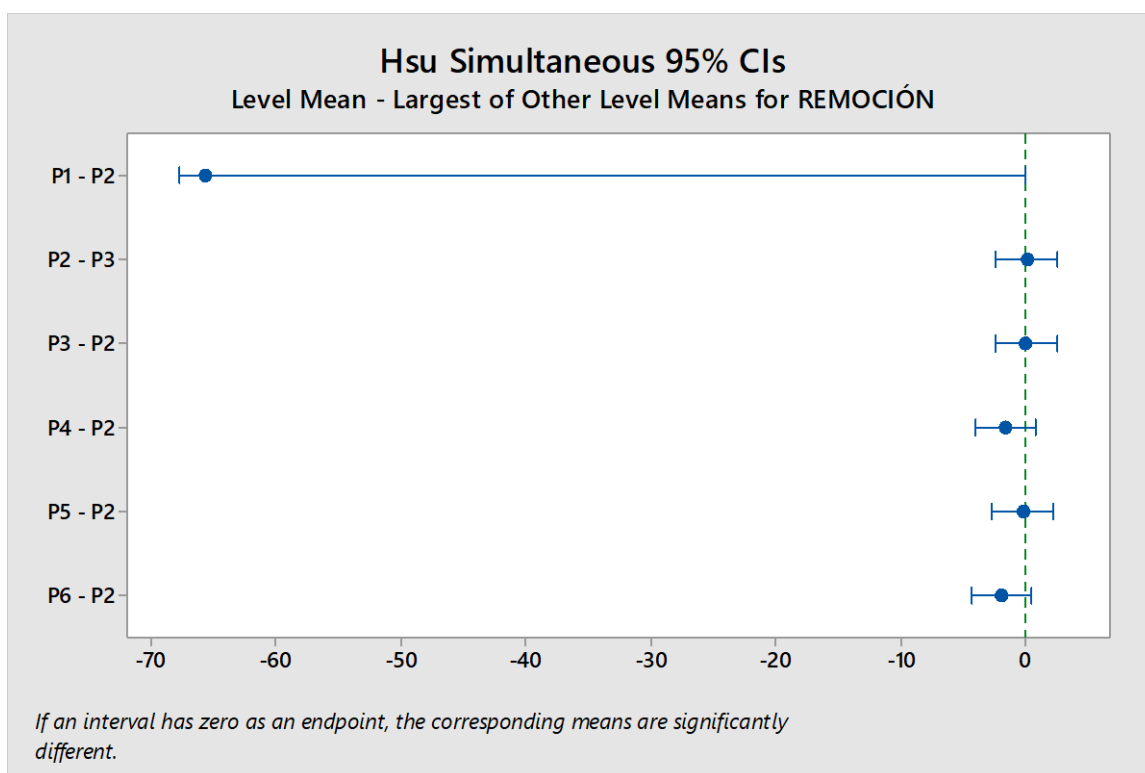


Figura 3.28 Gráfica de Comparaciones múltiples del HCS sin control de Hsu.

CONCLUSIONES

El reactor de hidrólisis anaerobio con el sistema de fibras de nylon poliéster como medio de soporte de la biopelícula, mostró un adecuado comportamiento para realizar la hidrólisis del agua residual combinada del efluente ingenio azucarero-trapiche, a una Cva de 15gDQO/Ld, logrando reducir en un 40 % en promedio dicha carga contaminante.

Los humedales construidos como tratamiento complementario, para la depuración del efluente proveniente del reactor hidrolítico fue adecuado. De manera general la adaptación y supervivencia de la vegetación utilizada fue buena, ya que las condiciones de operación y características del efluente no afectaron su crecimiento y función en los HC configurados en paralelo, lográndose remociones del 90 % de la carga orgánica. Cabe resaltar que es importante el control de la Cva de alimentación, ya que de esto puede alterar el comportamiento en las remociones del sistema híbrido.

El sistema híbrido configurado en serie dio resultados muy favorables. La remoción de materia orgánica medida como DQO_T alcanzó únicamente bajo la configuración en paralelo un promedio de 15.63 %, sin embargo, el mismo humedal construido configurado en serie logra hasta un 78.09 %. Además, para los otros parámetros medidos el HCS registró un 63.66, 70.50 y 86.97 % para ST, NO₃⁻ y PO₃⁴⁻.

Se puede disminuir el TRH para realizar policultivo en la especie *Typha* para disminuir la densidad de las plantas en invierno, se puede utilizar otra especie nativa de humedales o de las especies ornamentales del género *Hippeastrum* ya que han sido de utilidad (Solano, 2020).

RECOMENDACIONES

1. Medición de Carbono Orgánico Total.
2. Medición de Metales pesados y emisiones de gases en el HC.
3. Mantenimiento preventivo para las válvulas y conexiones del HC.
4. Mantenimiento preventivo de las bombas sumergibles.
5. Se recomienda realizar estudios para la utilización del agua de dilución para la actividad microbiana mediante análisis fosfolípidos.
6. Estudio de PCR para identificación de las bacterias aisladas en medios selectivos para conocer el género de las bacterias que intervinieron en todo el proceso.
7. Monitoreo del RBA cada 3 meses para estudiar la biopelícula microbiana.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anasttopolus, I., Bhatnnagar, A., Hameed, B. H., Ok, Y. S. y Omirou, M. (2017). A review on waste-derived adsorbents from sugar industry for pollutant removal in wáter and wastewater. *Journal of Molecular Liquids*

Araneda-Gallardo I. A. (2016). Humedales construidos para tratamiento sustentable de aguas grises: efecto del acople a una celda de combustible microbiana. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/141769>

Balpande, S.S., Mhaske, A., 2017. Quality of sewage water and phytorid technology for its reuse in agriculture. *J. Glob. Biosci.* 6 (6), 5114–5119.

Biswas, P., Mamatha, S., Varghese, K., Johnson, R., Vijay, R., Kumar, R., 2020. 3D printing of high surface area ceramic honeycombs substrates and comparative evaluation for treatment of sewage in Phytorid application. *J. Water Process. Eng.* 37, 101503.

Cao, Q., Wang, H., Chen, X., Wang, R., y Liu, J. 2017. Composition and distribution of microbial communities in natural river wetlands and corresponding constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 98, 40-48

Castelán, E. Análisis y perspectiva del recurso hídrico en México. (2000)

CONAGUA 2010 (Comisión Nacional del Agua). Statistics on water in Mexico, 2010 edition. Mexico: Ministry of Environmental and Natural Resources.

CONAGUA 2018 (Comisión Nacional del Agua). Numeragua. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

Cuéllar, A. y Webber, M. (2008). Cow Power: The Energy and Emissions Benefits of Converting Manure to Biogas. *Environ. Res. Lett.* 3. 10.1088/17489326/3/3/034002.

Davis, L., Edwards, R., Garber, L., Isaacs, B., 1995. A Handbook of Constructed Wetlands, General Considerations, Vol. 1, US Environmental Protection Agency (EPA), Washington DC

DBT, 2019. Manual on constructed wetland as an alternative technology for sewage management in india. Department of BioTechnology (DBT), New Delhi.

Deng, Y., Xu, J., Liu, Y., Mancl, K., 2014. Biogas as a sustainable energy source in China: regional development strategy application and decision making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **35**, 294-303. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.031>

Diener S, Zurbrügg C, Tockner K. Conversion of organic material by black soldier fly larvae: establishing optimal feeding rates. *Waste Management & Research*. 2009;27(6):603-610. doi:10.1177/0734242X09103838

Díaz-Jiménez, P., (2016) Biología floral y reproductiva de *Spathiphyllum cochlearispathum* (Liebm.) Engl. y *Spathiphyllum ortgiesii* Regel (araceae) en la región de Los Tuxtlas, Veracruz, México. Tesis de Maestría. Universidad Veracruzana.

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. 10.1016/S1405-7743(14)70653-5

Espinosa, R., Machado, S., Reymond, A., Carrillo, M.J., y Priadko, N.A., 1990 *Sistemas de utilización del calor en la Industria Azucarera.*, Capítulos IV y V, Ediciones ENPES, La Habana, 162-281.

Farooqi, I.H., Basheer, F., Chaudhari, R.J., 2008. Constructed wetland system (CWS) for wastewater treatment. In: *Proceedings of Taal2007: The 12th World Lake Conference*. 1004–1009.

Güereca L. P., Padilla-Rivera A., Aguilar-Rivera N., 2022. Life Cycle Assessment of nine representative agroindustrial systems of sugar production in Mexico. *Food and Bioproducts Processing* **131**. 164-175 <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.11.001>

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.

Heynes-Silerio S. A., González-Elizondo M. del C.S., Ruacho-González L., González-

Elizondo M. & López-Enríquez I. L., 2017. Vegetación de humedales del municipio de Durango, Durango, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(2), 358–364. doi:10.1016/j.rmb.2017.03.005

Holm-Nielsen, J.B., Oleskowicz-Popiel, P., 2008. The future of biogas in Europe: visions and targets until 2020. In: AEBIOM Workshop. European Parliament, Brussels.

INEGI, (2019). Encuesta Nacional Agropecuaria 2019. Boletín Técnico Informativo. México.

Ingaramo, A.; Heluane, H.; Colombo, M.; Argüello, T. y M. Cesca. 2004. “Uso Eficiente Del Agua En Ingenios Azucareros”. *CET Revista de Ciencias Exactas y Tecnología*. **13**(25). 4-11.

IFC. Corporación Financiera Internacional (2007). Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad. Fabricación de Azúcar.

Jayabalan, T., Matheswaran, M., y 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

Kanani, H., Patel, B., 2017. Domestic wastewater treatment by soil biotechnology. *Int. J. Adv. Res. Innov. Ideas Educ.* **3** (2), 4143–4147.

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.

Liu, D., Ge, Y., Chang, J., Peng, C., Gu, B., Chan, G.Y., Wus, X., 2008. Constructed wetlands in China: recent developments and future challenges. *Front. Ecol. Environ.* **7** (5), 261–268. <http://dx.doi.org/10.1890/070110>.

Marín Montoya, J. P., y Correa Ramírez, J. C. 2010. Evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales en humedales artificiales utilizando la *Guadua angustifolia* Kunth. Tesis doctoral de Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

Mishra, V.K., Otter, P., Shukla, R., Goldmaier, A., Alvarez, J.A., Khalil, N., Ameršek, I., 2018. Application of horizontal flow constructed wetland and solar driven disinfection

- technologies for wastewater treatment in India. *Water Pract. Technol.* **13** (3), 469–480.
- Mitsch, W. J., y Gosselink, J. G. 2007. The value of wetlands: importance of scale and landscape setting. *Ecological economics*, **35**(1), 25-33.
- Moreno-Casasola, P., H. López Rosas, D. Infante Mata, L. Peralta, A. Travieso-Bello y B. Warner. 2009. Environmental and anthropogenic factors associated with coastal wetland differentiation in La Mancha, Veracruz, Mexico. *Plant Ecology* **200** (1): 37- 52
- Montealegre, B. 2010. Evaluacion de dos generos de plantas del orden Zingiberales en humedales construidos para mejorar la calidad del agua del rio Sordo y su efecto en la emisión de gases invernadero. Tesis de la universidad Veracruzana- Xalapa, Veracruz, Mexico.
- 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.
- Morita, M., Sasaki, K., 2012. Factors influencing the degradation of garbage in methanogenic bioreactors and impacts on biogas formation. *Applied Microbiology and Biotechnology* **94** (3), 575-582. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-3953-z>
- Orduña-Gaytán, F., Vallejo Cantú, N. A., Alvarado Lassman, A. (2018). Evaluación de la remoción de contaminantes en humedales artificiales sembrados en monocultivo con plantas ornamentales utilizando el efluente de un reactor anaerobio. Tesis para obtener el título de maestro en ciencias en ingeniería química, TecNM Campus Orizaba. Repositorio TecNM Campus Orizaba. <http://repositorios.orizaba.tecnm.mx:8080/xmlui/handle/123456789/278>
- Royal Botanic Gardens Kew. Plants of the World Online. Recuperado el 25 de Mayo de 2022. <https://powo.science.kew.org/>
- Saba, B., Jabeen, M., Mahmood, T., Aziz, I., 2014. Treatment comparison efficiency of microbial amended agro-waste bio-char constructed wetlands for reactive black textile dye. *Int. Proc. Chem. Biol. Environ. Eng.* 65, 13–16.

Saeed, T., Afrin, R., Al Muyeed, A., Sun, G., 2012. Treatment of tannery wastewater in a pilot-scale hybrid constructed wetland system in Bangladesh. *Chemosphere* 88 (9), 1065–1073.

Saeed, T., Muntaha, S., Rashid, M., Sun, G., Hasnat, A., 2018. Industrial wastewater treatment in constructed wetlands packed with construction materials and agricultural by-products. *J. Cleaner Prod.* 189, 442–453.

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.

Solano De La Cruz, V., Vallejo Cantú, N. A. Alvarado Lassman, A. 2020. Tratamiento de un agua residual azucarera utilizando un sistema híbrido (digestión anaerobia-humedal construido). Tesis para obtener el título de maestro en ciencias en ingeniería química, TecNM Campus Orizaba. Repositorio TecNM Campus Orizaba.

Sánchez-Monedero, M.A., Aguilar, M.I., Fenoll, R., Roig, A., 2008. Effect of the aeration system on the levels of airborne microorganisms generated at wastewater treatment plants. *Water Res.* 42 (14), 3739–3744.

Tilak, A. S., Wani, S. P., Patil, M. D., Datta, A. 2016. Evaluating wastewater treatment efficiency of two field scale subsurface flow constructed wetlands. *Current Science*, **110**(9), 1764–1772. <http://www.jstor.org/stable/24908064>

Tilley, E., Ulrich, L., Luthi, C., 2014. *Compendium of Sanitation Systems and Technologies*, second ed. Eawag.

Uçkun Kiran E., Stamatelatou K., Antonopoulou G., Lyberatos G., 2016. 10 - Production of biogas via anaerobic digestion, *Handbook of Biofuels Production (Second Edition)*, Woodhead Publishing, 259-301.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100455-5.00010-2>.

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. doi:10.1016/j.watres.2013.05.029

Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology* **85** (4), 849-860. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>

Wellinger, A., 2011. Biogas: Simply the Best. European Biogas Association, Brussels, Belgium.

Yazdani, V., Golestani, H, A. 2019. Advanced treatment of dairy industrial wastewater using vertical flow contrudted wetlands. *Desalination and wáter treatment*. 162:149-155.