



Universidad Juárez Autónoma De Tabasco
División Académica De Ciencias Biológicas



Asclepias curassavica L. y especies de césped en el tratamiento de aguas residuales domesticas vía humedales artificiales de flujo subsuperficial

Tesis de Licenciatura

Para obtener el título de:
Ingeniero Ambiental

Presenta:

P.I.A. Manuel Antonio Gerónimo López

Director de tesis:

Dr. Arturo Valdés Manzanilla

Co-Director de tesis:

Dr. Gaspar López Ocaña

Villahermosa, Tabasco

Mayo de 2022

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Asclepias curassavica L. y especies de césped en el tratamiento de aguas residuales domesticas vía humedales artificiales de flujo subsuperficial

Por Manuel Antonio Gerónimo López

CANTIDAD DE PALABRAS 16868

HORA DE ENTREGA

27-JUN-2025 11:20A. M

NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO

116953563

Asclepias curassavica L. y especies de césped en el tratamiento de aguas residuales domesticas vía humedales artificiales de flujo subsuperficial

INFORME DE ORIGINALIDAD

17%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	www.conabio.gob.mx Internet	388 palabras — 3%
2	hdl.handle.net Internet	354 palabras — 2%
3	www.archivos.ujat.mx Internet	267 palabras — 2%
4	www.ciba.org.mx Internet	150 palabras — 1%
5	docplayer.es Internet	115 palabras — 1%
6	repositorio.unicach.mx Internet	105 palabras — 1%
7	www.researchgate.net Internet	104 palabras — 1%
8	aldeser.org Internet	96 palabras — 1%
9	repositorio.uncp.edu.pe Internet	73 palabras — < 1%
10	repositorio.ucv.edu.pe	

Internet

72 palabras — < 1%

11 repositorio.espam.edu.ec
Internet

66 palabras — < 1%

12 aprenderly.com
Internet

62 palabras — < 1%

13 pcientificas.ujat.mx
Internet

49 palabras — < 1%

14 ponga-sirve.fun
Internet

41 palabras — < 1%

15 repositorio.unac.edu.pe
Internet

38 palabras — < 1%

16 idoc.pub
Internet

37 palabras — < 1%

17 tlamati.uagro.mx
Internet

35 palabras — < 1%

18 revistatyca.org.mx
Internet

32 palabras — < 1%

19 www.semanticscholar.org
Internet

31 palabras — < 1%

20 go.gale.com
Internet

26 palabras — < 1%

21 www.epa.vic.gov.au
Internet

26 palabras — < 1%

22 www.permacultura.org.mx
Internet

26 palabras — < 1%

23	dialnet.unirioja.es Internet	25 palabras — < 1%
24	repositorio.untumbes.edu.pe Internet	25 palabras — < 1%
25	www.grafiati.com Internet	25 palabras — < 1%
26	catalogoinsp.mx Internet	24 palabras — < 1%
27	dof.gob.mx Internet	24 palabras — < 1%
28	modified-argon-95704.appspot.com Internet	24 palabras — < 1%
29	rmiq.org Internet	24 palabras — < 1%
30	dspace.unitru.edu.pe Internet	19 palabras — < 1%
31	bibliotecadigital.udea.edu.co Internet	18 palabras — < 1%
32	ciencia.lasalle.edu.co Internet	17 palabras — < 1%
33	rraaecedia.edu.ec Internet	16 palabras — < 1%
34	documentop.com Internet	15 palabras — < 1%

EXCLUIR CITAS

ACTIVADO

EXCLUIR FUENTES

DESACTIVADO

EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA

ACTIVADO

EXCLUIR COINCIDENCIAS < 15 PALABRAS

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2022 *Ricardo Flores Magón*
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

MARZO 01 DE 2022

**C. MANUEL ANTONIO GERÓNIMO LÓPEZ
PAS. DE LA LIC. EN ING. AMBIENTAL
P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se les autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Diseño de Equipo, Máquina o Software Especializado denominado: "**Asclepias curassavica L. Y ESPECIE DE CÉSPED EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS VÍA HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL**", asesorado por el Dr. Arturo Valdés Manzanilla y Dr. Gaspar López Ocaña, sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por el Dr. Raúl German Bautista Margulis, M. en C. Carlos Alberto Torres Balcázar, Dr. Gaspar López Ocaña, M.I.P.A. Rocío López Vidal y M.I.P.A. Mario José Romellón Cerino.

**A T E N T A M E N T E
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCION EN LA FE**

**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR**

C.c.p.- Expediente del Alumno.
Archivo.

U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN

CARTA AUTORIZACIÓN

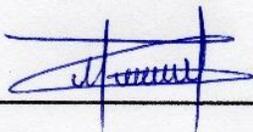
El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de Licenciatura denominado: "**Asclepias curassavica L. Y ESPECIE DE CÉSPED EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS VÍA HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL**", de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco el Trabajo Recepcional antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en éste documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco el Día 01 de Marzo de Dos Mil Veintidós.

AUTORIZO



MANUEL ANTONIO GERÓNIMO LÓPEZ



AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios por concederme la dicha de llegar a este momento de mi vida, por darme la sabiduría, la fuerza y paciencia para poder culminar este trabajo, al igual por poner las personas correctas en mi camino.

A la universidad Juárez Autónoma de Tabasco por haber brindado las herramientas y equipos para mi educación y a mis maestros por formarme profesionalmente como ingeniero ambiental.

Al Dr. Gaspar López Ocaña por recibirme en el Laboratorio de Tecnología del Agua, por guiarme, orientarme y facilitarme el equipo necesario para realizar mi tesis, también por ser un gran profesionalista y persona que me motivo a seguir adelante y extender aún más mis conocimientos sobre el área.

Al Dr. Arturo Valdés Manzanilla por apoyarme en este proyecto para poder obtener mi título universitario.

A mi comité sinodal integrado por el Dr. Raúl Bautista Margulis, M en C. Carlos Torres Balcázar, Dra. Roció López Vidal y al MIPA. Mario Remellón Cerino por dedicar el tiempo al revisar mi trabajo y darme las correcciones pertinentes.

A mis compañeros y amigos Samuel, Ing. Nancy, Ing. Néstor, Mtra. Anel y todos los que conforman el Laboratorio de la Tecnología del Agua por ayudarme y resolver las dudas que se me generaban durante realizaba mi tesis.

A mis grandes amigos Irma, Cristina, Iván, Ana, Victoria, Casarrubias y Sofía por siempre alentarme y apoyarme a lo largo de mi carrera como estudiante de ingeniería ambiental y durante este proyecto.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi madre por siempre estar a mi lado, por sus desvelos, por guiarme siempre por el buen camino y ser un gran ejemplo.

A mi padre por su esfuerzo admirable, por todos los sacrificios que hizo para poder brindarme una educación, por siempre priorizar su familia, ser un gran ejemplo de trabajo, dedicación y motivarme a crecer como profesionalista.

A mi hermano Alex, mi hermana menor Mary y a mis primas Ceci y Cynthia por ser mis compañeros de vida y por ayudarme cada vez que lo necesitaba.

A mis abuelos por siempre estar ahí aconsejándome y dando su apoyo incondicional.

Manuel Antonio Gerónimo López



CONTENIDO

1. RESUMEN.....	9
2. INTRODUCCIÓN.....	10
3. JUSTIFICACIÓN.....	12
4. ANTECEDENTES.....	13
4.1 <i>Asclepias curassavica</i> L.....	13
4.2 Ámbito Internacionales.....	14
4.3 Ámbito Nacionales.....	15
4.4 Ámbito Regional.....	16
5. HIPÓTESIS.....	18
5.1 Hipótesis 1.....	18
5.2 Hipótesis 0.....	18
6. OBJETIVOS.....	18
6.1 General.....	18
6.2 Específicos.....	18
7. MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
7.1 Generalidades del proyecto.....	19
7.2 Área de estudio.....	20
7.3 Características del diseño experimental.....	21
7.3.1 Tanques de control.....	21
7.3.2 Unidades experimentales de Humedales Artificiales (HA).....	22
7.4 Etapas de operación del proyecto de investigación.....	23
7.4.1 Etapa de arranque.....	23
7.4.2 Etapa de estabilización.....	23
7.4.3 Etapa de evaluación.....	23
7.5 Actividades de campo.....	23
7.5.1 Colecta de la vegetación.....	23
7.5.2 Caracterización de la vegetación.....	24
7.5.3 Siembra de la vegetación en las unidades experimentales.....	24
7.5.4 Evaluación del crecimiento y comportamiento de la vegetación.....	26



7.5.5	Medición de Caudal.....	26
7.5.6	Monitoreos de la calidad del agua.	26
7.6	Actividades de laboratorio.....	27
7.6.1	Caracterización del medio de soporte:.....	27
7.6.2	Análisis de la calidad del agua.	29
7.7	Actividades de gabinete.....	30
7.7.1	Determinación del Tiempo de Retención Hidráulico (TRH).....	30
7.7.2	Determinación de la eficiencia de remoción.....	30
7.7.3	Análisis estadísticos.....	31
8.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
8.1	Características del medio de soporte.....	32
8.1.1	Etapas de evaluación.....	32
8.2	Evaluación del crecimiento y comportamiento de las especies.....	35
8.2.1	Características iniciales.....	35
8.2.2	Etapas de estabilización.....	35
8.2.3	Etapas de evaluación.....	36
8.3	Gasto de operación.....	39
8.3.1	Etapas de evaluación.....	39
8.4	Calidad del agua.....	40
8.4.1	Potencial de hidrógeno (pH).....	41
8.4.2	Temperatura.....	41
8.4.3	Sólidos disueltos totales (SDT).....	42
8.4.4	Color.....	43
8.4.5	Conductividad eléctrica (CE).....	43
8.4.6	Oxígeno disuelto (OD).....	44
8.4.7	Turbiedad.....	45
8.4.8	Potencial Oxido Reducción (POR).....	45
8.5	Eficiencia de remoción.....	46
8.5.1	Potencial de Hidrogeno.....	46
8.5.2	Temperatura.....	47
8.5.3	Conductividad eléctrica.....	47
8.5.4	Sólidos Disueltos Totales.....	47



8.5.5	Color.....	47
8.5.6	Oxígeno disuelto.....	47
8.5.7	Turbiedad.....	47
8.5.8	Potencial oxido reducción.....	48
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	49
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	50
11.	ANEXOS TABLAS.....	55
12.	ANEXO IMÁGENES.....	56

TABLAS

Tabla 1.	Información General - Asclepias curassavica L.....	13
Tabla 2.	Métodos y equipos empleados para el análisis de la calidad del agua.....	30
Tabla 3.	Características promedio (\pm DE) del medio de soporte (N=27).....	32
Tabla 4.	Datos de biomasa bacteriana adherida al medio de soporte (mg/Kg) obtenidos en el HAFS-AC y en el HAFS-B a diferentes distancias y profundidades en el HAFS (N=27).....	33
Tabla 5.	Valores promedio (\pm DE) de la vegetación Asclepias Curassavica L. en el reactor experimental previo a la siembra (N=5).....	35
Tabla 6.	Valores promedio (\pm DE) de la vegetación Asclepias Curassavica L. en el reactor experimental “etapa de estabilización” (N=5).....	35
Tabla 7.	Valores promedio (\pm DE) de la vegetación Asclepias Curassavica L. en el reactor experimental “etapa de evaluación” (N=5).....	36
Tabla 8.	Datos obtenidos para el césped.....	37
Tabla 9.	Valores promedios (\pm DE) de la calidad del agua del tratamiento en el HAFS-AC en la etapa de evaluación (N=72).....	40
Tabla 10.	Valores promedios (\pm DE) de la calidad del agua del tratamiento en el HAFS-B en la etapa de evaluación (N=72).....	40
Tabla 11.	Eficiencias de remoción en HAFS-AC y HAFS-B.....	46
Tabla 12.	Materiales y costos para construcción y mantenimiento de las unidades experimentales.....	55
Tabla 13.	Costos de análisis de laboratorio.....	55

FIGURAS

Figura 1.	Diagrama de actividades desarrollados durante el proyecto.....	19
Figura 2.	Localización Satelital de Humedales Artificiales y Laboratorio de la Tecnología del Agua. Fuente: Google Earth, 2021.....	20
Figura 3.	Diseño experimental. Fuente: Elaboración propia.....	21
Figura 4.	Tanques de control del agua residual.....	22
Figura 5.	Dimensiones del diseño de unidades experimentales de HA de López Ocaña et al. (2014).....	22
Figura 6.	Puntos de recolección de vegetación. Fuente: Google Earth, 2021.....	24



Figura 7. Método de sembrado Tres Bolillos con <i>Asclepias curassavica</i> L. en HAFS-AC. Fuente: Elaboración propia.	25
Figura 8. Distancia y profundidad de los puntos de muestreo del medio de soporte. Fuente: Elaboración propia.	29
Figura 9. Distribución de la biomasa microbiana adherida al medio de soporte en el HAFS-AC. ...	34
Figura 10. Distribución de la biomasa microbiana adherida al medio de soporte en el HAFS-B. ...	34
Figura 11. Crecimiento promedio de la <i>Asclepias curassavica</i> L. durante los meses de operación. ...	37
Figura 12. Pulgón amarillo del sorgo.	38
Figura 13. Oruga de <i>Danaus plexippus</i> sobre tallo de <i>Asclepias curassavica</i> L.	38
Figura 14. Gasto diario de operación – etapa de evaluación (N=25).	39
Figura 15. Gasto horario de operación – etapa de evaluación (N=25).	39
Figura 16. Valores medianos de pH – etapa de evaluación. Letras diferentes indican diferencias ($p < 0.05$) y un nivel del 5% de significación (N=60).	41
Figura 17. Valores medianos de temperatura – etapa de evaluación. Letras diferentes indican diferencias ($p < 0.05$) y un nivel del 5% de significación (N=60).	42
Figura 18. Valores medianos de SDT – etapa de evaluación. Letras diferentes indican diferencias ($p < 0.05$) y un nivel del 5% de significación (N=60).	42
Figura 19. Valores medianos de Color – etapa de evaluación. Letras diferentes indican diferencias ($p < 0.05$) y un nivel del 5% de significación (N=60).	43
Figura 20. Valores medianos de Conductividad eléctrica – etapa de evaluación. Letras diferentes indican diferencias ($p < 0.05$) y un nivel del 5% de significación (N=60).	44
Figura 21. Valores medianos de Oxígeno Disuelto – etapa de evaluación. Letras diferentes indican diferencias ($p \geq 0.05$) y un nivel del 5% de significación (N=60).	44
Figura 22. Valores medianos de Turbiedad – etapa de evaluación. Letras diferentes indican diferencias ($p < 0.05$) y un nivel del 5% de significación (N=60).	45
Figura 23. Valores medianos de Potencial Oxido Reducción – etapa de evaluación. Letras diferentes indican diferencias ($p < 0.05$) y un nivel del 5% de significación (N=60).	46
Figura 24. Mantenimiento correctivo de las unidades experimentales de HA.	56
Figura 25. Lavado del medio de soporte.	56
Figura 26. Medio de soporte en la unidad experimental de HA.	56
Figura 27. Colecta de vegetación.	57
Figura 28. Caracterización inicial de la vegetación.	57
Figura 29. Muestreo del agua residual.	57
Figura 30. Toma de muestras del medio de soporte.	57
Figura 31. Análisis de la calidad del agua.	57
Figura 32. Extracción y pesado de pasto.	57
Figura 33. Muestras del agua residual.	58
Figura 34. Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial al final de proyecto.	58



1. RESUMEN

En este trabajo se estudió la capacidad de remoción de contaminantes básicos (pH, temperatura, SDT, color, turbiedad, OD y POR) con la especie *Asclepias Curassavica* L. y especies de césped en un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, para determinar el potencial de fitorremediación de aguas residuales que permita cumplir con lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-2021 en descarga a cuerpos receptores.

Para este trabajo se utilizaron seis unidades experimentales de humedales artificiales de flujo subsuperficial (tres testigos HAFS-B y tres con vegetación HAFS-AC) con dimensiones de 1.2 m de ancho, 2.5 m de largo y 1.0 m de altura con un tirante operativo de 0.5 m de grava de $\frac{3}{4}$ " de \varnothing , con capacidad de tratamiento de Q_{promedio} de 211 L/día. En la unidad experimental con vegetación se colocaron 21 ejemplares de la especie *Asclepias Curassavica* L. y fueron sembradas a través del método de Tresbolillo (HAFS-AC) y en la segunda unidad solo dispuso el medio de soporte como blanco (HAFS-B). Del mismo modo para amortiguar la temperatura en él HA se sembraron 20 cuadros de césped de los géneros *Phyla*, *Digitaria*, *Acmella* y *Murdannia*, de 10 cm por 10 cm, distribuidos aleatoriamente.

Es importante mencionar que en estas dos unidades se evaluaron los parámetros ya antes mencionados para identificar si la especie es capaz de remover dichos contaminantes del agua residual doméstica. Al finalizar el experimento se observó que la especie *Asclepias curassavica* L. se adaptó a las condiciones de los humedales y del agua residual. Al final del estudio se registró un número de 39 ejemplares. Las especies de césped también se reprodujeron en el HAFS, el césped cubrió el área total del HAFS el cual era de 3m^2 .

El HAFS-AC operó con un TRH 3.7 días, alcanzando eficiencias de remoción para los parámetros de pH, temperatura, conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (SDT), turbiedad, color, oxígeno disuelto (OD) y potencial óxido-reducción (POR) de -0.02%, 2.14%, -13.47%, -6.77%, 32.45%, -0.77%, 9.97% y 138.50%, respectivamente, mientras que el HAFS-B con TRH 3 días alcanzando eficiencias de remoción de -6.13%, -0.23%, 41.31%, 42.11%, 68.92%, 69.26%, 6.47% y 153.58%, respectivamente.



2. INTRODUCCIÓN

El tratamiento de las aguas residuales es un tema de gran importancia, ya que su disposición no solo en cantidad, si no en calidad, es vital para las condiciones adecuadas de vida del ser humano (León & Cuevas, 2016). En general, las aguas residuales domésticas son los líquidos provenientes de las viviendas o residencias, edificios comerciales e institucionales, que afecta de alguna manera la calidad del agua de la fuente o cuerpo de agua receptor cuando contiene características que la hacen inaceptable para el uso (Romero Rojas, 1999).

La falta de sistemas que traten las aguas residuales es un problema que se está agravando con el paso del tiempo debido al aumento poblacional generando descargas de aguas crudas sin tratamiento a los cuerpos de aguas, la cual es depositada en los cuerpos de agua en algunos países sin ningún tratamiento previo, afectando la autodepuración de dicho cuerpo de agua. Por lo tanto, es una necesidad fundamental implementar tecnologías que no sean agresivas hacia el mismo medio ambiente y económicamente rentable, pues las tecnologías convencionales sólo han transferido los contaminantes a otras fases (López, Torres, Bautista, Hernández, Cruz & Ferrer, 2014).

Existen diferentes tipos de tratamientos que se le pueden dar a las aguas residuales y entre ellas destacan los sistemas de humedales artificiales, ya que se pueden desarrollar con los medios disponibles de la zona (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010). Los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales son sistemas no convencionales que no requieren energía eléctrica ni equipos costosos para su funcionamiento, demanda poca capacitación para sus operadores y por ser un sistema natural, sus costos de tratamiento son más bajos que los de cualquier tecnología convencional (Sierra & López, 2013).

En el presente trabajo se estudió la capacidad de remoción de contaminantes con la especie *Asclepias Curassavica* L. y las asociadas (*Digitaria ciliaris* (Retz.) Koeler, *Phyla nodiflora* (L.) Greene, *Acmella caulirhiza* Delile y *Murdannia nudiflora* (L.) Brenan) en un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, con base a lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-2021 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, evaluando los parámetros de pH, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, turbiedad, color, potencial óxido reducción, oxígeno disuelto y demanda química de oxígeno. Se hizo el uso de seis unidades experimentales, una que contará con medio de soporte y 21 ejemplares de la especie *Asclepias Curassavica* L. a estudiar, que serán sembradas a través del método de siembra de Tresbolillo (HAFS) y la segunda que solo dispondrá del medio de soporte y que tendrá la función de blanco (HAFSB). Es importante mencionar que en estas dos unidades se evaluarán y compararán los parámetros ya antes mencionados para poder concluir si la especie que será estudiada es capaz de remover contaminantes en agua residuales domésticas.



Las unidades experimentales tendrán las dimensiones de 2.5 m de largo, 1.2 de ancho y 1 de profundidad, los cuales dispondrán de un medio de soporte que será grava de río de $\frac{3}{4}$ de in, este se colocara hasta un tirante hidráulico de 0.5 m.



3. JUSTIFICACIÓN

El Foro Económico Mundial nos dice en su Informe de Riesgos Mundiales 2019 que reconoce al agua como uno de los retos con mayor presión social, política y económica en el ámbito global y deja claro que casi toda actividad humana está entrelazada con el agua (World Economic Forum, 2019). La contaminación del agua es un problema a escala mundial, no solo afecta a unos cuantos, por tal motivo es tarea de todos contribuir a cuidar este gran recurso con el que contamos todos nosotros y que nos es mucha utilidad tanto para nuestra existencia como para realizar muchas de nuestras actividades diarias (Guadarrama, Kido, Roldan y Salas, 2016).

A nivel global, 2400 millones de personas carecen de acceso a servicios básicos de saneamiento, lo cual provoca que más del 80% de las aguas residuales se descarguen en ríos o vayan directo al mar sin ningún tipo de tratamiento. En México, el saneamiento de las aguas residuales municipales alcanzó el 52.72% en el año 2015, cifra que se encuentra por debajo de otros países de América Latina y el Caribe, en donde Argentina y Chile superan el 80% de cobertura del servicio (Sánchez, 2017). Una de las principales causas de la situación deficitaria en la que se encuentra el tratamiento de las aguas residuales a nivel mundial, es el alto costo que implica la construcción de un sistema de tratamiento convencional de depuración de aguas (Carbajal, Zapattini y Quintero, 2018).

El tratamiento de aguas residuales domésticas en asentamientos humanos es un problema que compete al desarrollo sostenible, para el saneamiento de estas aguas han surgido una serie de tecnologías, una de ellas son las denominadas tecnologías alternativas y entre ellas encontramos los Humedales Artificiales, los cuales se caracterizan por su procedimiento simple, costos de insumos bajos comparativamente con respecto a las convencionales, bajos costos de energía eléctrica y de mantenimiento (Díaz, Alvarado y Camacho, 2012).

Los HAFS son una adecuada alternativa para el tratamiento de aguas residuales, ya que son soluciones integrales con adecuadas eficiencias y bajos costos para la remoción de contaminantes (W. J. Asprilla et al., 2020), es por ello que este proyecto de investigación se buscó evaluar la especie *Asclepias Curassavica* L. para identificar el potencial de fitorremediación de aguas residuales en un HA de flujo subsuperficial a través de la evaluación de los parámetros de pH, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, turbiedad, color, potencial óxido reducción y oxígeno disuelto en base a la NOM-001-SEMANART-2021.



4. ANTECEDENTES

4.1 *Asclepias curassavica* L.

Tabla 1. Información General - *Asclepias curassavica* L.

Nombre científico	<i>Asclepias curassavica</i> L.
--------------------------	---------------------------------

Imagen



Nombres comunes	Hierba María y burladora (Michoacán), cancecillo, chilillo, chontalpa, flor de culebra (Oaxaca), cochinita y cajón de gato (Guanajuato y Querétaro), plato y taza, pedo de culebra (Veracruz), pelo de gato, ponchilhuits, ponchishui (Veracruz y Yucatán), ponchixius (Yucatán), ponchihuiche, quiebra muelas (Tabasco), señorita (Nayarit y Jalisco), sintescochit (Hidalgo), soldaditos (Puebla), veintiunilla (Guanajuato y Querétaro), venenillo y veneno rojo (Guerrero), vibora (Chiapas).
Orden	Gentianales.
Familia	Apocynaceae.
Distribución	Aguascalientes, Baja California Norte, Baja California Sur, Campeche, Chiapas, Colima, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Nuevo León, Oaxaca, Querétaro, Quintana Roo, Sinaloa, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán.
Hábitat	Es originaria de Sudamérica. Habita en climas cálido, semicálido, seco y templado, desde el nivel del mar hasta los 1900 msnm. Observada en terrenos baldíos, cerca de casas, orilla de caminos y riachuelos, asociado a borde de Manglar, Bosque Tropical Caducifolio, Subcaducifolio, Subperennifolio y Perennifolio, Matorral Xerófilo, Pastizal Inducido, Bosque Mesófilo de Montaña, de Encino, Pino y Mixto de Encino-Pino (Hernández, 2013).
Tamaño	30 a 100 cm de altura.
Tallos	De 30 a 100 cm de alto.
Hojas	Opuestas, pecíolos de 1 a 2 cm de largo, láminas elípticas a angostamente elípticas, de 7.5 a 18 cm de largo y de 1 a 3 cm de ancho, ápice agudo a acuminado, base obtusa o decurrente, membranáceas, puberulentas a glabra (sin pelos).

Asclepias curassavica L y especies de césped en el tratamiento de aguas residuales domesticas vía humedales artificiales de flujo subsuperficial.

PIA. Manuel Antonio Gerónimo López



Flores Bisexuales, con simetría radial, sobre pedicelos de 1 a 2 cm de largo, puberulentos; con 5 sépalos y los 5 pétalos completamente curvados hacia atrás (reflejos); enseguida se encuentran 5 lóbulos ahuecados como “copas” (llamados capuchones), cada uno presenta un pequeño “cuerno” (llamado cornículo), los capuchones con sus respectivos cornículos constituyen lo que se llama la corona; los 5 estambres se encuentran muy modificados, sus filamentos anchos y aplanados cubren casi por completo al gineceo dejando solo las 5 ranuras (llamados riel guía) que quedan entre ellos, las anteras se unen por el ápice entre sí formando una especie de “tapa” que cubre también por arriba al gineceo dejando únicamente 5 “ventanas”. Toda esta estructura integrada por los estambres y el gineceo se llama ginostegio. Específicamente, los sépalos están unidos solo en la base, de aproximadamente 3 mm de largo y de 1 mm de ancho, ovado-lanceolados, con el ápice agudo, glabros en el haz y puberulentos en el envés; corola de color rojo escarlata, rara vez amarillo, sus pétalos de aproximadamente 7.5 mm de largo y de aproximadamente 3.2 mm de ancho, elípticos, con el ápice obtuso, glabros, unidos solo en la base formando un tubo de 0.5 mm de largo; ginostegio de aproximadamente 4.5 mm de largo, conspicuamente estipitado; los capuchones de 3.5 a 4 mm de largo, incurvado-estipitados, con el ápice redondeado.

Frutos y Semillas Los frutos son secos y se abren por la sutura ventral (se llaman folículos), se encuentran sobre pedicelos erectos, son angostamente fusiformes, de 0.6 a 1 cm de largo y de 1.5 a 2 cm de ancho, con la superficie lisa y glabrescente.

Temperatura Rango ideal para esta especie está entre los 25-35°C.

Nota: La elaboración de esta tabla fue realizada a través de información de diferentes autores.

Fuente: CONABIO (2009); Mederos (s.f.) y Hernández (2013).

4.2 Ámbito Internacionales

- Minchola y Gonzalez (2013), evaluaron el potencial y la viabilidad de uso de un Humedal de Flujo Subsuperficial (HAFS) en el tratamiento de agua residual doméstica con el objetivo de mitigar el impacto en la minera “Barrick” ubicada en Los Andes Peruanos, Perú. Se tomaron muestras en la entrada y salida del humedal. Se determinaron las concentraciones de la demanda bioquímica de oxígeno en cinco días [DBO₅, entrada (E) 36.80 – salida (S) 9.80 mg/L], sólidos suspendidos totales (SST, E 69.33 – S 11 mg/L), coliformes fecales (CF, E 135x10⁴ – S 9.5 x10⁴ NMP/100 ml), CT (E 670x10⁴ – S 96.3x10⁴ NMP/100 ml), potencial de hidrogeno (pH, E 7.72 – S 7.07), temperatura (T, E 19.8 – S17.2°C) y oxígeno disuelto (OD, E 0.26 – S 3.12 mg/L) con respecto al tiempo de retención hidráulico óptimo (TRH, 10 días). Se determinó la remoción porcentual DBO₅, SST, CF, CT y la tasa de incremento de oxígeno. Los resultados permitieron estimar la eficiencia de remoción del DBO₅ (73%), SST (84%), CF (93%), CT (86%), y la tasa de incremento de oxígeno disuelto fue del 18.73%. Se concluyó que los HAFS son eficientes en la remoción de contaminantes e incremento de oxígeno disuelto.

Asclepias curassavica L y especies de césped en el tratamiento de aguas residuales domesticas vía humedales artificiales de flujo subsuperficial.

PIA. Manuel Antonio Gerónimo López



- Alfaro, Pérez y Solano (2013), evaluaron un HAFS para el tratamiento de aguas residuales del restaurante y dos lavatorios del Museo de Cultura Popular de la Universidad Nacional de Costa Rica. Las dimensiones del HAFS fueron de 8 m de largo, 2.5 m de ancho y 0.7 m de profundidad. Manejaron un caudal operativo el cual fue de 1.8 m³/d y un TRH de 7 días. Las concentraciones que se obtuvieron en este tratamiento para DQO fue de 17 mg/L, DBO de 10 mg/L, Fosforo Soluble (P-PO₄) de 0.24 mg/L y solidos sedimentables (SS) de 0.1 mg/L, obteniéndose parámetros de salida que cumplieron con la legislación vigente.
- Bedoya, Ardila y Reyes (2014), implementaron un HAFS para el tratamiento de agua residual generada por la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia (IUCMA). Se llevó a cabo una evaluación comparativa de la eficiencia de remoción de diferentes parámetros fisicoquímicos y microbiológicos: DBO₅, DQO, SST, nitrógeno amoniacal (NA), nitrógeno total (NT), fósforo, CT, CF, turbiedad y color, en dos humedales independientes (uno con *Typha latifolia* y otro con *Cyperus papyrus*). Los TRH para el HAFS con *T. latifolia* fue de 9 días y para el HAFS con *C. papyrus* de 7 días. Los resultados que se obtuvieron para el HAFS con *T. latifolia* fueron los siguientes: DBO₅ E 255 mg/L – S 42.8 mg/L, DQO E 326.9 mg/L – S 150.7 mg/L, SST E 67 mg/L – S 3 mg/L, NA E 54.9 mg/L – S 23.7 mg/L, NT E 202.2 mg/L – S 86.2 mg/L, fósforo E 13.2 mg/L – S 0.376 mg/L, CT E >2400 NMP/100ml – S 430 NMP/100ml, CF E 1100 NMP/100ml – S 16 NMP/100ml, turbiedad E 33 NTU – S 5.1 NTU y color E 583 UPC – S 53 UPC. Por otro lado, los datos de salida con *C. papyrus* fueron los siguientes: DBO₅ 43.5 mg/L, DQO 170.4 mg/L, SST 40 mg/L, NA 37.5 mg/L, NT 90.3 mg/L, fósforo 0.542 mg/L, CT 1100 NMP/100ml, CF 150 NMP/100ml, turbiedad 4.2 NTU y color 45 UPC. Los mayores niveles de remoción de DQO (70.4%), DBO₅ (96.7%) y SST (81.4%) presentes en el agua residual de la IUCMA, se obtuvieron en el humedal que contenía la especie *T. latifolia*.

4.3 Ámbito Nacionales

- Marín (2016), evaluó la remoción de contaminantes en aguas residuales por medio de HAFS en el municipio de Actopan, Veracruz, México. Se utilizaron 12 microcosmos, 6 con tepezil (ST) y 6 con piedra porosa de río (PPR) como sustrato con un TRH de 3 días. Tres microcosmos tuvieron ST con *Typha spp*, como control tres microcosmos sin plantas, los 6 restantes tuvieron la misma distribución solo que con el sustrato PPR. Las concentraciones en los parámetros evaluados para ambos HAFS con *Typha spp* y los sustratos PPR - ST fueron los siguientes: nitratos de E 8.5 a 10 mg/L – S 3 a 4 mg/L, fosfato de E 8 a 10 mg/L – S entre 3 a 5 mg/L, DBO₅ E 110 a 130 mg/L – S 10 a 40 mg/L. Se obtuvieron remociones significativamente mayores en los tratamientos con presencia de vegetación sin importar los tipos de sustratos utilizados (55-65% para ambos sustratos).

- Ojeda, Romero, Reyes, Gallegos y Herrera (2014), evaluaron la eficiencia de depuración de agua gris en un HAFS horizontal a nivel piloto en Morelia, Michoacán. Se utilizó la especie macrófita *Typha domingensis* y como sustrato arena fina de 0.2 mm y

Asclepias curassavica L y especies de césped en el tratamiento de aguas residuales domesticas vía humedales artificiales de flujo subsuperficial.

PIA. Manuel Antonio Gerónimo López



grava de 3 cm de diámetro. El TRH fue de 9 días. Los resultados medios en los análisis para los parámetros evaluados fueron los siguientes: DQO E 975 mg/L – S 244 mg/L, SS E 131 mg/L – S 39 mg/L, pH E 8.2 – S 7.9 y conductividad eléctrica (CE) E 2264 $\mu\text{s}/\text{cm}$ – S 1637 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Registraron porcentajes de DQO con una remoción promedio del 71%, y del 73% para SS y del 53% de CE.

4.4 Ámbito Regional

- Solís, López, Bautista, Hernández y Remellón (2016), implementaron humedales artificiales de flujo libre (HAFL) operando con *Typha domingensis* y *Eichhornia crassipes*, HAFS empleando *Paspalum paniculatum* y *Cyperus articulatus* L para remover contaminantes del agua residual en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT). También implementaron lagunas sin vegetación y lagunas con grava como controles. La capacidad de tratamiento de cada HA fue de 200 L/día. Los TRH fueron de 5.5 y 7.5 días para los HAFL y HAFS, respectivamente. Empearon un análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis para evaluar diferencias significativas entre los cuatro tratamientos y los controles. Él HA que presentó la mayor eficiencia de remoción de contaminantes del agua residual fue el de HAFL utilizando *T. domingensis* con valores de influente y efluente para turbiedad de E 143 NTU – S 4.1 NTU, color E 1424 UC – S 236 UC, DQO E 891.1 mg/L – S 19.7 mg/L, DBO₅ E 398.5 mg/L – S 9.9 mg/L, NT E 73.3 mg/L – S 2.1 mg/L, fosforo total (PT) E 15.8 mg/L – S 1.4 mg/L, SST E 295.3 mg/L – S 6.9 mg/L y remociones de 97.1%, 83.4%, 97.8%, 97.5%, 97.2%, 91.1% y 97.7% respectivamente, seguido por el HAFS empleando *P. paniculatum* con turbiedad de E 143 NTU – S 6.0 NTU, color de E 1424 UC – S 226 UC, DQO de E 891.1 mg/L – S 19.7 mg/L, DBO₅ de E 398.5 mg/L – S 18.9 mg/L, NT E 73.3 mg/L – S 4.9 mg/L, PT E 15.8 mg/L – S 7.6 mg/L, SST E 295.3 mg/L – S 18.9 mg/L y remociones de 94.8%, 71.5%, 94.7%, 94.8%, 92.7%, 52.2% y 93.0% respectivamente. Los HAFL con *E. crassipes* y HAFS que utilizó *C. articulatus* L presentaron las menores eficiencias de remoción de contaminantes.

- Marín, Solís, López, Bautista y Romellón (2016), estudiaron HAFS en la ciudad de Villahermosa, Tabasco, para el tratamiento de aguas residuales domésticas, con TRH de 5 días. La eficiencia de remoción de contaminantes básicos (DBO₅, DQO, SST, NT, PT, turbiedad y color) fue evaluada bajo tres tratamientos: 1) *Pontederia cordata* (HAFS-Tule), 2) *Phragmites australis* (HAFS-Carrizo) y 3) grava como prueba testigo (HAFS-Grava). Para el HAFS-Tule, se obtuvieron las más altas eficiencias de remoción entre 81.10 % y 95.44 %. Para el HAFS-Carrizo, se encontraron eficiencias de remoción en un rango de 53% a 89 %; mientras que el HAFS-Grava presentó las eficiencias más bajas (34% a 72 %). El mejor tratamiento fue el HAFS con *Pontederia cordata* que obtuvo valores de efluente para DBO₅ de 18.6 mg/L, DQO de 40.23 mg/L, NT de 4.66 mg/L, PT de 3.06 mg/L, SST de 18.32 mg/L, turbiedad de 10.97 NTU y color de 175 UC. Para el tratamiento con *Phragmites australis* obtuvo valores de efluente para DBO₅ de 50.8 mg/L, DQO 119.96 mg/L, NT de 12.34 mg/L, PT 6.91 mg/L, SST de 32.88 mg/L, turbiedad de 23.34 NTU y color de 252.6 UC.

Asclepias curassavica L y especies de césped en el tratamiento de aguas residuales domesticas vía humedales artificiales de flujo subsuperficial.

PIA. Manuel Antonio Gerónimo López



- García, López, y Torres (2019), evaluaron la remoción de parámetros de control y contaminantes básicos de aguas residuales domésticas con HAFS en la UJAT en Villahermosa, Tabasco, para lo cual se emplearon dos medios diferentes de soporte: grava de canto redondo (HACC) y grava de brecha sedimentaria (HABC), con vegetación *Sagittaria latifolia* y TRH de 4.8 días y 4.9 días, respectivamente. Los resultados que obtuvieron en el HACC para los parámetros de control y contaminantes básicos del agua residual fueron para turbiedad E 93.98 NTU – S 2.89 NTU, color E 1282.39 UC – S 132 UC, pH E 8.35 – S 7.93, CE E 1381.11 $\mu\text{s}/\text{cm}$ – S 295.5 $\mu\text{s}/\text{cm}$, T E 26.84°C – S 25.77 °C, SST E 250.10 mg/L – S 7.81 mg/L, DBO₅ E 289.91 mg/L – S 8.91 mg/L, NT E 146.6 mg/L – S 4.74 mg/L, PT E 5.79 mg/L – S 0.18 mg/L y para HABC turbiedad E 93.98 NTU – S 3.42 NTU, color E 1282.39 UC – S 149.5 UC, pH E 8.35 - S 7.83, CE E 1381.11 $\mu\text{s}/\text{cm}$ – S 915 $\mu\text{s}/\text{cm}$, T E 26.84°C – S 25.66 °C, SST E 250.10 mg/L – S 9.23 mg/L, DBO₅ E 289.91 mg/L – S 12.23 mg/L, NT E 146.6 mg/L – S 6.7 mg/L y PT E 5.79 mg/L – S 0.26 mg/L. En su mejor tratamiento (HACC) alcanzaron eficiencias de remoción para SST del 96.5% y 96.78% para DBO₅; en su tratamiento HABC, obtuvieron eficiencias para SST del 95.52% y 95.02% para DBO₅.
- López, Bautista, Ramos, Torres, López, y Pampillón (2018), evaluaron la cinética de degradación y distribución espacial de un HAFS con *T. geniculata* tratando aguas residuales sanitarias. El análisis de contaminantes mostró un valor de pH de 7.5 ± 0.1 en el reactor. La temperatura de 30.44 a 28.32 °C, la conductividad eléctrica de 4010 a 2922 $\mu\text{s}/\text{cm}$, la turbidez de 144 a 17 NTU y la biomasa bacteriana de 30000 a 2646 mg/Kg que disminuyeron sustancialmente de entrada a salida a través del reactor. El gasto de operación que obtuvieron fue de 204.66 L/día y el TRH de 4.5 días. Obtuvieron eficiencias de remoción del 87% de turbiedad y 92.5% de DBO₅.



5. HIPÓTESIS

5.1 Hipótesis 1

La especie *Asclepias curassavica* L. y las especies asociadas de césped de los géneros *Phyla*, *Digitaria*, *Acmella* y *Murdannia*, pueden lograr la remoción hasta un 80% de contaminantes básicos lo que permitirá cumplir con la normatividad ambiental vigente.

5.2 Hipótesis 0

La especie *Asclepias curassavica* L. y las especies asociadas de césped de los géneros *Phyla*, *Digitaria*, *Acmella* y *Murdannia*, no pueden lograr la remoción hasta un 80% de contaminantes básicos lo que no permitirá cumplir con la normatividad ambiental vigente.

6. OBJETIVOS

6.1 General

Evaluar el potencial de fitorremediación de *Asclepias Curassavica* L. y las especies asociadas en el tratamiento de agua residual doméstica en humedales artificiales de flujo subsuperficial.

6.2 Específicos

- Muestrear, sembrar y estabilizar la especie *Asclepias curassavica* L. y las asociadas.
- Caracterizar la morfometría de la especie *Asclepias Curassavica* L. y las asociadas.
- Caracterizar el medio de soporte (porosidad, densidad aparente y densidad real).
- Caracterización fisicoquímica del agua de influente y efluente del HAFS-AC con la especie *Asclepias Curassavica* L. y las asociadas (pH, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, turbiedad, color, potencial óxido reducción y oxígeno disuelto).
- Evaluación de la eficiencia de la remoción y cumplimiento de la normatividad ambiental aplicable.



7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1 Generalidades del proyecto.

Para el desarrollo del estudio se realizaron actividades de investigación bibliográfica, actividades de campo, actividades de laboratorio y actividades de gabinete (figura 1). El proyecto comenzó durante la contingencia sanitaria COVID-19, a causa de esta contingencia se tomaron todas las medidas precautorias para poder llevar a cabo este trabajo de investigación. Actividades como investigación bibliográfica y asesorías se realizaron en línea desde casa y por medio de plataformas digitales. Las actividades de campo y laboratorio se realizaron con pocas personas y siguiendo todos los protocolos de seguridad establecidos por la universidad y gobierno de México.

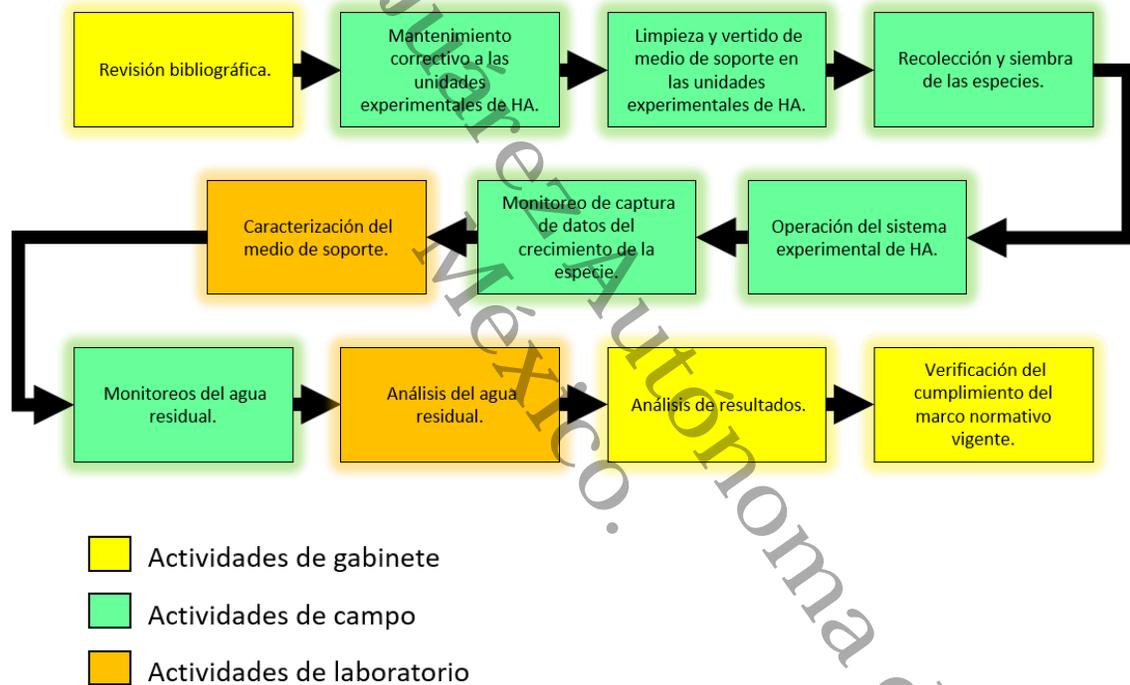


Figura 1. Diagrama de actividades desarrollados durante el proyecto.



7.2 Área de estudio.

El área donde se realizó el estudio fue en la División Académica de ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (figura 2), ubicada en Carretera Villahermosa-Cárdenas Km. 0.5 S/N, Entronque a Bosques de Saloya. Villahermosa, Tabasco, México (N 17° 59'26" y 17° 59'17"; W 58'16" y 92°58'37"). Las unidades experimentales se encuentran en el área correspondiente al Laboratorio de la Tecnología del Agua en donde también se realizaron los monitoreos y los análisis fisicoquímicos.

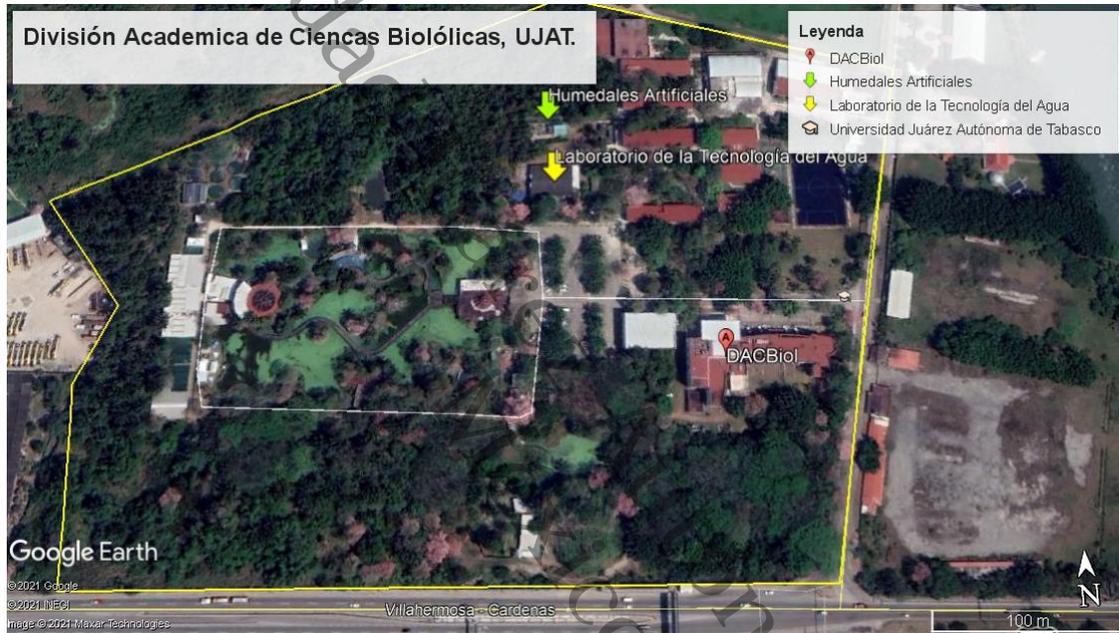


Figura 2. Localización Satelital de Humedales Artificiales y Laboratorio de la Tecnología del Agua. Fuente: Google Earth, 2021.

7.3 Características del diseño experimental.

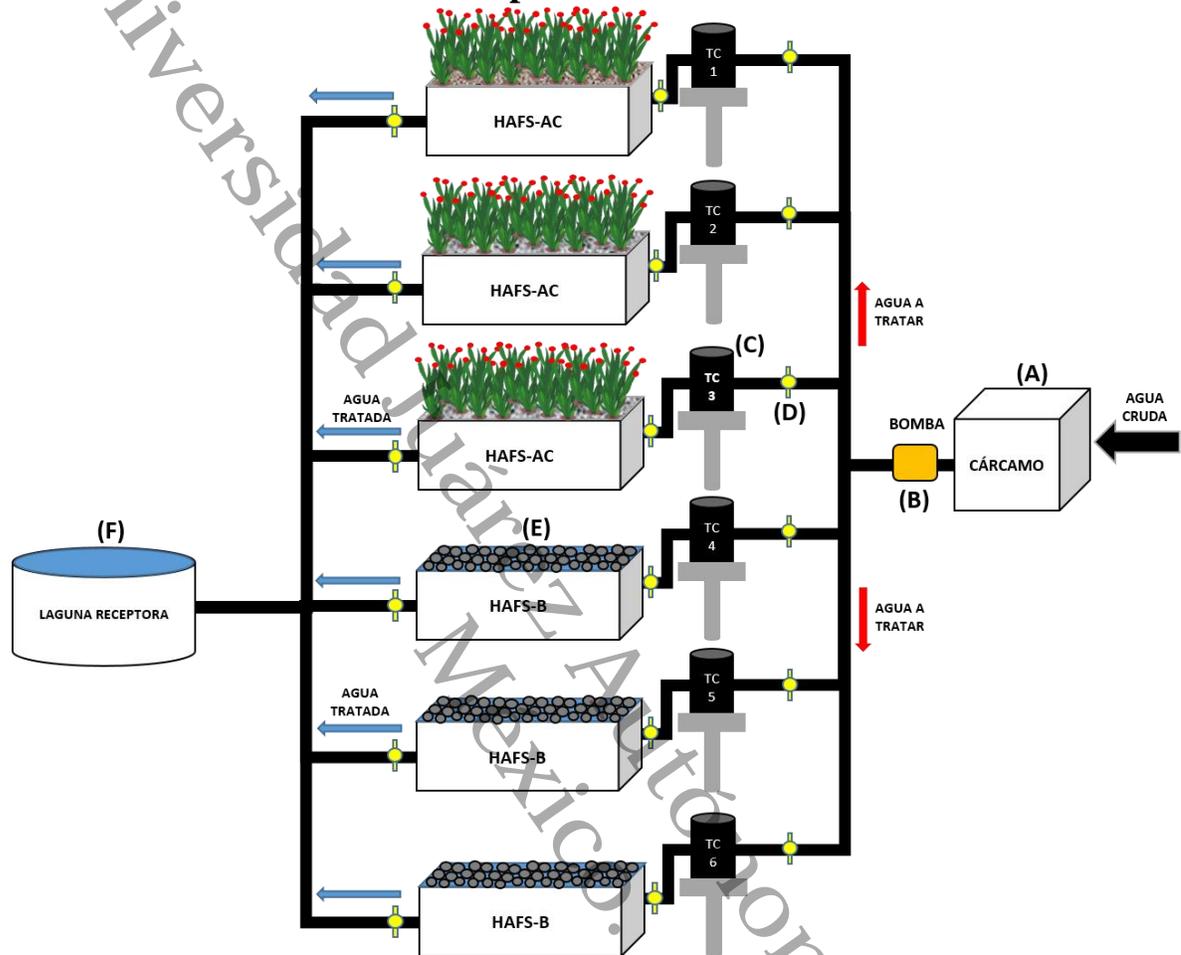


Figura 3. Diseño experimental. Fuente: Elaboración propia.

El diseño experimental que se implementó en este proyecto para el tratamiento de aguas residuales domesticas proveniente de los sanitarios de la DACBIOL, estaba conformado por un cárcamo (A) que cumplía con la función de unidad de pretratamiento, una bomba (B) que bombeaba el agua a los tanques de control (C) que a través de válvulas (D) se regulo el flujo de agua que ingresaba a los HAFS (E) y un cuerpo receptor o destino final para depositar el agua tratada (F) (figura 3).

7.3.1 Tanques de control.

El agua residual domestica de la DACBIOL se recolectaba en un cárcamo y posterior se distribuía a tanques de control (figura 4) por medio de una bomba de ¼ de HP y tubería de PVC de 1in de diámetro. Los tanques eran de una capacidad de 200 L, estaban colocados en una base de concreto a una altura de 1.20 m, quedando a una altura mayor que los HAFS lo cual permitió que el flujo del agua residual fuera por gravedad.



Figura 4. Tanques de control del agua residual.

7.3.2 Unidades experimentales de Humedales Artificiales (HA).

En este proyecto de investigación se implementaron unidades experimentales de HA. Estaban construidas de lámina de acero al carbón calibre 10 con dimensiones de 2.5 m de longitud, 1.2 m de anchura y 1 m de altura cada una, diseñadas por López Ocaña et al. (2014) (figura 5). Las unidades experimentales de HA fueron de flujo subsuperficial, tres con la especie *Asclepias curassavica L.* y la variedad de césped (HAFS-AC) en el cual se midió la eficiencia de remoción de la especie *Asclepias curassavica L.* y sus asociadas, y otro tres que solo contenían el medio de soporte (HAFS-B) que cumplió con la función de blanco que nos permitió conocer la eficiencia de remoción solo del medio de soporte.

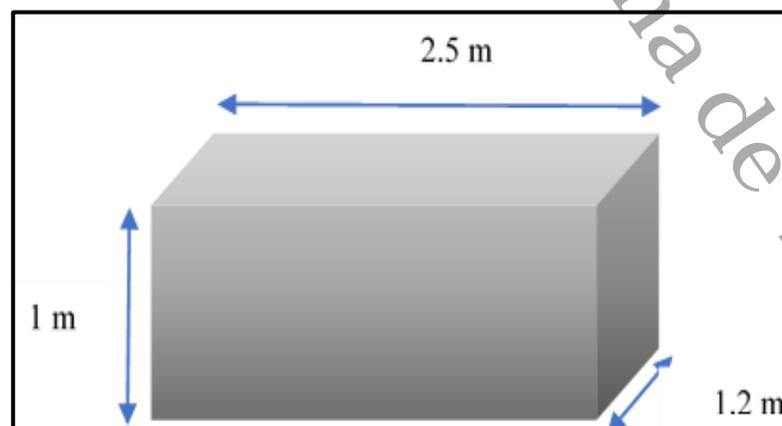


Figura 5. Dimensiones del diseño de unidades experimentales de HA de López Ocaña et al. (2014).



La distribución del agua residual a los humedales artificiales se realizó mediante líneas de tubería de PVC hidráulico de 1 in de diámetro. La entrada de agua residual se colocó a 0.5 m a través de una estructura de PVC que distribuía uniformemente el agua residual a través del humedal por medio de 6 tubos perforados de PVC de 1 in de diámetro.

7.4 Etapas de operación del proyecto de investigación.

La etapa de operación de este proyecto comenzó en el mes de mayo de 2021 y culminó en el mes de septiembre de 2021. Esta etapa se dividió en tres etapas generales:

7.4.1 Etapa de arranque.

Esta etapa se realizó los tres primeros meses de operación del sistema de tratamiento, durante la cual se realizó la evaluación del crecimiento y desarrollo de la vegetación.

7.4.2 Etapa de estabilización.

Durante esta etapa se implementó un tiempo de cuatro meses, durante la cual se realizó la evaluación del crecimiento y desarrollo de la vegetación, la evaluación de los gastos de operación, la determinación y evaluación de la calidad del agua.

7.4.3 Etapa de evaluación.

Esta etapa comprendió del tercer al veintavo mes de operación del sistema, durante la cual se realizó la evaluación del crecimiento y desarrollo de la vegetación, la evaluación de los gastos de operación, la determinación y evaluación de la calidad del agua y eficiencias de remoción.

7.5 Actividades de campo.

7.5.1 Colecta de la vegetación.

La recolección de la vegetación se llevó a cabo en dos zonas dentro de la División Académica de Ciencias Biológicas. El punto A (figura 6) se encuentra ubicado a unos metros del laboratorio de la tecnología de agua ($17^{\circ}59'28.12''N$ y $92^{\circ}58'25.47''O$) y el punto B (figura 6) está localizado a los alrededores del CICEA (Centro de Investigación para la Conservación de Especies Amenazadas) ($17^{\circ}59'21.73''N$ y $92^{\circ}58'29.85''O$).

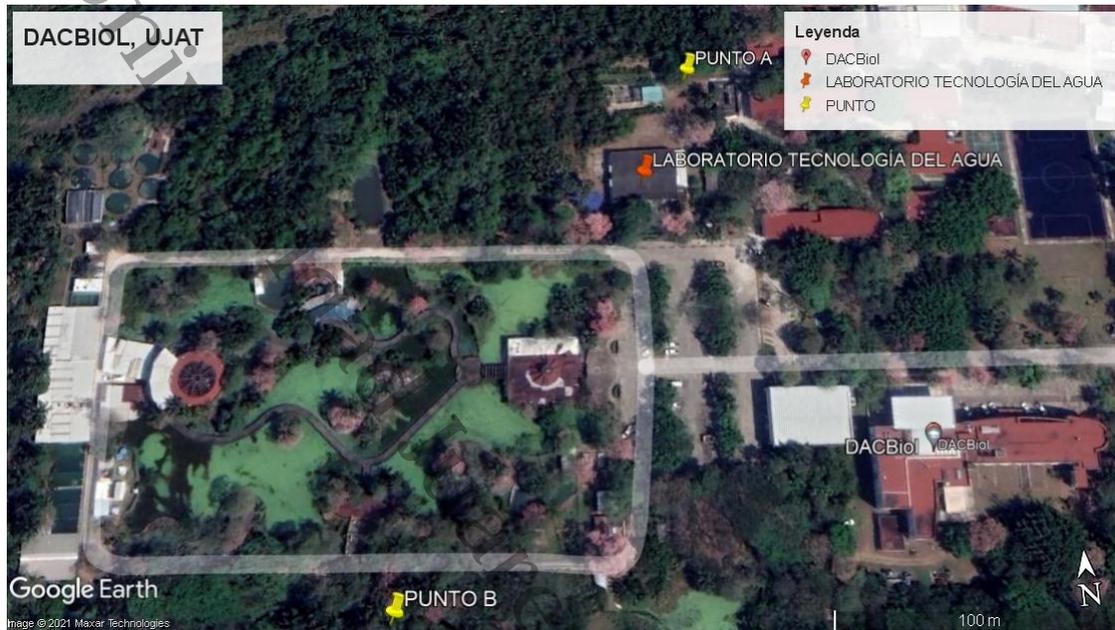


Figura 6. Puntos de recolección de vegetación. Fuente: Google Earth, 2021.

En el punto **A** se pueden encontrar gran cantidad de plantas de la especie *Asclepias curassavica* L., puesto que se encuentra a orillas de un canal de aguas residuales y pluviales de la DACBIOL (División Académica de Ciencias Biológicas). También en el punto **A** se localizaron diferentes tipos de césped (*Digitaria ciliaris* (Retz.) Koeler, *Phyla nodiflora* (L.) Greene, *Acmella caulirhiza* Delile y *Murdannia nudiflora* (L.) Brenan) los cuales fueron utilizados para establecer una simbiosis con la *Asclepias curassavica* L. En el punto **B** se localiza una pequeña laguna lo que favorece al crecimiento de la planta y su disponibilidad en esa zona.

7.5.2 Caracterización de la vegetación.

Se realizó una caracterización antes de sembrar la especie *Asclepias curassavica* L. la cual consistió en medir el diámetro y largo del tallo (cm), número de hojas, largo y ancho de hojas (cm), largo y ancho de raíz (cm), número de pseudotallos y contenido de humedad (%) (Jerónimo Martínez y Campos Ramos, 2021). La finalidad de realizar dicho procedimiento fue obtener los datos iniciales de las plantas antes de ser sembradas.

7.5.3 Siembra de la vegetación en las unidades experimentales.

Para la siembra de la vegetación se siguió el método recomendado por Pazmiño y Jaramillo (2019), conocido como la forma de triángulo equilátero o tresbolillo, debido a que con esta forma de siembra se logró obtener una distribución uniforme (en el método de tresbolillo las plantas se distribuyen en cada uno de los vértices de un triángulo equilátero, guardando la misma distancia entre plantas y filas).

Con la siguiente fórmula se determinará el número de plantas por superficie que debían plantarse por dicho método:

Ecuación 1. Tresbolillo.

$$n = \frac{\text{Superficie (m}^2\text{)}}{d * d} * \text{Cos}(30)$$

Donde **n** = número de plantas y **d** = distancia entre plantas (m).

Al sustituir los valores en la ecuación 1 se obtuvo que el número de plantas que debían sembrarse, en este caso se sembraron 21 plantas (figura 7). Una vez que se obtuvo el número de plantas necesarias para la investigación y colocado el sustrato (grava) se sembraron las plantas en el HAFS-AC; para ello se realizaron orificios con profundidad de 5-10 cm y distancia entre plantas de 35 cm. Durante la siembra se identificaron las 5 plantas que fueron caracterizadas inicialmente para llevar un mejor control durante los monitoreos.

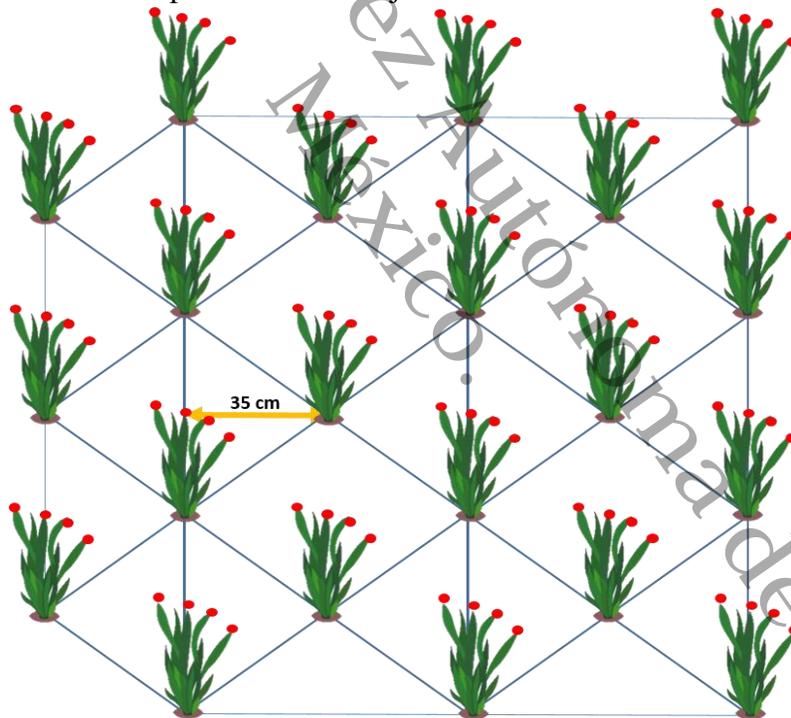


Figura 7. Método de sembrado Tres Bolillos con *Asclepias curassavica* L. en HAFS-AC. Fuente: Elaboración propia.

En el HAFS-AC se sembró diferentes especies de césped, estos consistieron de 20 cuadros de césped de 10 x 10 cm de largo, se sembraron los cuadros de césped por toda el área de la unidad experimental tratando de proteger el tallo de las plantas *Asclepias curassavica* L.



7.5.4 Evaluación del crecimiento y comportamiento de la vegetación.

La evaluación del crecimiento y comportamiento de la vegetación en las unidades, se realizó según lo planteado en el punto 7.5.2. Esta evaluación se realizó el primer mes durante la etapa de arranque, cada mes para las etapas de estabilización y arranque y al final del proyecto.

7.5.5 Medición de Caudal.

Se suministró un caudal constante a los HAFS, el cual se midió en la etapa inicial para mantener el mismo gasto en toda la etapa de evaluación. Este volumen por unidad de tiempo se obtuvo con el método volumétrico que consiste en colocar debajo de la corriente un recipiente de volumen conocido que reciba todo el flujo del agua para medir el tiempo en el que dicho recipiente se llena por completo, repitiendo varias veces el proceso para obtener un promedio. Este es el método más sencillo y confiable (González Valencia y Ramírez Soto, 2014). Seguido a este proceso se aplicó la siguiente ecuación 2:

Ecuación 2. Caudal.

$$Q = \frac{V}{t}$$

Dónde: **Q** es el caudal, **V** es el volumen de agua capturado y **t** el tiempo de llenado del recipiente.

7.5.6 Monitoreos de la calidad del agua.

El monitoreo del agua de influente y efluente se realizó en base a la NOM-001-SEMARNAT-2021, los puntos que fueron considerados durante el monitoreo fueron el cárcamo, los 6 tanques de almacenamiento de agua residual y el agua de efluente de cada reactor, siendo un total de 15 muestras. La colecta del agua se realizó por medio de muestras simples como sugiere la norma y se vertieron en frascos de plástico de 1 litro de capacidad previamente etiquetados. Los muestreos se realizaron con intervalos de tiempo de 4 horas, 5 días hábiles a la semana, siendo el primer muestreo 8:00 am, 12:00pm y 4:00pm.



7.6 Actividades de laboratorio.

7.6.1 Caracterización del medio de soporte:

La caracterización del medio de soporte (grava de río) se realizó con el fin de calcular la densidad aparente (ρ_a), densidad real (ρ_r), porosidad, diámetro de partícula y biomasa microbiana. A continuación, se presenta como se realizará cada uno de los procedimientos:

7.6.1.1 Densidad aparente (ρ_a):

Se calculó con base en el método para la determinación de gravedad específica aparente descrito en la norma ASTM C127-93 para agregados gruesos adecuada por Ayala, Delgado, Cuellar y Salazar (2019). El volumen considerado para la evaluación de este parámetro incluye tanto las partículas sólidas como el espacio poroso y se calcula con la ecuación 3:

Ecuación 3. Densidad aparente.

$$D_a = \frac{A}{A - C} * D_{H_2O}$$

Donde:

Da= Densidad aparente

A (g)= Masa de la muestra seca al horno

C (g)= Masa de la muestra húmeda

D_{H₂O}= Densidad del agua a 4°C (1000 Kg/m³)

7.6.1.2 Densidad real (ρ_r):

Se calculó con base en el método para la determinación de gravedad específica bruta descrito en la norma ASTM C127-93 para agregados gruesos adecuada por Ayala et al. (2019). Se calcula con la ecuación 4:

Ecuación 4. Densidad real.

$$D_R = \frac{A}{B - C} * D_{H_2O}$$

Donde:

DR= Densidad real

A (g)= Masa de la muestra seca al horno

B (g)= Masa de la muestra saturada y superficialmente seca

C (g)= Masa de la muestra húmeda

D_{H₂O}= Densidad del agua a 4°C (1000 Kg/m³)

7.6.1.3 Porosidad:

Para calcular la porosidad se utilizó la ecuación 5 descrita por Atrarés Huerta (n.d.) en el que se relaciona la densidad real con la densidad aparente.



Ecuación 5. Porosidad.

$$\varepsilon = \left(\frac{\rho_r - \rho_a}{\rho_r} \right) \times 100$$

Donde:

ε = Porosidad

ρ_r = Densidad real

ρ_a = Densidad aparente

7.6.1.4 Volumen de agua y grava:

Se calculó el volumen de la grava y del agua en cada una de las unidades experimentales mediante las ecuaciones 6 y 7.

Ecuación 6. Volumen de grava.

$$V_g = L * A * h$$

Ecuación 7. Volumen de agua.

$$V_a = V_g * n * V_l$$

Donde:

V_g = es el volumen de grava presente (m^3)

L = el largo del humedal (m)

A = ancho del humedal (m)

H = profundidad del medio de soporte (m)

V_a = volumen de agua total dentro de la unidad experimental (m^3)

V_l = volumen de agua libre dentro del humedal (m^3) se utiliza la misma ecuación que para el volumen de grava, pero utilizando la diferencia del tirante efectivo y el tirante de grava

n = porosidad

7.6.1.5 Diámetro de la partícula:

Se realizó la medición del diámetro promedio del medio de soporte (Javier Rodríguez, 2020), puesto que ya había sido usado para experimentos anteriores y contenía rocas de distintos tamaños. Para ello se tomaron 3 muestras de grava por cada punto de muestreo en el inicio de los HA, en la parte media y en la parte final, obteniendo un total de 27 muestras (figura 8), tomando también muestras a distintas profundidades (figura 8) para tener un resultado mucho más representativo, posteriormente se procedió a medir cada roca muestreada con un vernier.

7.6.1.6 Biomasa microbiana adherida:

Se llevó a cabo al término de la fase de estabilización. Para ello se tomó como referencia el método para la determinación de sólidos totales volátiles (STV) establecido por la NMX-AA-034-SCFI-2015. Se recolectaron muestras de grava en nueve puntos estratégicos distribuidos a lo largo de los HA a 0.05 m, 1.25 m (centro) y a 2.45 m (final) y a tres diferentes profundidades en cada punto de muestreo (0.05 m, 0.25 m y 0.45 m) resultando un total de 27 muestras (figura 8). Se calculó con la ecuación 8:

Ecuación 8. Biomasa bacteriana adherida.

$$\text{Biomasa microbiana adherida} = \left(\frac{mg}{Kg}\right) = \frac{PME - PMC}{PH}$$

Donde:

PME= Peso de la muestra después de la evaporación

PMC= Peso de la muestra después de la calcinación

PH= Peso Húmedo

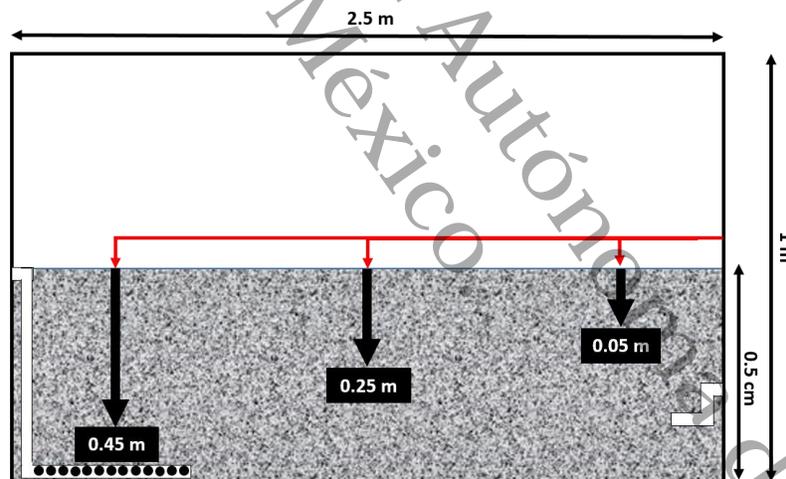


Figura 8. Distancia y profundidad de los puntos de muestreo del medio de soporte. Fuente: Elaboración propia.

7.6.1.7 Porcentaje de humedad:

Se obtuvo el contenido de humedad del medio de soporte utilizando el método AS-05 establecido por la NMX-AA-021-2000. Para la recolección de muestras se siguió el mismo procedimiento descrito para la determinación de biomasa microbiana adherida.

7.6.2 Análisis de la calidad del agua.

Durante la operación de los humedales se recolectaron 6 muestras simples para cada sección del tren de tratamiento. Los parámetros que se analizaron fueron pH, temperatura, CE, SDT,



color, turbiedad, OD, POR. Los análisis de las muestras del afluente y el efluente, fueron determinados por medio de los siguientes métodos:

Tabla 2. Métodos y equipos empleados para el análisis de la calidad del agua.

PARÁMETRO	MÉTODO	EQUIPO
Temperatura	SM 2550 B	Multiparamétrico Hanna Combo HI98129
Conductividad eléctrica (CE)	SM 2510 B	Multiparamétrico Hanna Combo HI98129
Sólidos disueltos totales (SDT)	SM 2540 C	Multiparamétrico Hanna Combo HI98129
pH	SM 4500-H B	Multiparamétrico Hanna Combo HI98129
Potencial óxido reducción (POR)	ASTM D1498-00	POR Y pH Hanna® HI 98121
Oxígeno disuelto (OD)	SM 4500-OG	Oxímetro Hanna HI98193
Turbiedad	SM 2130 B	Colorímetro LaMotteMR TC-3000
Color	SM 2120 B	Colorímetro LaMotteMR TC-3000

7.7 Actividades de gabinete.

7.7.1 Determinación del Tiempo de Retención Hidráulico (TRH).

Este se define como la razón entre el volumen total de reacción y el caudal tratado en dicha reacción (Balaguer Arnandis, 2012). El tiempo de retención hidráulico (TRH) se calculó mediante la ecuación 9:

Ecuación 9. Tiempo de retención hidráulico.

$$TRH \text{ (días)} = \frac{V}{Q}$$

Donde:

V = volumen de agua en el HA (m³)

Q = caudal tratado de aguas residuales (m³/d)

7.7.2 Determinación de la eficiencia de remoción.

La eficiencia de remoción de los parámetros seleccionados se calculó de acuerdo a la ecuación 10 (Palta Prado y Morales Velasco, 2013).

Ecuación 10. Eficiencia de remoción.

$$ER \text{ (%) } = \frac{c_e - c_s}{c_e} \times 100$$

Asclepias curassavica L y especies de césped en el tratamiento de aguas residuales domesticas vía humedales artificiales de flujo subsuperficial.

PIA. Manuel Antonio Gerónimo López



Dónde:

ER= Eficiencia de remoción

Ce= Concentración del contaminante “x” a la entrada (afluente)

Cs= Concentración del contaminante “x” a la salida (efluente)

7.7.3 Análisis estadísticos.

Se empleo un análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis comparándolo con Mann-Whitney para evaluar diferencias significativas entre los tratamientos y los controles para los parámetros evaluados (pH, temperatura, CE, SDT, turbiedad, color, POR y OD).



8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Características del medio de soporte.

8.1.1 Etapa de evaluación.

Las características que el medio de soporte en los HA (grava de río) fueron las siguientes (tabla 3):

Tabla 3. Características promedio (\pm DE) del medio de soporte (N=27).

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	HAFS-AC	HAFS-B
Densidad real	Kg/m ³	2654.12 \pm 47.26	2676.12 \pm 86.19
Densidad aparente	Kg/m ³	1275.16 \pm 12.51	1296.13 \pm 37.31
Porosidad	%	51.94	51.54
Volumen de grava	m ³	1.5	1.26
Volumen de agua residual	m ³	0.779	0.649
Diámetro de partícula	cm	1.83 \pm 0.326	1.76 \pm 0.243
Caudal de operación	m ³ /día	0.211	0.211
TRH	día	3.7	3

Después realizar las mediciones necesarias para el cálculo de la densidad aparente para HAFS-AC se obtuvo 1275.161 Kg/m³ y HAFS-B de 1296.131 Kg/m³ y para la densidad real 2654.125 Kg/m³ y 2676.123 Kg/m³ respectivamente.

Estos valores fueron utilizados en el cálculo de la porosidad obteniendo los valores mostrados en la tabla para cada unidad experimental, con la porosidad y el volumen de grava presente en la unidad experimental se calculó el volumen de agua residual dentro del humedal mediante la ecuación 6 y 7 mostrada en la metodología.

Sustituyendo para el HAFS-AC:

$$Vg = 2.5 \text{ m} * 1.2 \text{ m} * 0.5 \text{ m} = 1.5 \text{ m}^3$$

$$Va = 1.5 \text{ m}^3 * 0.5194 + 0 \text{ m}^3 = 0.779 \text{ m}^3$$

Para el HAFS-B:

$$Vg = 2.10 \text{ m} * 1.2 \text{ m} * 0.5 \text{ m} = 1.26 \text{ m}^3$$

$$Va = 1.26 \text{ m}^3 * 0.5154 + 0 \text{ m}^3 = 0.649 \text{ m}^3$$

El medio de soporte presento una porosidad promedio de 51.74% para ambos HAFS, ocupando un volumen de grava de 1.5 m³.



Posteriormente se calculó el tiempo de retención hidráulico mediante la ecuación 9. Se calculó el TRH a partir de un caudal de 0.211 m³ /día y se obtuvo que este fue de 3.7 días para el HAFS-AC y de 3 días para el HAFS-B.

8.1.1.1 Biomasa microbiana adherida.

En la tabla 4 se muestra la cantidad de microorganismos adheridos al medio de soporte después de finalizar la fase de estabilización, se puede observar que el valor más alto registrado en el HAFS-B con 31544.6478 mg/Kg a los 5 cm de distancia de la entrada y a 45 cm de profundidad. Los valores de biomasa microbiana adherida promedio con respecto a la distancia de la entrada del HAFS-AC fueron: 5465.48 ± 4932.86 mg/Kg (en la entrada: 5 cm), 3035.59±846.89 mg/Kg (en la parte media: 125 cm) y 7484.09±5365.70 mg/Kg (al final: 245 cm). Por otro lado, los valores de biomasa microbiana adherida promedio con respecto a las profundidades de 5, 25 y 45 cm fueron: 6367.15 ± 5314.08 mg/Kg, 6360.60 ± 5118.84 mg/Kg y 6525.02 ± 5269.47 mg/Kg respectivamente.

Tabla 4. Datos de biomasa bacteriana adherida al medio de soporte (mg/Kg) obtenidos en el HAFS-AC y en el HAFS-B a diferentes distancias y profundidades en el HAFS (N=27).

LONG (m)	H (m)	HAFS-AC (mg/Kg)	HAFS-B (mg/Kg)
0.05	0.05	2719.50272	4069.84377
0.05	0.05	3813.43502	3974.91388
0.05	0.05	2711.9325	13498.8436
1.25	0.05	3071.94826	1854.47802
1.25	0.05	5148.20593	10045.3975
1.25	0.05	9657.94769	5813.39941
2.45	0.05	6542.28253	4713.35129
2.45	0.05	1965.92398	26319.8638
2.45	0.05	2904.60198	6808.51064
0.05	0.25	2861.76434	5931.55894
0.05	0.25	8185.53888	2461.93125
0.05	0.25	2690.18084	4690.43152
1.25	0.25	4025.7649	1101.47322
1.25	0.25	1824.11674	6207.21132
1.25	0.25	12385.6282	6204.75698
2.45	0.25	13969.4254	9918.84581
2.45	0.25	2195.7914	11489.8012
2.45	0.25	2556.61066	2856.82892
0.05	0.45	17454.2358	31544.6478
0.05	0.45	2275.07756	4508.90917
0.05	0.45	6477.73279	10755.3017
1.25	0.45	3557.6638	2993.11583
1.25	0.45	4611.7227	4609.65084

Asclepias curassavica L y especies de césped en el tratamiento de aguas residuales domesticas vía humedales artificiales de flujo subsuperficial.

PIA. Manuel Antonio Gerónimo López



1.25	0.45	13378.3155	2452.36748
2.45	0.45	21073.9615	19347.904
2.45	0.45	3676.18303	3880.98318
2.45	0.45	6972.28517	1885.4584

En la figura 9 y 10 se logra observar como los valores de biomasa microbiana varían de acuerdo a la longitud del HAFS-AC y HAFS-B.

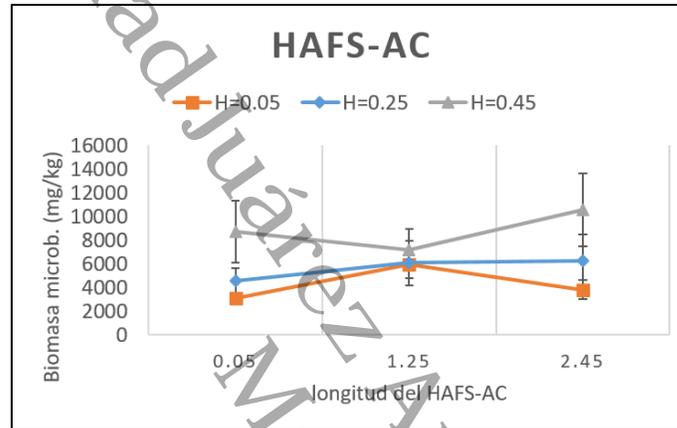


Figura 9. Distribución de la biomasa microbiana adherida al medio de soporte en el HAFS-AC.

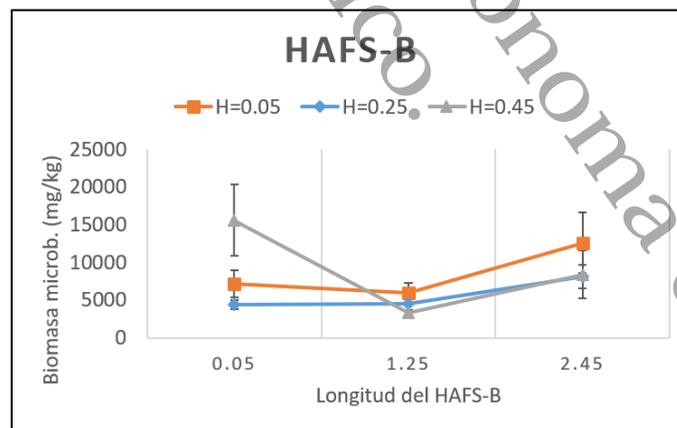


Figura 10. Distribución de la biomasa microbiana adherida al medio de soporte en el HAFS-B.



8.2 Evaluación del crecimiento y comportamiento de las especies.

8.2.1 Características iniciales.

Como se mencionó en el punto 8.3.5.1, se caracterizó 5 especies de *Asclepias curassavica* L. que fueron sembradas en el HAFS-AC. Los resultados obtenidos de esta caracterización se observan en la tabla 5.

Tabla 5. Valores promedio (\pm DE) de la vegetación *Asclepias Curassavica* L. en el reactor experimental previo a la siembra (N=5).

VARIABLE	HAFS-AC
Largo de hojas (cm)	8.15 \pm 5.19
Ancho de hojas (cm)	1.95 \pm 0.82
Numero de hojas	30 \pm 10.98
Altura de tallo (cm)	67.54 \pm 16.10
Diámetro del tallo (cm)	0.49 \pm 0.07
Numero de pseudotallos	1 \pm 0
Numero de flores	10.6 \pm 3.71
Ancho de raíz (cm)	24.41 \pm 5.48
Largo de raíz (cm)	16.88 \pm 4.60
Biomasa por vegetación (g)	20 \pm 10
% de Humedad	74.92 \pm 3.42

8.2.2 Etapa de estabilización.

Las características de crecimiento evaluadas para la especie *Asclepias curassavica* L. después de tres meses de operación en los tratamientos de flujo subsuperficial se observan en la tabla 6.

Tabla 6. Valores promedio (\pm DE) de la vegetación *Asclepias Curassavica* L. en el reactor experimental “etapa de estabilización” (N=5).

VARIABLE	HAFS-AC
Largo de hojas (cm)	8.23 \pm 1.19
Ancho de hojas (cm)	1.39 \pm 0.42
Numero de hojas	16.60 \pm 4.88
Altura de tallo (cm)	71.01 \pm 14.67
Diámetro del tallo (cm)	0.50 \pm 0.16
Numero de pseudotallos	1.67 \pm 0.49
Numero de flores	8.60 \pm 3.38



8.2.2.1 Humedal artificial de flujo subsuperficial.

El HAFS después de un tiempo de tres meses, contenía 21 ejemplares de *Asclepias curassavica* L. con una densidad de 7 plantas/m². El largo de hoja de la plántula fue de 8.23 cm (10.2 cm MAX y 6 cm MIN), el ancho de hoja de 1.39 cm (2 cm MAX y 0.9 cm MIN), alto de la plántula de 71.01 cm (86.3 cm MAX y 42 cm MIN) y un numero de flores de 8.6 (16 MAX y 5 MIN).

Bajo las condiciones que el HAFS, la especie está presentando complicaciones para adaptarse. Se necesitó de varias especies de césped para ayudar a la vegetación a estabilizarse y que esta no muriera en el HAFS.

8.2.3 Etapa de evaluación.

Las características de crecimiento evaluadas para la especie *Asclepias curassavica* L. después de los meses de evaluación de los tratamientos de flujo subsuperficial se observan en la tabla 7.

Tabla 7. Valores promedio (\pm DE) de la vegetación *Asclepias Curassavica* L. en el reactor experimental “etapa de evaluación” (N=5).

VARIABLE	HAFS-AC
Largo de hojas (cm)	10.14 \pm 2.41
Ancho de hojas (cm)	2.06 \pm 0.77
Numero de hojas	99.8 \pm 120.81
Altura de tallo (cm)	127 \pm 22.79
Diámetro del tallo (cm)	0.52 \pm 0.15
Numero de tallos	7.2 \pm 7.39
Numero de flores	43.2 \pm 37.17
Ancho de raíz (cm)	46.2 \pm 13.21
Largo de raíz (cm)	24 \pm 10.77
Biomasa por planta (g)	309 \pm 270
% de Humedad	77.6 \pm 9.81

8.2.3.1 Humedal artificial de flujo subsuperficial.

Se plantaron un total de 21 ejemplares de la vegetación *Asclepias curassavica* L. inicialmente y al final se registraron un numero de 39 ejemplares. Estas presentaron un promedio de largo de hoja de 10.14 \pm 2.41 cm, un ancho de hoja de 2.06 \pm 0.77 cm y un crecimiento de pseudotallos de 7.2 \pm 7.39. Se encontró un gran aumento en cuanto al número de hojas, largo de la vegetación y en el número de pseudotallos, en la fase inicial de operación cada ejemplar poseía un promedio de 30 \pm 10.98 hojas y al final un promedio de 99.8 \pm 120.81 hojas. En cuanto a la altura y numero de pseudotallos los datos promedios iniciales registrados fueron de 67.54 \pm 16.10 cm, 1 \pm 0 y al final de 127 \pm 22.79 cm, 7.2 \pm 7.39 respectivamente. El porcentaje de humedad que presento al principio fue de 74.92% \pm 3.42% y el final fue de 77.6% \pm 9.81%.



Se realizó un monitoreo mensual de la vegetación, desde la fase de estabilización hasta la fase final de operación, la cual consistía en medir el crecimiento de los 5 ejemplares ya seleccionados. En la figura 11 se puede observar un crecimiento que la vegetación obtuvo durante los meses de operación:

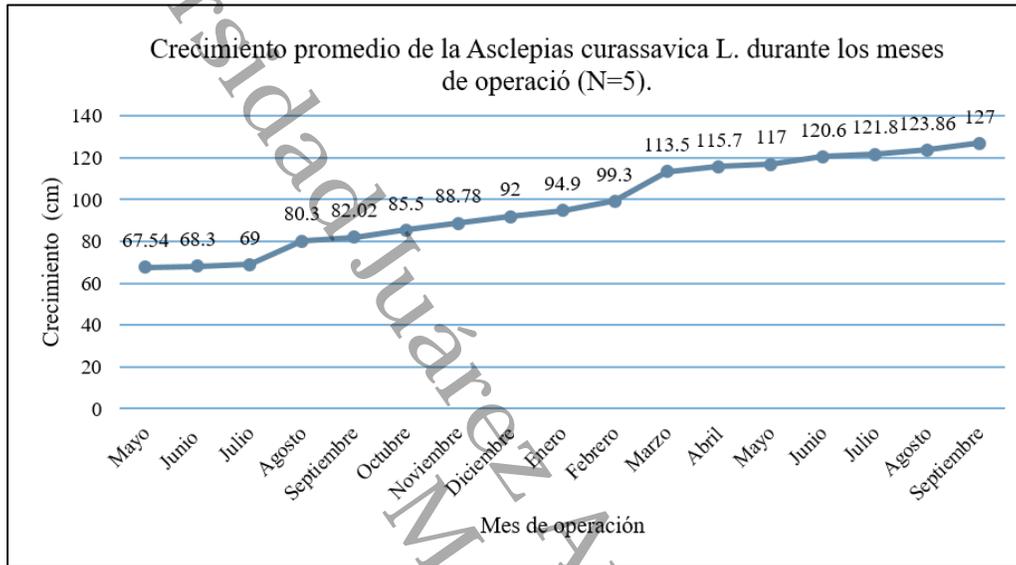


Figura 11. Crecimiento promedio de la *Asclepias curassavica* L. durante los meses de operación.

Para conocer la biomasa que representaba el césped que fue sembrado en el humedal artificial se flujo subsuperficial, se extrajo una pequeña área de césped con dimensiones de 0.3 x 0.3 m, se registró su peso (1.895 Kg) y se dispuso a secado para conocer su peso seco y el porcentaje de humedad. En la tabla 8 se muestran datos como el área y biomasa que este representa en el humedal artificial, entre otros.

Tabla 8. Datos obtenidos para el césped.

VARIABLE	UNIDAD	VALOR
Área de pasto en el reactor	m ²	3
Biomasa húmeda del área extraída de pasto	Kg	1.895
Biomasa seca del área extraída de pasto	Kg	0.417
Biomasa total promedio de pasto en el HA	Kg	63.166
% de humedad del área extraída	%	77.99



Durante el periodo de evaluación se presentó una serie de plagas en el HAFS-AC, una de ellas fue el pulgón amarillo del sorgo (*Melanaphis sacchari*) (figura 12) y oruga de *Danaus plexippus* (figura 13).



Figura 12. Pulgón amarillo del sorgo.



Figura 13. Oruga de *Danaus plexippus* sobre tallo de *Asclepias curassavica* L.



8.3 Gasto de operación.

8.3.1 Etapa de evaluación.

El gasto diario y horario de operación de los tratamientos se muestran en las figuras 14 y 15. En cuanto al gasto diario, los HAFS presentaron fluctuaciones de 0.202 m³/d a 0.218 m³/d.

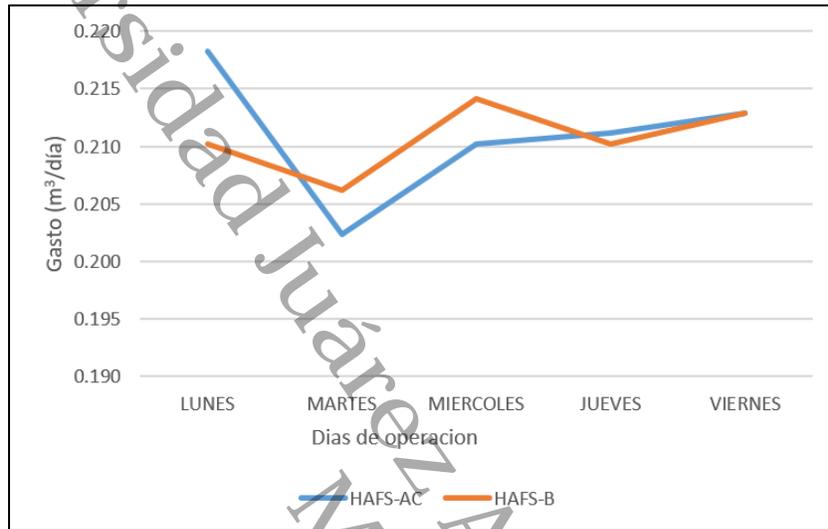


Figura 14. Gasto diario de operación – etapa de evaluación (N=25).

Los gastos horarios en los HAFS presentaron fluctuaciones de 0.204 m³/d a 0.210 m³/d.

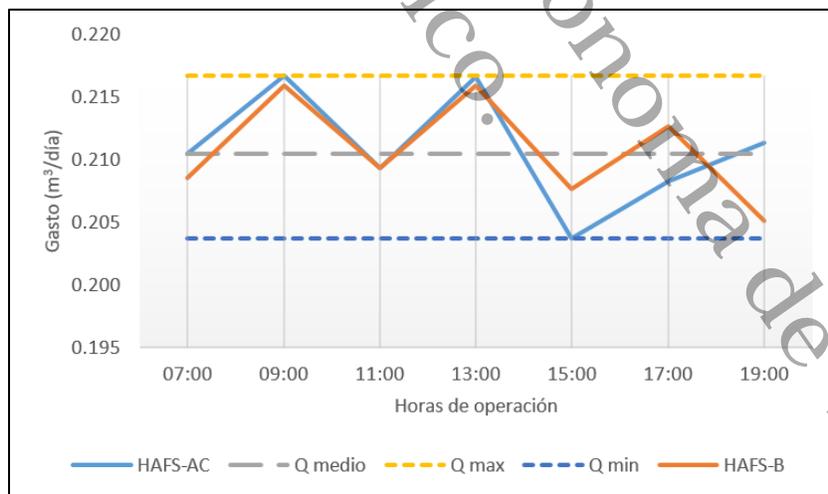


Figura 15. Gasto horario de operación – etapa de evaluación (N=25).



8.4 Calidad del agua.

El comportamiento promedio de la calidad del agua de los tratamientos evaluados durante la etapa de evaluación se resume en la tabla 9.

Tabla 9. Valores promedios (\pm DE) de la calidad del agua del tratamiento en el HAFS-AC en la etapa de evaluación (N=72).

TRATAMIENTO	CÁRCAMO	TC 1	HASF-AC	E.R. (%)	LMP		REFERENCIA
					P.D	P.M	
pH	7.33 \pm 0.29	7.27 \pm 0.30	7.45 \pm 0.18	-2.43	6 - 9		NOM-001-SEMARNAT-2021
T(°C)	7.27 \pm 0.30	29.00 \pm 0.85	28.38 \pm 0.65	2.15	35	35	NADF-003-AGUA-2002
SDT (mg/L)	152.56 \pm 16.04	170.56 \pm 8.31	182.11 \pm 1.90	-6.78	1000		CECA
CE (μ S/cm)	304.89 \pm 32.62	318.22 \pm 75.26	361.11 \pm 10.49	-13.48	1000		NADF-003-AGUA-2002
OD (mg/L)	0.50 \pm 0.13	0.47 \pm 0.14	0.42 \pm 0.13	9.98	2.1		LFDDAMAN, LCA, 2019.
TURBIEDAD (NTU)	3.70 \pm 1.25	5.03 \pm 2.90	3.40 \pm 1.30	32.45	5		
COLOR (UC)	161.33 \pm 37.79	187.22 \pm 76.25	188.67 \pm 46.20	-0.77	10	10	
POR (mV)	38.56 \pm 66.89	38.67 \pm 77.60	-14.89 \pm 90.78	138.51	SN		

LMP = Límite Máximo Permissible, P.D = Promedio Diario, P.M = Promedio Mensual, SN = Sin Normatividad, E.R = Eficiencia de Remoción.

Tabla 10. Valores promedios (\pm DE) de la calidad del agua del tratamiento en el HAFS-B en la etapa de evaluación (N=72).

TRATAMIENTO	CÁRCAMO	TC 4	HASF-B	E.R. (%)	LMP		REFERENCIA
					P.D	P.M	
pH	7.33 \pm 0.29	7.42 \pm 0.19	7.88 \pm 0.06	-6.14	6 - 9		NOM-001-SEMARNAT-2021
T(°C)	7.27 \pm 0.30	28.92 \pm 0.91	28.99 \pm 0.53	-0.23	35	35	NADF-003-AGUA-2002
SDT (mg/L)	152.56 \pm 16.04	309.22 \pm 14.43	179.00 \pm 5.10	42.11	1000		CECA
CE (μ S/cm)	304.89 \pm 32.62	617.44 \pm 29.28	362.33 \pm 5.52	41.32	1000		NADF-003-AGUA-2002
OD (mg/L)	0.50 \pm 0.13	0.43 \pm 0.14	0.40 \pm 0.10	6.48	2.1		LFDDAMAN, LCA, 2019.
TURBIEDAD (NTU)	3.70 \pm 1.25	7.37 \pm 1.31	2.29 \pm 0.52	68.93	5		
COLOR (UC)	161.33 \pm 37.79	385.00 \pm 36.86	118.33 \pm 25.86	69.26	10	10	
POR (mV)	38.56 \pm 66.89	-66.56 \pm 219.60	35.67 \pm 5.79	153.59	SN		

LMP = Límite Máximo Permissible, P.D = Promedio Diario, P.M = Promedio Mensual, SN = Sin Normatividad, E.R = Eficiencia de Remoción.

A continuación, se interpretan los valores de efluente obtenidos por tipo de tratamiento.

Asclepias curassavica L y especies de césped en el tratamiento de aguas residuales domesticas vía humedales artificiales de flujo subsuperficial.

PIA. Manuel Antonio Gerónimo López



8.4.1 Potencial de hidrógeno (pH).

El pH del agua sin tratar en el TC 1 fue de 7.27 (UpH). La prueba de Kruskal-Wallis indico que puesto que el valor-P de la prueba-F es <0.05 , existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de pH entre un nivel de tratamiento y otro, con un nivel del 5% de significación. El valor mediano más bajo de pH se registró en el TC1 de 7.33, seguido del Cárcamo con 7.41 y los máximos en el HAFS-B y TC4 con 7.76 y 7.49 respectivamente.

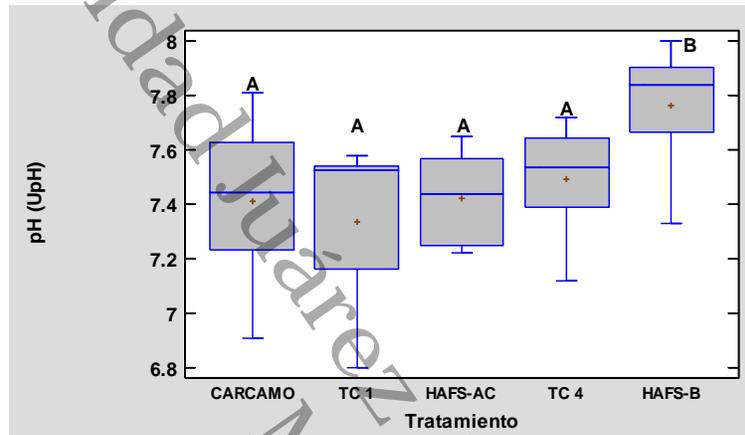


Figura 16. Valores medianos de pH – etapa de evaluación. Letras diferentes indican diferencias ($p < 0.05$) y un nivel del 5% de significación (N=60).

En la figura 16 se observa que el tratamiento con vegetación (HAFS-AC) presento valores cercanos a neutros (7.22 y 7.65).

8.4.2 Temperatura.

En cuanto a la temperatura del agua sin tratar en el TC 1 fue de 29°C. La prueba de Kruskal-Wallis indico que puesto que el valor-P de la prueba-F es <0.05 , existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de T(°C) entre un nivel de tratamiento y otro, con un nivel del 5% de significación. El valor mediano más bajo de temperatura se registró en el HAFS-AC de 28.38°C, seguido del TC 4 con 29.02°C y los máximos en el Cárcamo y HAFS-B con 29.45°C y 29.18°C respectivamente.

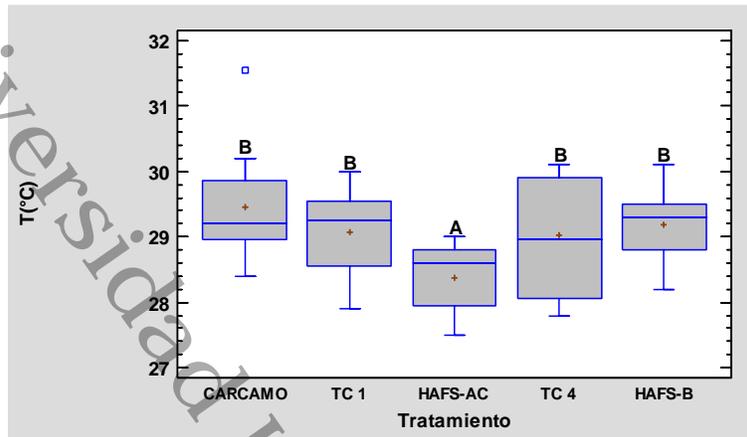


Figura 17. Valores medianos de temperatura – etapa de evaluación. Letras diferentes indican diferencias ($p < 0.05$) y un nivel del 5% de significación ($N=60$).

En la figura 17 se observa que el HAFS-AC logro disminuir un grado con respecto al TC1 (28.3 – 29°C).

8.4.3 Sólidos disueltos totales (SDT).

Los sólidos disueltos totales (SDT) del agua residual sin tratar en el TC 1 fue de 170.56 mg/L. La prueba de Kruskal-Wallis indico que puesto que el valor-P de la prueba-F < 0.05 , existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de SDT (mg/L) entre un nivel de tratamiento y otro, con un nivel del 5% de significación. El valor mediano más bajo de SDT se registró en HAFS-B con 177.66 mg/L, seguido del cárcamo con 185.4 mg/L y los máximos en el TC4 y TC1 con 314.66 y 203.33 mg/L respectivamente.

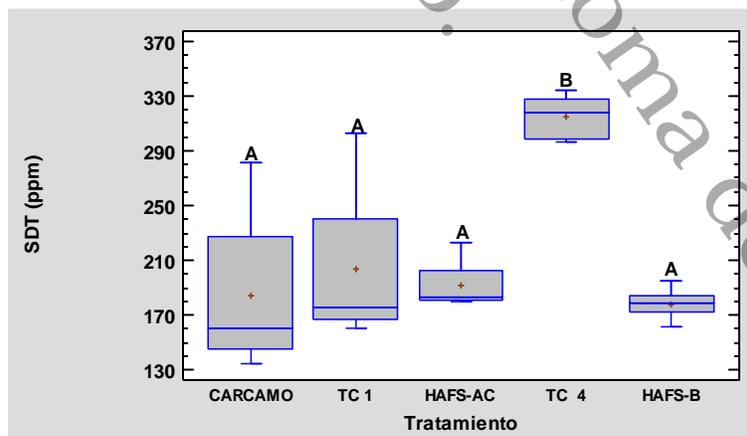


Figura 18. Valores medianos de SDT – etapa de evaluación. Letras diferentes indican diferencias ($p < 0.05$) y un nivel del 5% de significación ($N=60$).

En la figura 18 se observa que el tratamiento en el HAFS-AC logro disminuir la concentración de SDT del TC 1 de 203.33 mg/L a 191.83 mg/L.



8.4.4 Color.

El color del agua residual sin tratar en el TC 1 fue de 187.22 UC. La prueba de Kruskal-Wallis indicó que puesto que el valor-P de la prueba-F es <0.05 , existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de COLOR (UC) entre un nivel de tratamiento y otro, con un nivel del 5% de significación. El valor mediano más bajo de color se registró en HAFS-B con 130.08 UC, seguido del cárcamo con 162.58 UC y los máximos en el TC4 y HAFS-AC con 376.58 y 241.91 UC respectivamente.

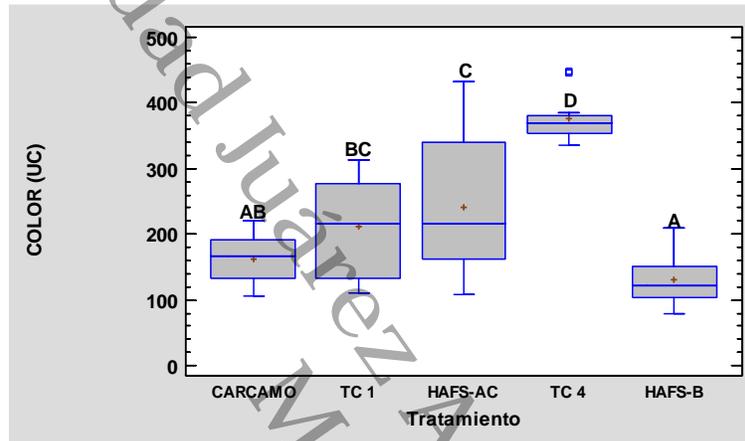


Figura 19. Valores medianos de Color – etapa de evaluación. Letras diferentes indican diferencias ($p < 0.05$) y un nivel del 5% de significación (N=60).

En la figura 19 se observa que en el TC 4 se registró la concentración de Color más alta que fue de 376.58 UC.

8.4.5 Conductividad eléctrica (CE).

La CE del agua residual sin tratar en el TC 1 fue de 318.22 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La prueba de Kruskal-Wallis indicó que puesto que el valor-P de la prueba-F es <0.05 , existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) entre un nivel de tratamiento y otro, con un nivel del 5% de significación. El valor mediano más bajo de CE se registró en HAFS-B con 354.333 $\mu\text{S}/\text{cm}$, seguido del cárcamo con 368.417 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y los máximos en el TC4 y TC 1 con 628.5 y 389.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente.

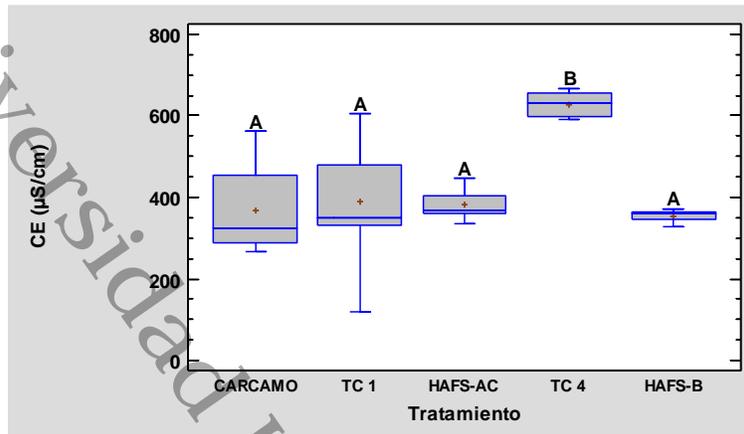


Figura 20. Valores medianos de Conductividad eléctrica – etapa de evaluación. Letras diferentes indican diferencias ($p < 0.05$) y un nivel del 5% de significación (N=60).

En la figura 20 se observa que en el HAFS-AC hubo una pequeña disminución en la CE con respecto al TC 1 (381.333 - 389.5 µS/cm, respectivamente).

8.4.6 Oxígeno disuelto (OD).

En cuanto al OD del agua residual sin tratar en el TC 1 fue de 0.47 mg/L. La prueba de Kruskal-Wallis indico que puesto que el valor-P de la razón-F es ≥ 0.05 , no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de OD (mg/L) entre un nivel de tratamiento y otro, con un nivel del 5% de significación. El valor mediano más bajo de OD se registró en HAFS-B con 0.377 mg/L, seguido del HAFS-AC con 0.388 mg/L y los máximos en el Cárcamo y TC 1 con 0.45 y 0.388 mg/L respectivamente.

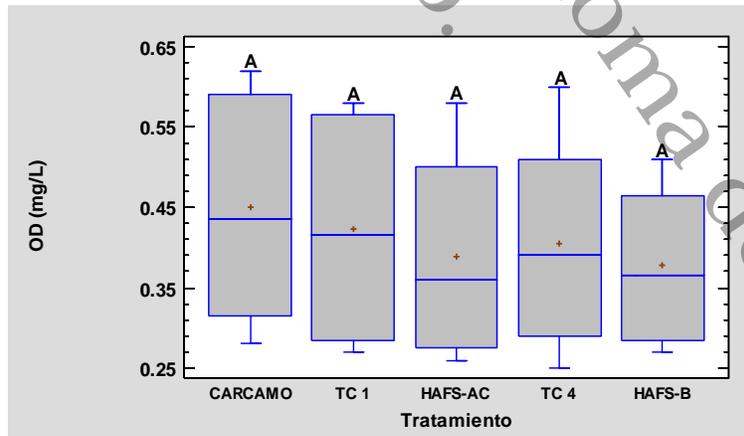


Figura 21. Valores medianos de Oxígeno Disuelto – etapa de evaluación. Letras diferentes indican diferencias ($p \geq 0.05$) y un nivel del 5% de significación (N=60).

En la figura 21 se observa que todos los tratamientos se encontraban cerca de la media de los valores de OD.



8.4.7 Turbiedad.

La Turbiedad del agua residual sin tratar en el TC 1 fue de 5.03 NTU. La prueba de Kruskal-Wallis (figura 21) indicó que puesto que el valor-P de la prueba-F es <0.05 , existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de TURBIEDAD (NTU) entre un nivel de tratamiento y otro, con un nivel del 5% de significación. El valor mediano más bajo de turbiedad se registró en HAFS-B con 2.81 NTU, seguido del Cárcamo con 3.55 NTU y los máximos en el TC 4 y TC 1 con 7.2 y 5.55 NTU respectivamente.

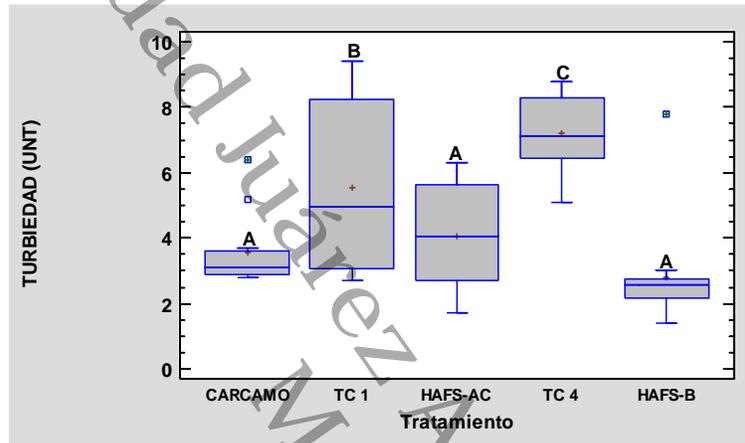


Figura 22. Valores medianos de Turbiedad – etapa de evaluación. Letras diferentes indican diferencias ($p < 0.05$) y un nivel del 5% de significación (N=60).

8.4.8 Potencial Oxido Reducción (POR).

El Potencial Oxido Reducción sin tratar en el TC 1 fue de 38.67 mV. La prueba de Kruskal-Wallis indicó que puesto que el valor-P de la prueba-F es <0.05 , existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de POR (mV) entre un nivel de tratamiento y otro, con un nivel del 5% de significación. El valor mediano más bajo de POR se registró en el TC 4 con -100.66 mV, seguido del HAFS-AC con -5.58 mV y los máximos en el HAFS-B y Cárcamo con 37.66 y 34.75 mV respectivamente.

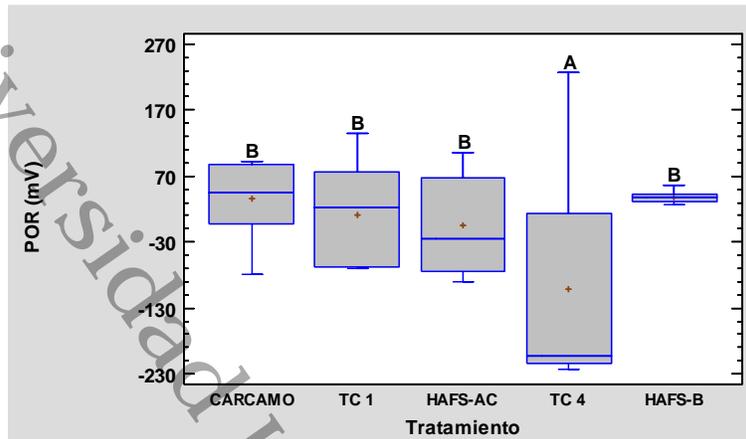


Figura 23. Valores medianos de Potencial Oxido Reducción – etapa de evaluación. Letras diferentes indican diferencias ($p < 0.05$) y un nivel del 5% de significación (N=60).

8.5 Eficiencia de remoción.

Tabla 11. Eficiencias de remoción en HAFS-AC y HAFS-B.

TRATAMIENTO	HAFS-AC ER (%)	HAFS-B ER (%)
pH	-0.02	-6.13
T(°C)	2.14	-0.23
CE (µS/cm)	-13.47	41.31
SDT (mg/L)	-6.77	42.11
TURBIEDAD (NTU)	32.45	68.92
COLOR (UC)	-0.77	69.26
OD (mg/L)	9.97	6.47
POR (mV)	138.50	153.58

8.5.1 Potencial de Hidrogeno.

Se registró una eficiencia de remoción en el HAFS-AC del pH de -0.02%, esto significa un aumento en el pH en esta unidad experimental. Los cambios del pH pueden influir fuertemente en la adsorción o liberación de cationes por las sustancias orgánicas (Alzate Amariles, 2016). El pH, durante el proceso, puede incrementarse para aguas residuales ácidas, efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo; en contraposición, en aguas residuales alcalinas el pH puede decrecer; a su vez, y dependiendo de la naturaleza del contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso (Arango Ruiz, 2012).



8.5.2 Temperatura.

Se registró una eficiencia de remoción en el HAFS-AC en la temperatura de 2.14%, mientras que en el HAFS-B fue de -0.23%, por lo que el HAFS-AC fue el más eficaz en este para este parámetro. Orozco et al (2020) dice que la temperatura es un factor importante en los procesos que se llevan a cabo en los sistemas biológicos. La temperatura condiciona los procesos de depuración biológica (degradación de la materia orgánica y de nitrificación), por lo que es importante su control (Trapote Jaume, 2013).

8.5.3 Conductividad eléctrica.

Se obtuvo una eficiencia de remoción de -13.47% en la conductividad eléctrica en el HAFS-AC, lo que quiere decir que hubo un aumento significativo. La conductividad eléctrica refleja la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica y está directamente relacionada con la concentración de sales disueltas en el agua (CORPONOR, 2017).

8.5.4 Sólidos Disueltos Totales.

La NOM-AA-034SCFI-2015 define a los sólidos disueltos totales como el material soluble constituido por materia inorgánica y orgánica que permanece como residuo después de evaporar y secar una muestra previamente filtrada a través de un filtro de fibra de vidrio con poro de 1,5 μm a una temperatura de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. La eficiencia de remoción de sólidos disueltos totales en el HAFS-AC fue de -6.77%, lo que indica que hubo un aumento de concentración.

8.5.5 Color.

La NMX-AA-045-SCFI-2001 nos dice que el color aparente es el color de la muestra debido a sustancias en forma disuelta y al proporcionado por sólidos suspendidos, este parámetro es muy poco reproducible ya que el comportamiento de los sólidos suspendidos es muy variable. El HAFS-AC registro una eficiencia de remoción de -0.77%, este porcentaje nos dio a conocer un aumento de color que se debió por las hojas muertas de la vegetación *Asclepias curassavica* L.

8.5.6 Oxígeno disuelto.

Los niveles de oxígeno disuelto (OD) en aguas residuales y residuales tratadas dependen de las actividades químicas, físicas y bioquímicas en los cuerpos de aguas (NMX-AA-012-SCFI-2001). La eficiencia de remoción en el HAFS-AC fue de 9.97% y en el HAFS-B de 6.47%. El OD es uno de los principales indicadores de contaminación de aguas. Los bajos niveles de OD son principalmente causados por la presencia de materia orgánica o de material inorgánico parcialmente oxidado. En ambos casos, se presenta una demanda de oxígeno, ya sea para la respiración de los organismos capaces de digerir la materia orgánica o por la oxidación de los compuestos inorgánicos (Posada et al., 2013).

8.5.7 Turbiedad.

El HAFS-AC obtuvo una eficiencia de remoción de 32.45%, esta eficiencia de remoción no es muy alta ya que puede haber factores que pueden estar interfiriendo como lo pudieran ser

Asclepias curassavica L y especies de césped en el tratamiento de aguas residuales domesticas vía humedales artificiales de flujo subsuperficial.

PIA. Manuel Antonio Gerónimo López



desechos de la vegetación o también una alta turbiedad se puede deber a microorganismos. La turbiedad es originada por las partículas en suspensión o coloides (arcillas, tierra finamente dividida, etcétera). La turbiedad es causada por las partículas que forman los sistemas coloidales; es decir, aquellas que, por su tamaño, se encuentran suspendidas y reducen la transparencia del agua (Bautista et al., 2011).

8.5.8 Potencial oxido reducción.

El HAFS-AC presento un porcentaje de remoción de 138.50%. El potencial de oxidación reducción o potencial redox, indica la actividad o la fuerza de los oxidantes o reductores en el agua y será en función de su concentración en la misma. Un agua oxidante donde la concentración de oxidantes es mayor que la de reductores tendrá tendencia a captar electrones y mostrará un potencial redox positivo. Por el contrario, un agua reductora donde la concentración de reductores es mayor que la de oxidantes, tendrá tendencia a ceder electrones y por tanto mostrará un potencial redox negativo. En un agua residual con cargas altas de materia orgánica, el medio será claramente reductor y mostrará potenciales redox muy negativos (Guillemes Pereida, 2014).



9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Podemos concluir que el HAFS-AC (con *Asclepias curassavica* L. como especie predominante) con un TRH 3.7 días alcanzó eficiencias de remoción para los parámetros de pH, temperatura, conductividad eléctrica (CE), Sólidos Disueltos Totales (SDT), turbiedad, color, Oxígeno Disuelto (OD) y Potencial Óxido-Reducción (POR) de -0.02%, 2.14%, -13.47%, -6.77%, 32.45%, -0.77%, 9.97% y 138.50%, respectivamente.

La especie *Asclepias curassavica* L. al inicio de la operación presento dificultades para su adaptación en el humedal por lo que se optó por el uso de una serie de especies de césped que ayudaron a la adaptación de la vegetación.

El agua residual de la DACBiol que se empleó en esta investigación ya cumplía con los LMP antes de que ingresara al tratamiento.

Se rechaza la hipótesis 1 y se acepta la hipótesis 0, ya que la especie *Asclepias curassavica* L. y las especies asociadas de césped de los géneros *Phyla*, *Digitaria*, *Acmella* y *Murdannia*, no lograron la remoción de hasta un 80% de contaminantes básicos lo que permitirá cumplir con la normatividad ambiental vigente.

Se recomienda que el medio de soporte se lave muy bien para que este no presente problemas durante el tratamiento o este afecte la adaptación de la vegetación. También mantener un flujo de agua constante, mantener una fina película de agua sobre el medio de soporte y que a la vez no sobrepase este mismo ya que esto puede ocasionar dos problemas, el primero sería que los rayos del sol al contacto con el agua reflejen hacia la vegetación ocasionando la quema de esta y el segundo sería que los rayos del sol caliente el medio de soporte provocando el aumento de la temperatura en el medio de soporte ocasionando que las raíces de la vegetación se sequen y muera.



10. BIBLIOGRAFÍA.

Alfaro C., Pérez R. y Solano M. (junio 2013). Saneamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales en el Museo de Cultura Popular de la Universidad Nacional. Revista de Ciencias Ambientales Tropical Journal of Environmental Sciences. Págs. 63-71. <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/ambientales/article/view/7306/7554>

Alzate Amariles, E, Y. (2015). Influencia del pH y el tipo de macrófita en la remoción de materia orgánica y cadmio de un drenaje sintético de minería de carbón, por medio de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal a escala piloto. Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.

Álvaro Arango, R. (2012). Efectos del pH y la conductividad en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea.

Arce, C., P. (2018). Humedales artificiales: una alternativa para tratamiento de aguas de producción. (Monografía). Fundación Universidad de América facultad de educación permanente y avanzada especialización en gestión ambiental Bogotá D.C. Bogotá.

Atrarés Huerta, L. (n.d.). Determinación de la porosidad. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

Bautista Covarrubias, J., C. y Velazco Arcel, J. (2011).

Bedoya J., Ardila A. y Reyes J. (2014). Evaluación De Un Humedal Artificial De Flujo Subsuperficial en el Tratamiento de las Aguas Residuales Generadas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Colombia. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v30n3/v30n3a4.pdf>

De La Mora Orozco, C., Saucedo Terán, R. A., Calidad de agua para el cultivo de Tilapia en tanques de geomembrana. Dirección de Fortalecimiento a la Investigación, Universidad Autónoma de Nayarit, México.

González Acuña, I, J., Gómez Rosales, S. y Flores López, H, E. (2020). Efecto de la temperatura del agua sobre la constante de velocidad de reacción de los contaminantes en un humedal construido para el tratamiento de aguas residuales porcícolas.

Castañeda, S., L. (2017). Una revisión sobre el uso de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domesticas en América Latina: diseño, operación y resultados. Huacho, Perú.

Comisión Nacional del Agua. (ed. 2018). Estadísticas del Agua en México. Ciudad de México.

CONABIO. (2009). Ficha técnica *Asclepias Curassavica* L. México.



- CONAGUA. (2015). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Humedales artificiales. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. México. 134p. Libro 30. Consultado el 20 diciembre de 2020 de: <https://www.gob.mx/conagua/documentos/biblioteca-digital-de-mapas>
- CORPONOR. (2018). Informe. Interpretación de resultados por parámetros (conductividad eléctrica, oxígeno disuelto).
- De la Peña, M. E., Ducci, J. & Zamora, V. (mayo, 2013). Tratamiento de aguas residuales en México. Banco Interamericano de Desarrollo. Sector de Infra-estructura y Medio Ambiente. México.
- Díaz C, E., Alvarado G, A. R. & Camacho C, K. E. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. Universidad Autónoma del Estado de México. México.
- DOF. (2002). NOM-021-RECNAT-2000 Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.
- DOF. (2016) NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de agua-medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba (cancela a la nmx-aa-034-scfi-2001).
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., F. & Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Cochabamba, Bolivia.
- Enríquez J., Meléndez F., Bolaños E. y Esqueda V. (2011). Producción y manejo de forrajes tropicales. SAGARPA, Inafap y Centro de Investigación del Golfo. México.
- Fernández B, A. M., Juárez J, V. & Cortés Z, L. Usos de las especies del género *Asclepias* L. (*Apocynaceae*, *Asclepiadoideae*), información del Herbario Nacional de México, MEXU. Universidad Westhil e Instituto de Biología, UNAM. México.
- García O, J. A., López O, G., y Torres B, C. (2019). Evaluación de medios de soporte en humedales artificiales con vegetación *Sagittaria latifolia* en la remoción de contaminantes básicos. Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias.
- González Valencia, A., & Ramírez Soto, J. D. (2014). Manual Piragüero 3 - Medición del caudal (Primera Edición ed.). Medellín, Colombia: Corantioquía.
- Guillemes Peira, Á. (2014). Aplicación de la oxidación avanzada en la desinfección de aguas residuales. Universidad del Pacífico, Guayaquil, Ecuador.



Hernández R, P. (junio, 2013). Actividad antioxidante de *Asclepias curassavica* L., en un modelo de cáncer. Universidad Nacional Autónoma de México.

IDEAM. (2004). Determinación De Oxígeno Disuelto Por El Método Yodométrico Modificación De Azida. República de Colombia.

Jerónimo Martínez, A., & Campos Ramos, A. Z. (2021). Modelo de la distribución espacial de los humedales artificiales en serie de la DACBiología-UJAT. (Tesis de licenciatura). Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. División Académica de Ciencias Biológicas, Villahermosa, Tabasco.

Karel Mederos Perugorria. (s.f.). Naturaleza Tropical. *Asclepias Curassavica* L. Habana, Cuba.

Mancera C, R., Camargo A, A., Cohen P, H. & Ahumado M, M. (2016). Influencia De Los Factores Bióticos En Humedales Artificiales. Revista científica multidisciplinaria *Ipsa Scientia*. Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco – Cartagena. Cartagena de Indias, Colombia.

León V, R. A. & Cuevas R, G. (2016). Diseño de un sistema lineal de humedales para la elaboración de una planta piloto de tratamiento de agua residual en el conjunto de laboratorios “La Perlita” de la Universidad de Guanajuato en Guanajuato, Gto. CONACYT.

Luna P, V. M. & Aburto C, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*.

López O, G., Torres, C. A., Bautista, R. G., Hernández, J. R., Cruz, E. y Ferrer, M. I. (2014). Diseño de sistemas experimentales de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial. En Contreras SWM (1a Ed). *Perspectiva Científica desde la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco*. Primera Edición. Tabasco México. pp: 133-146.

López J, L. N. (2019). TABASCO ES EL EDÉN DE LOS HUMEDALES. KUXULKAB' Revista de Divulgación, División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

López O, G., Bautista M, R. G., Ramos H, S., Torres B, C. A., López V, R., & Pampillón G, L. (2018). Phytoremediation of wastewater with *Thalia geniculata* in constructed wetlands: basic pollutants distribution.

Marín A, C., Solís S, R., López O, G., Bautista M, R. G. & Romellón C, M. J. (2016). Tratamiento De Aguas Residuales Por Humedales Artificiales Tropicales En



Tabasco, México. Ciba Revista Iberoamericana De Las Ciencias Biológicas Y Agropecuarias.

Minchola G, J. L. & Gonzalez V, F. (2013). Humedales artificiales en el tratamiento de las aguas residuales domésticas de la mina Barrick. Arnaldoa. Gobierno Regional de la Libertad & Universidad Nacional de Trujillo. Perú. <https://www.biodiversitylibrary.org/page/46624941#page/267/mode/1up>

Montiel, M., P. (2014). Humedal artificial. Universidad Nacional Autónoma de México. D.F., México.

NADF-003-AGUA-2002. Norma ambiental para el distrito federal, que establece las condiciones y requisitos para la recarga en el distrito federal por inyección directa de agua residual tratada al acuífero de la zona metropolitana de la ciudad de México.

NOM-001-SEMARNAT-2021. Norma oficial mexicana, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

NMX-AA-012-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela a la nmx-aa-012-1980).

Noriega L, B., Morales R, A. A., Luna Q, R., Ulloa V, T., Cruz J, G., Serafín M, A. H. & Gutiérrez O, N. L. (2018). Identificación de especies vegetales asociadas a jales del distrito minero de Guanajuato. Acta Universitaria. Universidad de Guanajuato. México.

Rodríguez M, J. P., Gómez E., Garavito L. & López F. (2010). Estudio De Comparación Del Tratamiento De Aguas Residuales Domésticas Utilizando Lentejas Y Buchón De Agua En Humedales Artificiales. Universidad Manuela Beltrán, Colombia.

Rodríguez, L., A. (2017). Diseño de un humedal artificial para el municipio arcos de las salinas (TERUEL). Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.

Romero Rojas, J. A. (1999). Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño. (pp. 17-23,24). Bogotá, D.C., Cundinamarca, Colombia: Escuela colombiana de ingeniería.

Ojeda, L., Romero, S., Reyes, J. A., Gallegos, R., y Herrera, A. (2014). Evaluación de la depuración de agua gris en un humedal artificial a escala piloto. Memorias de la segunda conferencia Panamericana en sistemas de humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua, Morelia, Michoacán, México. Pag. 66 – 69.



- Oficina de información científica y tecnológica para el congreso de la unión. (enero, 2019). Tratamiento de aguas residuales. Ciudad de México.
- ONU-AGUA. (marzo 22, 2017). Objetivos de desarrollo sostenible. Las aguas residuales también pueden ser herramientas para el desarrollo sostenible.
- SEMARNAT. (2013). Agua, Calidad. El medio ambiente en México 2013-2014.
- Sierra P, O. M. & López O, G. (2013). Tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales. KUXULKAB' Revista de Divulgación, División Académica de Ciencias Biológicas, UJAT. Villahermosa, Tabasco, México.
- Solís S, R., López O, G., Bautista M, R. G., Hernández B, J. R. & Remellón C, M. J. (2016). Evaluación De Humedales Artificiales De Flujo Libre Y Subsuperficial En La Remoción De Contaminantes De Aguas Residuales Utilizando Diferentes Especies De Vegetación Macrófita. México.
- Oswald, U. (2011). Retos de la investigación del agua en México. UNAM.CRIM. México.
- Miranda, R., M. & Luna, P., V. (1ra ed.) (2001). Estado del Arte y Perspectiva de Aplicación de los Humedales Artificiales de Flujo Horizontal en México. UNAM. México, D.F.
- Palta P, G. H., & Morales V, S. (2013). Fitodepuración De Aguas Residuales Domésticas Con *Poaceas: Brachiaria Mutica, Pennisetum Purpureum Y Panicum Maximun*, En El Municipio De Popayán, Cauca. Scielo.
- Pazmiño, P & Jaramillo, T. (2019). Sistemas de siembra utilizado en el cultivo de banano (*Musa paradisiaca*, en la hacienda la Gema del cantón Baba UTB, 2019). <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/6025>
- Posada, E., Mojica, D., Pino, N., Bustamante, C. y Monzón Pineda, A. (2013). Establecimiento de índices de calidad ambiental de ríos con bases en el comportamiento del oxígeno disuelto y de la temperatura. Aplicación al caso del río Medellín, en el valle de Aburrá en Colombia. Colombia.
- Terán, L. V. (2014). Principio de Arquímedes. Vida Científica Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 4, 2(3).
- Trapote Jaume, A. (2013). Depuración y regeneración de aguas residuales urbanas.
- World Economic Forum. (2019). The Global Competitiveness Report 2019.



11. ANEXOS TABLAS.

Tabla 12. Materiales y costos para construcción y mantenimiento de las unidades experimentales.

MATERIALES	CANTIDAD	P.U.	COSTO TOTAL
Impermeabilizante acrílico (FESTER) 20L	1	\$1,487	\$1,487
Primario anticorrosivo (FERRE) 4L	4	\$466	\$1864
Membrana de refuerzo (COMEX)	1	\$1,169	\$1,169
Thinner 1L	2	\$117	\$234
Brochas	2	\$51	\$102
Espátulas	1	\$39	\$39
Grava 3/4" Ø	3m ³	\$430	\$1,290
Bomba eléctrica ¼ HP	1	\$500	\$500
Lamina de acero al carbón calibre 10 (2.5m x 1.2m x 1m)	2	\$14,400	\$28,800
Tanque de control (200L)	2	\$250	\$500
Total			\$35,985

Los gastos de construcción fueron absorbidos por el Laboratorio de Tecnología del Agua de la DACBiol-UJAT. Este presupuesto no incluye mano de obra.

Tabla 13. Costos de análisis de laboratorio.

PARÁMETRO	P.U.	CANTIDAD	COSTO TOTAL
pH	\$50	72	\$3,600
Temperatura	\$50	72	\$3,600
SDT	\$50	72	\$3,600
CE	\$50	72	\$3,600
Turbiedad	\$250	72	\$18,000
Color	\$250	72	\$18,000
OD	\$250	72	\$18,000
POR	\$180	72	\$12,960
Muestreo	\$300	72	\$21,600
Corrida Analítica	\$300	72	\$21,600
Total			\$ 124,560

Los costos de todos los análisis fueron absorbidos por el Laboratorio de Tecnología del Agua de la DACBiol-UJAT.

12. ANEXO IMÁGENES.



Figura 24. Mantenimiento correctivo de las unidades experimentales de HA.



Figura 25. Lavado del medio de soporte.



Figura 26. Medio de soporte en la unidad experimental de HA.



Figura 27. Colecta de vegetación.



Figura 28. Caracterización inicial de la vegetación.



Figura 29. Muestreo del agua residual.



Figura 30. Toma de muestras del medio de soporte.



Figura 31. Análisis de la calidad del agua.



Figura 32. Extracción y pesado de pasto.



Figura 33. Muestras del agua residual.



Figura 34. Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial al final de proyecto.

Asclepias curassavica L y especies de césped en el tratamiento de aguas residuales domesticas vía humedales artificiales de flujo subsuperficial.

PIA. Manuel Antonio Gerónimo López